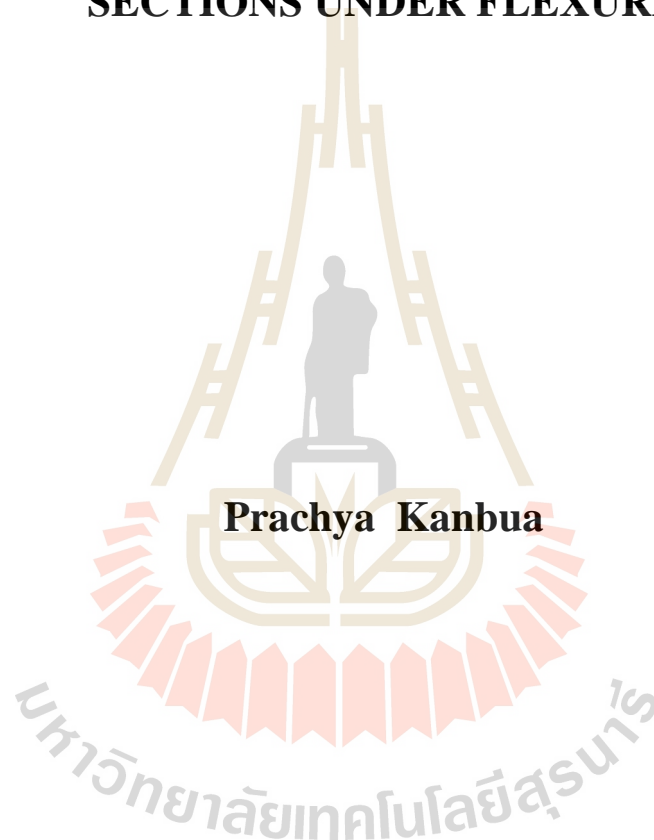


การศึกษาโดยการทดสอบคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด
หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2558

**EXPERIMENTAL STUDY ON PULTRUDED
FIBER-REINFORCED PLASTIC BUILT-UP
BEAMS WITH DOUBLE CHANNEL
SECTIONS UNDER FLEXURE**



Prachya Kanbua

**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 2015

การศึกษาโดยการทดสอบคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรอด
หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงดัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข)
ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.จักษดา ชำรงวุฒิ)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปรัชญา ก้านบัว : การศึกษาโดยการทดสอบคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใย
แบบพัลทรูคหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัด (EXPERIMENTAL STUDY ON
PULTRUDED FIBER-REINFORCED PLASTIC BUILT-UP BEAMS WITH DOUBLE
CHANNEL SECTIONS UNDER FLEXURE) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์
ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 168 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการศึกษาคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูคหน้าตัดรูปรางน้ำ
คู่ภายใต้แรงดัด ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (pinned – pinned supports) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ
ตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคาน แล้วทำการตรวจสอบผลการ
ทดสอบที่ได้เทียบกับสมการการออกแบบของโครงสร้างเหล็ก (LRFD) ตัวอย่างคานที่ใช้ประกอบ
ขึ้นจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบพัลทรูคชั้น (PFRP) หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ซึ่งมีหน้าตัด 3
ขนาด ได้แก่ 2C76×22×6 mm, 2C102×29×6 mm และ 2C152×43×10 mm จำนวนตัวอย่างคาน
ทั้งหมด 144 ตัวอย่าง โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน (L/d) ตั้งแต่ 6.6 ถึง 52.6
ตัวอย่างทดสอบมีจุดเชื่อมต่อ (connectors) ระหว่างหน้าตัดรูปรางน้ำตั้งแต่ 2 ถึง 9 จุด

จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic)
จนถึงประมาณ 80 - 95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น
(nonlinear) เล็กน้อยจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ การโก่ง
เดาะทางด้านข้างแบบเดี่ยว การโก่งเดาะทางด้านข้างแบบของคร่อม และการวิบัติด้วยกำลังของวัสดุ
โดยลักษณะการวิบัติขึ้นกับอัตราส่วน L/d และจำนวนจุดเชื่อมต่อ ซึ่งแนวโน้มของน้ำหนักโก่งเดาะ
แปรผันตรงกับจำนวนจุดเชื่อมต่อ และแปรผกผันกับความยาวของตัวอย่างคาน นอกจากนี้ สมการ
ของ Euler-Bernoulli สามารถทำนายการแอ่นตัวได้ใกล้เคียงและถูกต้องเพียงพอ เมื่อทำการ
เปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะระหว่างผลการทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD พบว่ามีความ
แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากคานที่ใช้ทดสอบเป็นหน้าตัดที่ไม่อัดแน่นและคุณสมบัติของ
วัสดุที่แตกต่างกันระหว่างเหล็กกับ PFRP ดังนั้นเมื่อคำนึงถึงความแตกต่างดังกล่าวสมการออกแบบ
โครงสร้างเหล็กด้วยวิธี LRFD ต้องคูณด้วย reduction factor จากการเปรียบเทียบผลการศึกษาคานพบว่า
ควรใช้ reduction factor เท่ากับ 0.4

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

PRACHYA KANBUA : EXPERIMENTAL STUDY ON PULTRUDED
FIBER-REINFORCED PLASTIC BUILT-UP BEAMS WITH DOUBLE
CHANNEL SECTIONS UNDER FLEXURE. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. SITTICHAJ SEANGATITH, Ph.D., 168 PP.

PFRP COMPOSITE BEAM/PULTRUSION/DOUBLE CHANNEL SECTION/
FLEXURE/LATERAL-TORSIONAL BUCKLING

This thesis present the results of the study on pultruded fiber-reinforced plastic built-up beams with double channel sections under flexure with pinned-pinned supports. The objectives of this study are to determine the structural behaviors and modes of failure for the beams and to compare the testing results with those of the LFRD steel design equation. The PFRP double channel beams used in this study were made of E-glass fiber and polyester resin and manufactured by a pultrusion process. Three different geometries of the tested beams were 2C76×22×6, 2C102×29×6 and 2C152×43×10 mm. The total of 144 specimens was tested the span-to-depth ratios of the specimens (L/d) were in the range of 6.6 to 52.6, the tested beams had the connectors between the double channel sections in the range of 2 to 9 connectors.

Based on the test results, it was found that the behaviors of beams were linear elastic up to 80 - 95% of the failure load and then changing to nonlinear. The failure modes can be classified in to 3 types; individual lateral buckling, overall lateral buckling and material failure. Those modes of failures depend on the L/d ratios and the number of connectors. The trends of critical buckling moment were directly varied with the number of connectors and inversely varied with the span length. In addition, the Euler-Bernoulli equation can be used to predict the deflections of beams with

sufficient accuracy by comparing the critical buckling moment between test results and the LFRD steel design equation, it was found that they are significantly different due to the uncompactness of the tested beams section and the different material properties of the steel and PFRP. Therefore, the steel design LFRD equation must be multiplied by a reduction factor to take care of the differences. From the comparison of the test results, it was found that the reduction factor should be 0.4.



School of Civil Engineering

Academic Year 2015

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 จิรวชิรเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สีนศิริ อาจารย์ ดร.ทงศักดิ์ พิศาลสิน และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา

- อาจารย์ ดร.จักษดา ชำรงวุฒิ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน สำหรับการให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในด้านการตรวจสอบวิทยานิพนธ์พร้อมทั้งให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- คุณณัฐญา กิ่งโลกกรวด ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการติดต่อประสานงานต่าง ๆ

- คุณชานนท์ ฉัตรวิวัฒน์ เพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำโดยตลอด

- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ปรัชญา ก้านบัว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ชา
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	6
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 ปฏิบัติงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion.....	8
2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ FRP.....	8
2.2.2 ส่วนประกอบหลักของวัสดุ FRP.....	9
2.2.2.1 เส้นใยแก้ว.....	9
2.2.2.2 เรซิน.....	11
2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ FRP.....	12
2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ FRP.....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด	18
2.3.1	การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ โดยวิธี AISC/LRFD.....	20
2.3.1.1	คานหน้าตัดอัดแน่น	22
2.3.1.2	คานหน้าตัดไม่อัดแน่น.....	27
2.3.2	การโค้งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ	28
2.3.3	สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด ของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน	30
2.3.4	สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด ของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน PFRP	31
2.3.5	การโค้งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดสำหรับวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด	33
2.4	การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด.....	37
2.5	สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	42
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	44
3.1	บทนำ.....	44
3.2	การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้.....	48
3.3	การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ โดยสมการออกแบบ	54
3.4	การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคาน PFRP โดยทฤษฎี.....	55
4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	57
4.1	บทนำ.....	57
4.2	พฤติกรรมการรับแรงดัดของคาน	57
4.3	กำลังของคานที่ได้จากการทดสอบ	62
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่ได้จากการ ทดสอบ	68
4.5	การเปรียบเทียบ โมเมนต์โค้งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของLRFD.....	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลงานวิจัย.....	79
5.1	บทนำ.....	79
5.2	สรุปผลทดสอบ.....	79
5.2.1	พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน PFRP	79
5.2.2	ลักษณะการวิบัติของคาน PFRP.....	79
5.2.3	กำลังของคาน PFRP ที่ได้จากการทดสอบ	79
5.2.4	เปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน PFRP	80
5.2.5	เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD.....	80
5.3	ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน	80
5.4	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป.....	81
	รายการอ้างอิง	82
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด	90
	ภาคผนวก ข. การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัด	129
	ภาคผนวก ค. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	155
	ประวัติผู้เขียน	168

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของใยแก้วชนิด E-glass	10
2.2	คุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์	12
2.3	คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณ ตามมาตรฐาน ASTM A36.....	15
2.4	ขีดจำกัดของอัตราส่วน b/t	21
2.5	ค่าสัมประสิทธิ์ r และระยะการโก่งตัวสูงสุด.....	29
2.6	ค่าสัมประสิทธิ์ r และ s และระยะการโก่งตัวสูงสุด	34
3.1	รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างของชิ้นส่วน FRP ที่นำมาใช้ในงานวิจัย.....	45
3.2	คุณสมบัติของคานประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างที่ใช้ในการศึกษา.....	46
3.3	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C76×22×6 mm.....	49
3.4	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C102×29×6 mm.....	50
3.5	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C152×43×10 mm.....	51
4.1	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C76×22×6 mm.....	64
4.2	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C102×29×6 mm.....	65
4.3	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C152×43×10 mm.....	67
4.4	ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C76	72
4.5	ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C102	72
4.6	ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C152	73

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	สภาวะกั้ดกร่อนเนื่องจากสนิมในโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	1
1.2	โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	2
1.3	การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับแทนจุดเจาะน้ำมัน	3
1.4	การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับห่อทำความเย็น.....	4
1.5	การใช้วัสดุ FRP สำหรับสะพานข้ามทางรถไฟ	4
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ	9
2.2	ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion.....	13
2.3	หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion	14
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ FRP	16
2.5	หน่วยแรงค้ดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน	19
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุน้กับความยาวใ้การยึดรั้งด้านข้างของคาน	22
2.7	พิค้ดของหน้าตัดรูปรางน้ำ	26
2.8	การทดสอบคาน FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด.....	37
2.9	ลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด.....	39
2.10	แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด.....	40
2.11	การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด	41
2.12	ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ	41
3.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุน้กับความยาวใ้การยึดรั้งด้านข้างของคาน	44
3.2	ลักษณะหน้าตัดรูปรางน้ำของคานประกอบ FRP ที่ใ้ในงานวิจัย	45
3.3	คานประกอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่ใ้ในงานวิจัย	46
3.4	แผนงานวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	47
3.5	ลักษณะจุดรองรับแบบ Pinned support.....	52
3.6	แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย	53
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C76×22×6 mm ความยาว 0.5 ถึง 2.0 m.....	58
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C76×22×6 mm ความยาว 2.5 ถึง 4.0 m.....	58
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C102×29×6 mm ความยาว 0.7 ถึง 2.5 m.....	59
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m.....	59
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C152×43×10 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m.....	60
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน ของตัวอย่างขนาด 2C152×43×10 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m.....	60
4.7	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$	61
4.8	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$	61
4.9	รูปร่างการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ	62
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาว ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C76×22×6 mm.....	66
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาว ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C102×29×6 mm.....	67
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาว ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C152×43×10 mm.....	67
4.13	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ความยาว 0.5 ถึง 2.0 m.....	68
4.14	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกระยะการแอนตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ความยาว 2.5 ถึง 4.0 m.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ความยาว 0.7 ถึง 2.5 m 69
4.16	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m 70
4.17	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m 70
4.18	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m 71
4.19	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm 74
4.20	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm 75
4.21	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm 75
4.22	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ที่มีค่า $R = 0.4$ 76 ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ที่มีค่า $R = 0.4$ 77
4.24	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ที่มีค่า $R = 0.4$ 77
4.25	อัตราส่วนระหว่าง ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) และจำนวนจุดเชื่อมต่อ 78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ระยะห่างระหว่างแรงกระทำและจุดรองรับ
A	=	พื้นที่หน้าตัด
A_w	=	พื้นที่หน้าตัดของเอว
b_c	=	ความกว้างปีกลบด้วยความหนาของปีก ($b_f - t_f$)
b_f	=	ความกว้างของปีก
c	=	ระยะที่วัดจากแกนสะเทินถึงผิวด้านบนหรือผิวด้านล่างของคาน
C_b	=	สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ
C_w	=	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด
d	=	ความลึกของหน้าตัด
E	=	โมดูลัสยืดหยุ่น
E_L	=	โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนของเส้นใย
EI	=	Flexural rigidity
f_b	=	หน่วยแรงคัด
F_b	=	หน่วยแรงคัดที่ยอมให้
F_y	=	หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ
F_{yf}	=	หน่วยแรงครากของปีก
F_{yw}	=	หน่วยแรงครากของเอว
G	=	โมดูลัสแรงเฉือน
G_{LT}	=	โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ
$G_{LT(\text{web})}$	=	โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของเอว
I	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน
I_x	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนหลัก
I_y	=	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
J	=	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด
K	=	ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการ แอนตัวในแนวตั้ง
k_{tim}	=	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

KAG	=	Transverse shear rigidity
L	=	ความยาวคาน
L_b	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้าง (สำหรับวิธี LRFD)
L_r	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินเลาสติก
L_p	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$
L_{pd}	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก
L/d	=	อัตราส่วนความยาวต่อความลึก
M	=	โมเมนต์ค้ำครอบแกนสะเทิน
M_A	=	โมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน
M_B	=	โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน
M_C	=	โมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน
M_{cr}	=	โมเมนต์โก่งเดาะ หรือ โมเมนต์วิกฤต
$M_{cr,EXP}$	=	โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ
$M_{cr,LRFD}$	=	โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD
M_{max}	=	โมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวที่ปราศจากการยึดครั้ง
M_n	=	กำลังโมเมนต์ระบุ
M_p	=	โมเมนต์พลาสติก
M_r	=	โมเมนต์สูงสุดในช่วงอินเลาสติก
M_u	=	โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว
M_y	=	โมเมนต์ค้ำที่จุดคราก
$P_{cr,A}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง A
$P_{cr,B}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง B
$P_{cr,EXP}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ
$P_{cr,FEA}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
R	=	reduction factor
r_y	=	รัศมีไจเรชั่นรอบแกนรอง
S	=	โมดูลัสหน้าตัด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

t_f	=	ความหนาของปีก
t_w	=	ความหนาของเอว
u_x	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x
u_y	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y
u_z	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z
W	=	น้ำหนักบรรทุกใช้งาน
Z_x	=	โมดูลัสพลาสติก
Δ	=	ระยะการแอ่นตัว
Δ_{allow}	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้
Δ_{max}	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุด
x_i	=	ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก
r	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะ ของจุดรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงคัต
s	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะ ของจุดรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน
x	=	ความเครียดเฉือน
$\} _w$	=	ค่าสัดส่วนความขรุขระของเอวคาน
$\} _f$	=	ค่าสัดส่วนความขรุขระของปีกคาน
$"_x$	=	การหมุนรอบทิศทางแกน x
$"_y$	=	การหมุนรอบทิศทางแกน y
$"_z$	=	การหมุนรอบทิศทางแกน z
w	=	ตัวคูณความต้านทาน (สำหรับองค์อาคารรับแรงคัต $w = 0.90$)
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 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการนำเหล็กรูปพรรณหรือเหล็กโครงสร้าง (Structural Steel) มาใช้กันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนของ โครงสร้างหลัก (primary structural member) และชิ้นส่วนของ โครงสร้างรอง (secondary structural member) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหนือวัสดุก่อสร้างอื่นๆ หลายประการ ได้แก่ อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) ความเหนียว (ductility) และความแกร่ง (toughness) ที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตาม โครงสร้างเหล็กยังมีจุดด้อยอยู่บางประการ อย่างเช่น โครงสร้างเหล็กที่ตั้งอยู่แถบชายฝั่งทะเลหรือพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งมักประสบ ปัญหาอย่างมากเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องมาจากการเกิดสนิม ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.1 ทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงมีการใช้เหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี (galvanized steel) และการเคลือบกันสนิม (anti-corrosion paint) กับ โครงสร้างเหล็ก ซึ่งก่อนนี้ให้เกิดค่าใช้จ่ายในการ บำรุงรักษาและซ่อมแซม (repair and maintenance) ตามมาอีกมาก



รูปที่ 1.1 สภาวะกัดกร่อนเนื่องจากสนิมในโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

สำหรับงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ ส่วนหนึ่งของหน้าตัด (section) เหล็กที่นิยมใช้ในการรับแรงคดของโครงสร้าง คือ เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำ (channel section) โดยนำมาประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โครงค้ำยัน (bracing) โครงสร้างแป (purlin) โครงผนังค้ำยัน (wall stud) และชิ้นส่วนในระบบโครงข้อหมุน (truss system) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

ที่ผ่านมานักวิจัยในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้พยายามวิจัยค้นหาวัสดุก่อสร้างที่นำมาทดแทนเหล็กรูปพรรณ สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างใหม่ รวมถึงการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างเดิมที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1940 ได้มีการค้นพบวัสดุประกอบ (composite material) ประเภทหนึ่งเรียกว่า พลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic; FRP) โดยวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานการกัดกร่อนเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ (Bank, 2006) อีกทั้งยังได้เปรียบเหล็กในอีกหลายด้านเช่นกำลังต่อน้ำหนัก การบำรุงรักษา และต้นทุนในการก่อสร้าง

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาพลาสติกเสริมเส้นใยหลากหลายแบบ อาทิเช่น พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber-reinforced plastic; CFRP) หรือวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic; GFRP) ซึ่งมักผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) วัสดุ PFRP นี้ได้ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างบางประเภท อาทิเช่น โครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่ง ได้แก่ แท่นขุดเจาะน้ำมัน ท่าเรือ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โครงสร้าง

ที่มีการคัดกรองสูง ได้แก่ หอทำความเย็น (cooling tower) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โรงงานอุตสาหกรรมเคมี รวมทั้งโครงสร้างในบริเวณพื้นที่ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ไม่อำนวย เช่น พื้นที่ๆ เป็นภูเขา ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา อาทิเช่น หอสอง สะพาน ราวระเบียงและรั้วกันตกต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.5 เป็นต้น (Creative Pultrusion, 2004)



รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับแทนจุดเจาะน้ำมัน (Fibergrate, 2005)



รูปที่ 1.4 การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับหอทำความเย็น (Creative Pultrusions, 2004)



รูปที่ 1.5 การใช้วัสดุ FRP สำหรับสะพานข้ามทางรถไฟ (Pedelta Structural Engineers, 2010)

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่นิยมใช้ในต่างประเทศ ได้อ้างอิงมาตรฐานการออกแบบ 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 มาตรฐานการออกแบบดังกล่าวไม่ได้เน้นหรือเจาะจงสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หากแต่กล่าวถึง ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ข้อควรปฏิบัติ และข้อกำหนดด้านการใช้งาน สำหรับโครงสร้างพลาสติกและวัสดุประกอบ โพลีเมอร์โดยรวมเท่านั้น (Bank, 2006) นอกเหนือจากมาตรฐานการออกแบบที่กล่าวมา ยังมีคู่มือการออกแบบ (design manual) ที่ทางบริษัทผู้ผลิต (manufacturer) ในต่างประเทศได้พัฒนาขึ้น อาทิเช่น บริษัท Strongwell Corporation (2002), Fiberline Composites (2003), Creative Pultrusion (2004) และ Bedford (2005) เป็นต้น ซึ่งได้จากการค้นคว้าและพัฒนาของแต่ละบริษัท อยู่ในรูปของสมการและตารางออกแบบ (load design table) หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการและตารางออกแบบดังกล่าวจะเฉพาะเจาะจงสำหรับวัสดุ FRP ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทผู้ผลิตนั้นๆเท่านั้น

สำหรับประเทศไทยวัสดุ FRP ยังคงเป็นวัสดุใหม่ที่ยังไม่นิยมและรู้จักมากนัก ภายในประเทศ เนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ เช่น

- 1) ขาดแคลนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านต่างๆ ของวัสดุ FRP
- 2) ขาดแคลนความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมทางกล (mechanical properties) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP
- 3) ขาดแคลนวิธีการออกแบบ และสมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่ได้มาตรฐาน ภายใต้การกระทำของน้ำหนักบรรทุก และจุดรองรับในลักษณะต่างๆ
- 4) งานวิจัยและผลงานทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ FRP ภายในประเทศยังคงมีน้อยมากเมื่อเทียบกับต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด โดยมีสถานะของจุดรองรับแบบ Pined-Pined
- 1.2.2) เพื่อพัฒนาสมการสำหรับการออกแบบคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัดที่ได้มาตรฐาน

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

- 1.3.1) ในงานวิจัยนี้วัสดุ CFRP ถูกพิจารณาเป็นวัสดุเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (homogenous) และเป็นวัสดุออร์ทอทรอปิก (orthotropic material) กฎของฮุก (Hooke's law) จึงสามารถใช้ได้ โดยพิจารณาทิศทางของแนวแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานตามทิศทางที่พิจารณา
- 1.3.2) พฤติกรรมของวัสดุ CFRP ในช่วงการโก่งเคาะ (buckling) อยู่ในช่วงเชิงเส้นโดยความเครียดภายในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมาก (infinitesimal strain) ไม่เกิน 10 เท่าของพิสัยสัดส่วน (proportional limit)
- 1.3.3) สำหรับการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น (linear) กำหนดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นส่วนมีค่าน้อยกว่า 1/100 ของความยาวของชิ้นส่วน (small displacement) และความเครียดในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมากไม่เกิน 10 เท่าของพิสัยสัดส่วน
- 1.3.4) สำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) กำหนดให้ค่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของชิ้นส่วนมีค่าอยู่ในช่วง 1/100 ถึง 1/10 เท่าของความยาวชิ้นส่วน (moderately displacement) แต่ความเครียดในเนื้อวัสดุมีค่ามากกว่า 10 เท่าของพิสัยสัดส่วน

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber reinforced plastic, GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFPR) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ
- 1.4.2) วัสดุ PFPR ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย ใยแก้ว (fiber) ชนิด E-glass และเรซิน (resin) ชนิด โพลีเอสเตอร์ (polyester)
- 1.4.3) ชนิดของจุดรองรับที่ใช้เป็นแบบ Pinned-Pinned supports เท่านั้น
- 1.4.4) ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ขนาดของหน้าตัด (cross section) ความยาวของคานที่ไม่มีค้ำยันข้าง (laterally unbraced length) และระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ (connector spacing) โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ เช่น เฟอร์เซ็นของเส้นใยแก้ว ชนิดเรซิน สารผสมเพิ่ม (additive) และกรรมวิธีการผลิตของตัวอย่างทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเท่าที่สามารถทำได้
- 1.4.5) วัสดุ PFPR หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่ใช้ มี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ 2C76×22×6, 2C102×29×6 และ 2C152×43×10 mm

1.4.6) ความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (dimensional tolerance) คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ อ้างอิงจากเอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติเรื่องพฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพลาทูด ที่ผลิตได้ในประเทศไทยภายใต้การอัด การเนียน และการตัด

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1) เข้าใจพฤติกรรมการรับแรงคัตของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ ภายใต้สภาวะของจตุรรองรับแบบ Pinned-Pinned
- 1.5.2) ได้รับสมการออกแบบมาตรฐาน (standard design equation) และขั้นตอนสำหรับการออกแบบ (design procedure) คาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำภายใต้แรงคัตที่ถูกต้อง เหมาะสม และปลอดภัย
- 1.5.3) ส่งเสริมให้มีการใช้งานวัสดุ PFRP สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างภายในประเทศ ทำให้มีการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อตอบสนองความต้องการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการออกแบบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ
- 1.5.4) สามารถนำผลงานวิจัยนี้ เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาและทำการวิจัยในเรื่องที่เกี่ยวกับวัสดุ PFRP ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ได้รับความนิยมสำหรับงานโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา คือ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic, GRFP) ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยวิธี Pultrusion หรือ Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของวัตถุดิบ (raw material) ที่นำมาใช้ผลิต ดังนั้นก่อนที่จะเข้าใจคุณสมบัติโดยรวมของ วัสดุ PFRP จำเป็นต้องทราบและเข้าใจถึงลักษณะและคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต รวมถึงขั้นตอนกระบวนการผลิตวัสดุ PFRP ที่ได้มาตรฐานเสียก่อน

ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP ประวัติความเป็นมาและการใช้งาน วัตถุดิบ ส่วนประกอบ และกระบวนการผลิตวัสดุ PFRP โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อเป็นการทำความเข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึง การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณและวัสดุ PFRP ภายใต้แรงคด รวมทั้งบททวนงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีส่วน คล้ายคลึงกับงานวิจัยที่กำลังศึกษา ตลอดจนการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงคดภายใต้สูตรรองรับ แบบ Pinned-Pinned ของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยสมการคำนวณทางทฤษฎี

2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP

วัสดุ PFRP เป็นวัสดุประกอบ (composite material) ที่ผลิตขึ้นจากวัสดุสองชนิด ขึ้นไป โดยคุณสมบัติของวัสดุใหม่จะมีความแตกต่างจากวัสดุเดิมที่นำมาผลิต ส่วนคุณสมบัติทาง กายภาพและทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดยังเหมือนเดิม (Jones, 1975) โดยทั่วไปวัสดุประกอบนิยม ใช้เส้นใย (fiber) ที่มีกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสสูงเป็นวัสดุหลักในการรับแรงดึง (reinforcement) และใช้เรซิน (resin) เป็นวัสดุเชื่อมประสานโดยขึ้นรูปเป็นหน้าตัดรูปต่างๆ วัสดุพลาสติกเสริมเส้น ใยสามารถแบ่งแยกออกได้เป็นหลายประเภท ตามวัตถุดิบที่นำมาผสม ทิศทางการวางตัวของเส้นใย และวิธีการขึ้นรูป

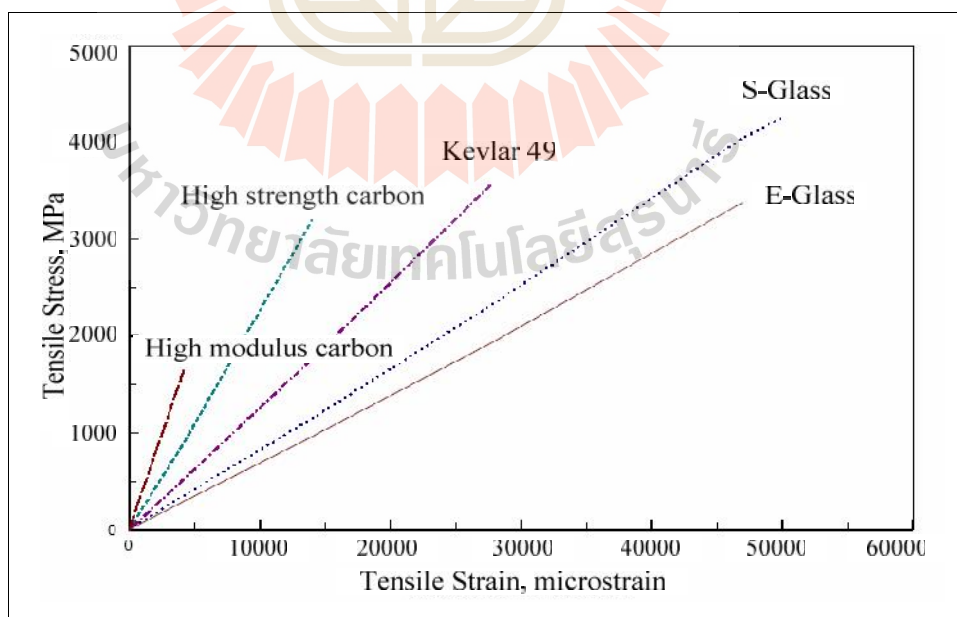
ทิศทางการวางตัวของเส้นใยมีผลอย่างมากต่อกำลังของวัสดุ PFRP ดังนั้นควรคำนึงถึง ลักษณะการใช้งานของวัสดุ ซึ่งทิศทางการวางตัวของเส้นใยนั้นสามารถควบคุมได้โดยวิธีการขึ้นรูป

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

2.2.2 ส่วนประกอบหลักของวัสดุ CFRP

2.2.2.1 เส้นใยแก้ว (fiber)

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยจะมีเส้นใยแก้วเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 45-75% โดยน้ำหนัก (Creative Pultrusion, 2004) ซึ่งเส้นใยแก้วเป็นวัสดุที่มีกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสสูงถูกใช้เป็นวัสดุหลักในการรับแรง (reinforcement) ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือกราไฟต์ (graphite) เส้นใยอาราไมด์ (aramid fiber) หรือเคฟลาร์ (Kevlar) และเส้นใยโบรอน (boron fiber) เป็นต้น (Agarwal, Broutman และ Chandrashekara, 2006) รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ เส้นใยมีกำลังรับแรงดึงที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็ก นอกจากนี้ เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟลาร์ มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยมีความเหนียว (ductility) ที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการผลิต วัสดุ CFRP นิยมใช้เส้นใยแก้วเป็นวัสดุรับแรง เนื่องจากเหมาะสมสำหรับการใช้งานหลายประเภท รวมทั้งมีราคาต่ำกว่าเส้นใยประเภทอื่น (Fibreforce, 2002) โดยส่วนใหญ่เส้นใยแก้วถูกนำมาใช้มากกว่า 90 % ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (Creative Pultrusion, 2004)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่างๆ

(Daniel and Isahi, 1994)

เส้นใยแก้วจะผลิตมาจากการหลอมส่วนผสมประกอบต่างๆเข้าด้วยกัน ได้แก่ ซิลิกา (SiO₂) เป็นส่วนประกอบหลัก หินปูน (limestone) กรดบอริก (boric acid) ดินเหนียว (clay) ถ่านหิน (coal) และเฟลสปาร์ (fluorspar) ออกไซด์ของอลูมิเนียมและแคลเซียม เป็นต้น ที่อุณหภูมิประมาณ 1,300 °C ส่วนผสมที่หลอมเหลวจะถูกดันผ่านช่องเล็ก ๆ แล้วทำให้เย็นโดยปล่อยให้ ชนิดของเส้นใยแก้วที่มีการผลิต ได้แก่ E-glass, S-glass, C-glass, A-glass, D-glass, L-glass และ M-glass เส้นใยแก้วจะมีกำลังรับแรงดึงสูง ทนทานต่อสารเคมีและไม่ดูดความชื้น เส้นใยแก้วที่นิยมใช้ในทางการค้าจะมีอยู่ 4 ชนิดได้แก่

- 1) E-glass คือ ใยแก้วที่มีคุณสมบัติคือ เส้นใยแก้วที่มีอัลคาไลน์ต่ำ (aluminum borosilicate) มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนไฟฟ้า
- 2) S-glass คือ ใยแก้วที่มีกำลังและโมดูลัสสูง
- 3) C-glass คือ ใยแก้วที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (corrosion resistance)
- 4) A-glass (window glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ C-glass ส่วนมากนิยมใช้ทำวัสดุผิวนอก (surface veil) โดยผสมกับเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์

ชนิดของใยแก้วที่มีการนำมาใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยชามากที่สุดคือ E-glass คุณสมบัติของ E-glass ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

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

คุณสมบัติ	E-glass
ความหนาแน่น (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) และค่าโมดูลัสแรงอัด (compressive modulus)
- 3) กำลังต้านทานการล้า (fatigue strength) และการคืบ (creep)
- 4) กำลังรับแรงกระแทก (impact strength) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy absorption)
- 5) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
- 6) การนำไฟฟ้าและการนำความร้อน (electric and thermal conductivity)

2.2.2.2 เรซิน (resin)

เรซินเป็นวัสดุโพลีเมอร์พลาสติกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสาน (binder) ส่งถ่ายแรงระหว่างเส้นใย และป้องกันเส้นใยจากการกัดกร่อนทางเคมีและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ดังนั้นเรซินที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เข้ากันได้กับเส้นใยแก้ว โดยทั่วไปเรซินที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุ FRP มี 2 ประเภท คือ Thermoplastics และ Thermosetting plastics (Kelly and Zweben, 2000) โดยความแตกต่างของเรซินทั้ง 2 ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของเรซิน (Seymour, 1987)

Thermoplastics คือ พลาสติกที่โครงสร้างภายในปราศจากจุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นโมเลกุล (non-cross linked) โมเลกุลของพลาสติกยึดติดกันโดยพันธะ van der Waals (Schwartz, 1997) ทำให้พลาสติกชนิดนี้สามารถอ่อนตัวได้เมื่อโดนความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลงตลอดจนเรซินชนิดนี้มีกำลังรับแรงต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งไม่นิยมนำมาใช้งานในด้านการรับแรงเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่เสถียร (unstable) Thermoplastics ที่ใช้ในการผลิตวัสดุ FRP ได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีสไตรีน และโพลีเอทิลีน เป็นต้น

Thermosetting plastics คือ พลาสติกที่เกิดปฏิกิริยาเคมีจนกระทั่งโครงสร้างภายในเกิดการเชื่อมต่อระหว่างเส้นโมเลกุล (cross linked) โดยพันธะ Covalent ในโครงข่ายสามมิติที่มีความแข็งแรง (Bank, 2006) ส่งผลให้ Thermosetting plastics มีคุณสมบัติที่เสถียร (stable) กว่า Thermoplastics และไม่อ่อนตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น Thermosetting plastics ที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุ FRP ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ อีพ็อกซี โพลียูรีเทน และฟีนอลิก เป็นต้น

เรซินที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุ FRP ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ ไวนิลเอสเตอร์ และอีพ็อกซี ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

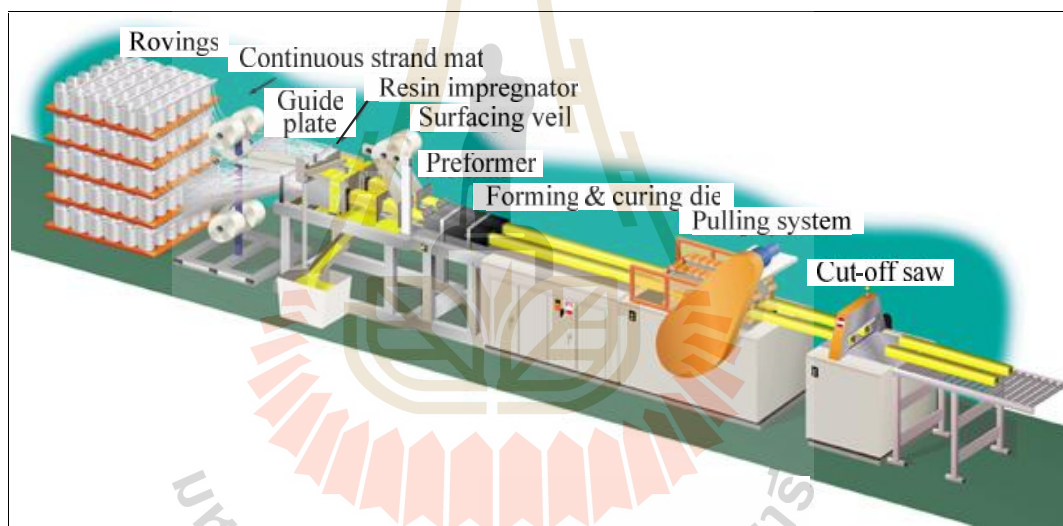
(Daniel and Isahi, 1994)

คุณสมบัติ	โพลีเอสเตอร์ (Polyester)	ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylester)
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1130	1120
กำลังรับแรงดึง (MPa)	77.28	81.42
โมดูลัสแรงดึง (GPa)	3.24	3.38
กำลังรับแรงดัด (MPa)	122.82	133.86
โมดูลัสแรงดัด (GPa)	3.18	3.10
โมดูลัสแรงเฉือน (GPa)	1.17	1.28
อัตราส่วนปัวซอง	0.35	0.33
เปอร์เซ็นต์การยึดตัว (%)	4.2	4.5
ความแข็งบาร์โคล	40	30-38

2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ FRP

วิธีการผลิตพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ได้รับความนิยม คือ วิธี Pultrusion เนื่องจากการผลิตโดยวิธีนี้ได้ชิ้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอ ตรงยาวและต่อเนื่องในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง (Bakis *et al.*, 2002) รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion ขั้นตอนการผลิตโดยวิธี pultrusion เริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น (continuous strand roving) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่

อ่างอาบเรซิน (resin impregnator) เพื่อให้เส้นใยแก้วอุ่มตัวด้วยเรซิน (wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วแบบต่อเนื่องแบบสาน (continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงในแนวขวาง (transverse properties) ให้กับวัสดุ FRP จากนั้น ใส่แผ่นวัสดุผิววนอกรวมเข้ากับเส้นใยแก้วที่อุ่มตัวด้วยพลาสติก 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, 2004 และ Fiberline, 2003)



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

(Creative Pultrusion, 2004)

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



รูปที่ 2.3 หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion
(Creative Pultrusions, Inc., 2004)

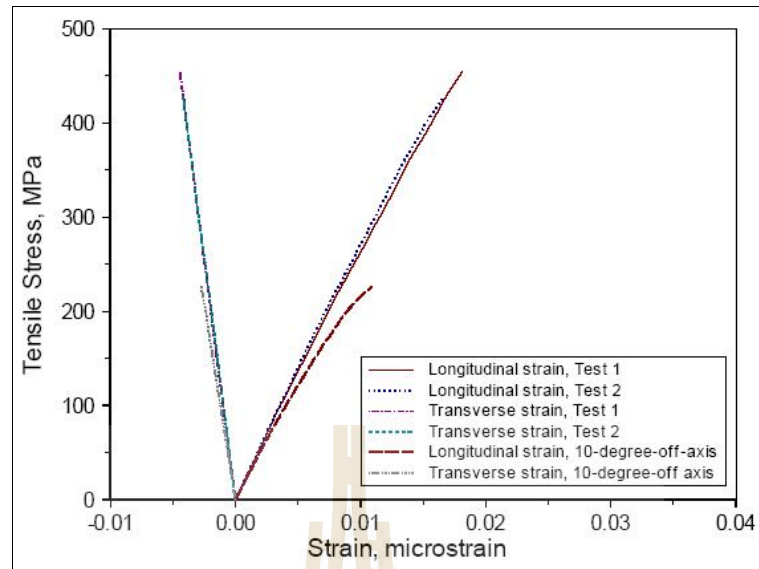
2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ FRP

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) กล่าวว่า คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น ชนิดและปริมาณของใยแก้ว ชนิดและส่วนผสมของเรซิน เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษาคูสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณ (structural steel) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดทั้งในแนวขนานกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (lengthwise; LW) และในแนวขวางกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (crosswise; CW) การตัดใช้เครื่องตัดหัวเพชรเพื่อลดผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมของวัสดุ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น การทดสอบแรงดึง (ASTM D 3039-95) การทดสอบแรงอัด (ASTM D 695-95) การทดสอบแรงดัด (ASTM D 790-92) และการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบ (ASTM D 2344-95) ได้สรุปผลการทดสอบตามตารางที่ 2.2 พบว่า หน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ FRP มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ และมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็กรูปพรรณ 40.8% แต่หน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ FRP มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ 22.9% ในทิศทาง LW และ 64.2% ในทิศทาง CW นอกจากนี้ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ FRP ในทิศทาง LW มีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 7 เท่า และ 26 เท่าในทิศทาง CW ยกเว้นโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดในทิศทาง LW ของวัสดุ FRP จะมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 15 เท่า จากการที่วัสดุ FRP มีหน่วยแรงดัดประลัยที่ค่อนข้างสูง แต่ในทางตรงกันข้ามกลับมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การเสีรูปร่างเนื่องจากการแอ่นตัว

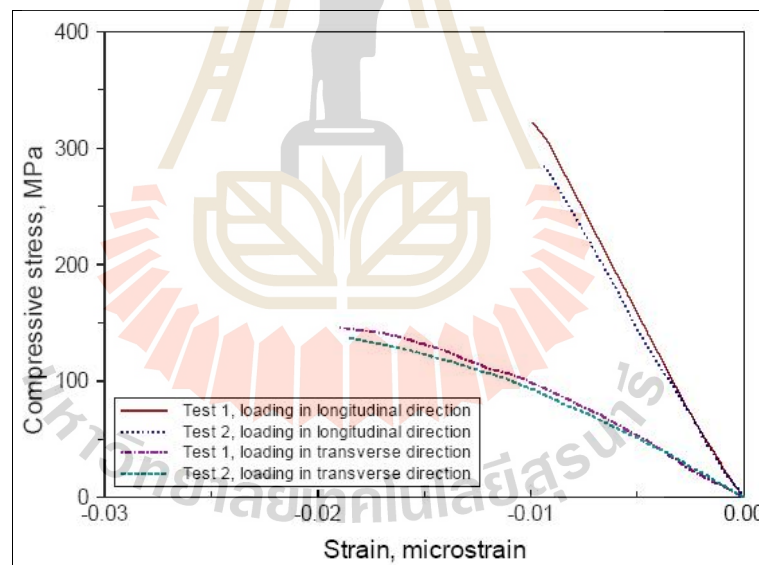
(deflection) ของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ CFRP กับเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่าวัสดุ CFRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กรูปพรรณประมาณ 5.3 เท่า ดังนั้น ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP ควรมีการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนทุกครั้ง

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

คุณสมบัติทางกล	วัสดุ CFRP	เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36
หน่วยแรงดึงประลัย, LW	445.2 MPa	$f_y = 250 \text{ MPa}$ ($f_u = 400 \text{ MPa}$)
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง, LW	26.26 GPa	200 GPa
หน่วยแรงอัดประลัย, LW	308.46 MPa	$f_y = 250 \text{ MPa}$ ($f_u = 400 \text{ MPa}$)
หน่วยแรงอัดประลัย, CW	143.33 MPa	$f_y = 250 \text{ MPa}$ ($f_u = 400 \text{ MPa}$)
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 ³	7852 kg/m ³



(a) การทดสอบกำลังรับแรงดึง



(b) การทดสอบกำลังรับแรงอัด

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ PFRP
(สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

จากรูปที่ 2.4 พบว่า วัสดุ FRFP เป็นวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) จนเกือบถึงจุดวิบัติ และการวิบัติของวัสดุเป็นแบบแตกหักกะทันหัน (immediate failure) อย่างไรก็ตาม วัสดุชนิดนี้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ โดยความเครียดที่จุดวิบัติมีค่ามากกว่า 0.010 mm/mm

นอกจากนั้น อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (E) ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือน (G) ของวัสดุ FRFP และเหล็กรูปพรรณมีค่าเท่ากับ 4.05 และ 2.67 ตามลำดับ ดังนั้นการแอ่นตัวของโครงสร้าง FRFP จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือนมากกว่าการแอ่นตัวของโครงสร้างเหล็ก และโมดูลัสยืดหยุ่นเฉือนของวัสดุ FRFP ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นกับอัตราส่วนปัวซอง (ν) ในรูปของสมการ $G = E / 2(1 + \nu)$ ดังเช่นที่ใช้ในกรณีเหล็กรูปพรรณ สำหรับการเปรียบเทียบความหนาแน่นของวัสดุทั้งสอง พบว่า วัสดุ FRFP เบากว่าเหล็กรูปพรรณประมาณ 4.2 เท่า ทำให้การก่อสร้างโครงสร้าง FRFP มีความสะดวกกว่าโครงสร้างเหล็กเป็นอย่างมาก นอกจากนี้อัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักของวัสดุ FRFP มีค่ามากกว่าของโครงสร้างเหล็กถึง 4.5 เท่า

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2549) ได้ทำการทดสอบวัสดุ FRFP หน้าตัดรูปตัวซีที่ผลิตในประเทศไทย โดยได้ทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง คุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRFP 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 และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลของวัสดุ FRFP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 โดยคุณสมบัติพื้นฐานจะใช้มาตรฐาน ASTM C 3917 โดยแสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบในภาคผนวก จากการทดสอบและเปรียบเทียบพบว่าวัสดุ FRFP ที่นำมาทดสอบยังผลิตไม่ได้ตามมาตรฐานความคลาดเคลื่อนของรูปร่างตามมาตรฐาน ASTM C 3917 เนื่องจากวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต ในส่วนของความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะพบว่าวัสดุ FRFP ที่นำมาทดสอบมีค่าดังกล่าวสูงกว่าวัสดุ FRFP ที่ผลิตจากต่างประเทศของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 1.70% ทั้งสองค่าเนื่องจากมีปริมาณของเส้นใยแก้วสูงในขณะที่เมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่ามีค่าดังกล่าวน้อยกว่าอยู่ 75.06 % แต่วัสดุ FRFP เบากว่าเหล็กโครงสร้าง 4.00 เท่า การดูดซึมน้ำและความชื้นพบว่าการดูดซึมน้ำสูงสุด 0.74 % ซึ่งมากกว่าวัสดุ FRFP ที่ผลิตจากต่างประเทศของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 23.33 % แสดงว่าวัสดุ FRFP ที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้มีแนวโน้มที่จะมีความคงทนต่ำ สุดท้ายการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบพบว่า วัสดุ FRFP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในการทดสอบอยู่ในช่วงที่กำหนดของวัสดุ FRFP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. ในการทดสอบและเปรียบเทียบ

คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในการทดสอบกับวัสดุ FRP ที่ผลิตจากต่างประเทศโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้างตามมาตรฐาน ASTM A36 โดยแสดงผลการทดสอบและเปรียบเทียบในภาคผนวก จากการทดสอบและเปรียบเทียบพบว่า การทดสอบกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงขนานเส้นใยเฉลี่ยพบว่า หน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. แต่มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคดากของเหล็กโครงสร้าง 10.39 % โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่ามากกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. อยู่ 2.05 เท่า แต่มีค่าน้อยกว่าเหล็กโครงสร้าง 5.68 เท่า เนื่องจากใยแก้วมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าเรซินประมาณ 18.13 เท่า (Bank, 2006) ดังนั้นวัสดุ FRP จึงมีแนวโน้มในการมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูง ในส่วนของกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดขนานเส้นใยพบว่ามีค่าน้อยกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้าง เนื่องจากการรับแรงลักษณะแรงอัดขนานเส้นใยใยแก้วจะเกิดการโก่งคดและเรซินที่เป็นตัวรับแรงหลักมีคุณภาพต่ำ ในขณะที่การทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตั้งฉากเส้นใยเรซินยังคงทำหน้าที่รับแรงหลัก เนื่องจากเรซินที่ใช้ในการผลิตมีคุณภาพต่ำใยแก้วจะเกิดการเลื่อนได้ง่าย ทำให้ผลการทดสอบที่ได้ยังคงมีค่าน้อยกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. และเหล็กโครงสร้าง ในส่วนของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสแรงเฉือนขนานเส้นใยพบว่ามีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงคดากและโมดูลัสแรงเฉือนของเหล็กโครงสร้างอยู่ 70.18 % และ 34.37 เท่าตามลำดับ การที่วัสดุ FRP ที่นำมาทดสอบมีค่าดังกล่าวน้อยกว่าเนื่องจากความแตกต่างคุณสมบัติของวัสดุดิบที่นำมาผลิต ในการทดสอบกำลังรับแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดขนานเส้นใยพบว่าเป็นกรณีของการให้แรงทางแบนจะมีค่าดังกล่าวมากกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion, Inc. แต่ในเหล็กโครงสร้างจะมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดขนานเส้นใยน้อยกว่า

2.3 พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด

โดยทั่วไป คานมักมีหน้าตัด Wide-flange (W) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) หน้าตัดรูปรางน้ำ (channel) และหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (box section) เป็นต้น คานหน้าตัด Wide-flange เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดที่สุด เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวมีพื้นที่ในส่วนของปีก (flange) มากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่งผลให้หน้าตัด Wide-flange มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment of inertia) ต่อพื้นที่หน้าตัดมากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่วนคานหน้าตัดรูปรางน้ำ มักถูกใช้เป็นคานเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าไม่มากนัก เช่น โครงสร้างแป เป็นต้น เนื่องจากหน้าตัดมีความต้านทานต่อการโก่งตัวทางด้านข้างต่ำ นอกจากนั้น คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดอีกรูปแบบหนึ่ง

ซึ่งหน้าตัดดังกล่าวมีความสามารถต้านทานต่อแรงดัดและแรงบิดได้ดี (Gaylord Jr., Gaylord และ Stallmeyer, 1992)

พิจารณาคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งถูกกระทำโดยโมเมนต์ดัด M รอบแกนสะเทิน (neutral axis) ของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อคานมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก (small displacement) หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายแบบเส้นตรงจากศูนย์ที่แกนสะเทินจนมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.5(a) หน่วยแรงดัด (flexural stress, f_b) สูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานหาได้จากสมการการดัด (flexural formula)

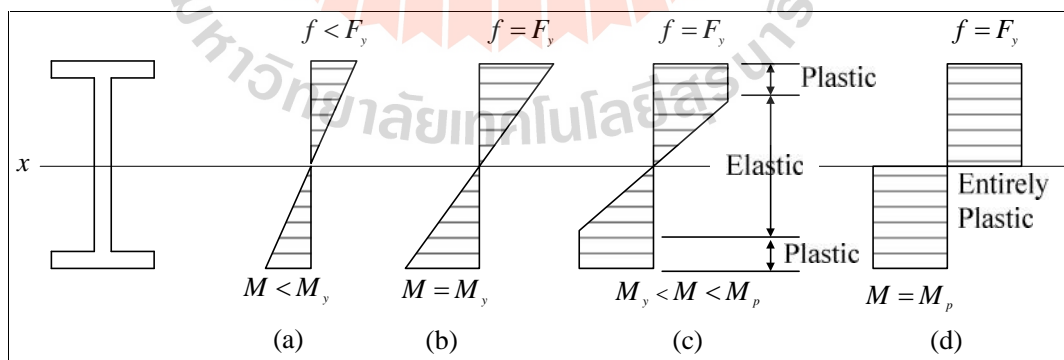
$$f_b = \frac{Mc}{I} \tag{2.1}$$

โดยที่ c คือ ระยะที่วัดจากแกนสะเทินถึงผิวด้านบนหรือผิวด้านล่างของคาน

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน

โดยทั่วไป อัตราส่วน I/c ของหน้าตัดคานแต่ละขนาด จะมีค่าคงที่ เรียกว่า Section modulus (S) ดังนั้น หน่วยแรงดัดสามารถหาได้จากสมการ

$$f_b = \frac{M}{S} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.5 หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน (Salmon และ Johnson, 1996)

เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงดัดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคานจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากของวัสดุ และการกระจายของหน่วยแรงดัดยังคงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.5(b) ค่าโมเมนต์ดัดที่จุดนี้เรียกว่า โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (yield moment, M_y) และถ้าให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ผิวด้านบนสุดและล่างสุดที่มีหน่วยแรงดัดเท่ากับโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ยังคงรับหน่วยแรงเท่าเดิม โดยที่หน่วยแรงดัดที่เพิ่มขึ้นจะถูกต้านทานโดยส่วนของหน้าตัดที่อยู่ใกล้แกนสะเทินมากขึ้น และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดคานมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงครากมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5(c) สุดท้ายทุกตำแหน่งบนหน้าตัดคานจะมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงคราก ซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า Plastic hinge ดังแสดงในรูปที่ 2.5(d) และหน้าตัดของคานดังกล่าวไม่มีความสามารถในการต้านทานต่อโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอีก ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิด Plastic hinge เรียกว่า โมเมนต์พลาสติก (plastic moment, M_p)

2.3.1 การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณโดยวิธี AISC/LRFD

AISC ได้เสนอวิธีคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design, LRFD) เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการคำนวณออกแบบโครงสร้างเหล็กนอกเหนือจากวิธี ASD ซึ่งนิยมใช้กันมาในอดีต (AISC 350, 1999) วิธี AISC/LRFD มีหลักการและขั้นตอนในการออกแบบคล้ายคลึงกับวิธีกำลังประลัย (ultimate strength design, USD) ที่ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย ACI (American Concrete Institute) โดยทั่วไปโครงสร้างเหล็กที่ออกแบบด้วยวิธี AISC/LRFD จะประหยัดกว่าที่ออกแบบด้วยวิธี ASD โดยมีค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกัน

มาตรฐาน AISC/LRFD เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สถานะจำกัด (limit state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ภายใต้สถานะจำกัดนี้กำหนดให้ค่าแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานระบุขององค์อาคารกับตัวคูณความต้านทาน (resistance factor) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum x_i Q_i \leq \phi R_n \quad (2.3)$$

สำหรับองค์อาคารรับแรงดัดกำหนดให้ $M_u = \sum x_i Q_i$ และ $M_n = R_n$ จากสมการที่ (2.3) จะได้

$$M_u \leq \phi M_n \quad (2.4)$$

โดยที่ Q_i	คือ	แรงต่างๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เช่น โมเมนต์ แรงเฉือน เป็นต้น หรือ จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร แรงลม เป็นต้น ค่าแรงต่างๆ สามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกเช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในวิธี AISC/ASD
x_i	คือ	ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก
w	คือ	ตัวคูณความต้านทาน (สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด $w = 0.90$)
R_n	คือ	ความต้านทานระบุ (nominal resistance)
M_u	คือ	โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored service moment)
M_n	คือ	กำลังโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength)

สมการที่ (2.4) กล่าวได้ว่า โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว ซึ่งได้จากการวิเคราะห์คานภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับตัวคูณน้ำหนักบรรทุก ($M_u = \sum x_i Q_i$) ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังรับโมเมนต์ของคาน ซึ่งคำนวณจากกำลังโมเมนต์ระบุคูณกับตัวคูณลดความต้านทาน

มาตรฐาน AISC/LRFD ได้จำแนกประเภทองค์อาคารเหล็กรูปพรรณออกเป็นประเภท หน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด โดยใช้อัตราส่วนความกว้างปีกต่อความหนาปีก (b_f / t_f) และอัตราส่วนความลึกของหน้าตัดต่อความหนาเว (d / t_w) เป็นเกณฑ์ ซึ่งสามารถจำแนกโดยอัตราส่วนดังนี้

ถ้า $\lambda \leq \lambda_p$ และปีกคานเชื่อมต่อกับเวตตลอดความยาวคาน ถือเป็นหน้าตัดอัดแน่น

ถ้า $\lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่น

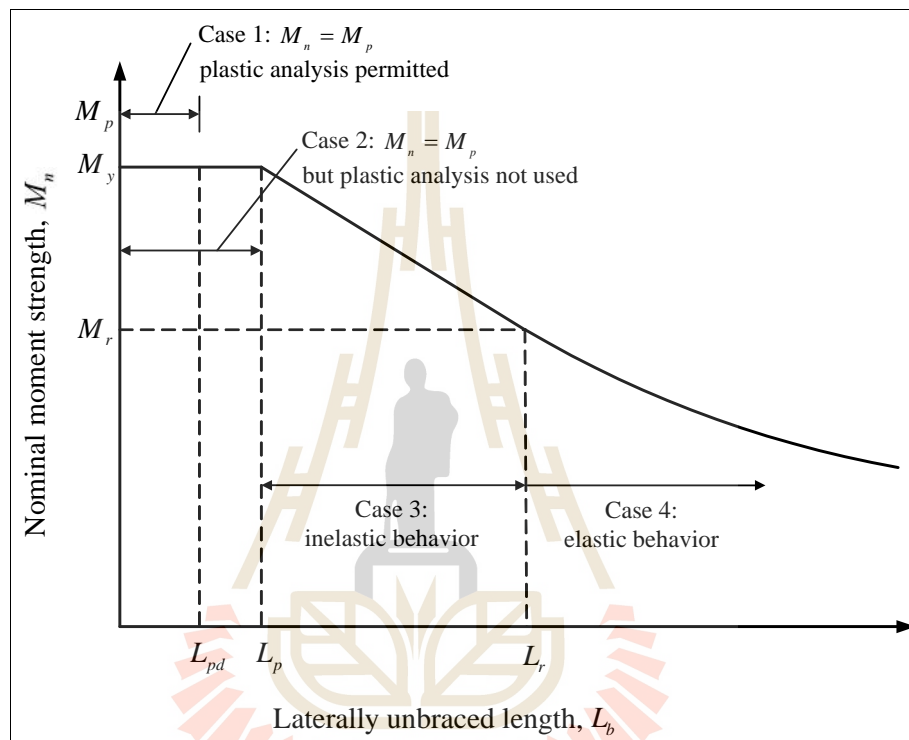
ถ้า $\lambda > \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนระหว่างความกว้างปีกต่อความหนาปีกของหน้าตัดรูปร่างสำหรับจำแนกประเภทคานเหล็กรูปพรรณ

ตารางที่ 2.4 ขีดจำกัดของอัตราส่วน b/t (AISC 350, 1999)

ชิ้นส่วน	อัตราส่วน ()	b/t (AISC/LRFD)	
		หน้าตัดอัดแน่น (λ_p)	หน้าตัดไม่อัดแน่น (λ_r)
ปีกของหน้าตัดปีกกว้าง และ หน้าตัดรูปร่างรับแรงดัด	$b_f / 2t_f$	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.83\sqrt{E/F_y}$
เวคานรับแรงดัด	d / t_w	$3.76\sqrt{E/F_y}$	$5.70\sqrt{E/F_y}$

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน โดยไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกหรือเอว มาตรฐาน AISC/LRFD ได้ใช้รูปที่ 2.6 เป็นเกณฑ์ในการจำแนกพฤติกรรมของคานเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังโมเมนต์ระบุดังนี้



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน (Salmon และ Johnson, 1996)

2.3.1.1 คานหน้าตัดอัดแน่น

เป็นคานซึ่งมีชิ้นส่วนของปีกและเอวมี่ค่า $\lambda \leq \lambda_p$ และปีกคานเชื่อมต่อกับเอวตลอดความยาวคาน กำลังโมเมนต์ระบุของคานหน้าตัดอัดแน่น สามารถหาได้ดังนี้

- 1) เมื่อ $L_b \leq L_{pd}$ และเกิดการหมุนได้มาก

ในกรณีนี้สามารถออกแบบคานด้วยวิธีพลาสติกได้ การวิบัติเกิดจากการครากตลอดของหน้าตัด มาตรฐาน AISC/LRFD กำหนดให้ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_{pd}$ ดังสมการที่ (2.5)

$$L_{pd} = [0.12 + 0.076(M_1 / M_2)](E / F_y)r_y \quad (2.5)$$

โดยที่	L_b	คือ	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน
	L_{pd}	คือ	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก
	r_y	คือ	รัศมีไจเรชั่นรอบแกนรอง
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ
	F_y	คือ	หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ

กำลังโมเมนต์ระดับ (M_n) ของคานหน้าตัดอัดแน่น เมื่อความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_{pd}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$M_n = M_p \quad (2.6)$$

โดยที่ M_p คือ โมเมนต์พลาสติก

2) เมื่อ $L_b \leq L_p$ และเกิดการหมุนได้น้อย

ในกรณีนี้สามารถทำการวิเคราะห์คานด้วยวิธีพลาสติก การวิบัติเกิดจากการครากตลอดของหน้าตัด AISC/LRFD กำหนดให้ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปร่างนี้ ดังนี้

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{E / F_y} \quad (2.7)$$

โดยที่ L_p คือ ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$

กำลังโมเมนต์ระดับ (M_n) ของคานหน้าตัดอัดแน่น เมื่อความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สามารถหาได้จากสมการ

$$M_n = M_p \quad (2.8)$$

เมื่อ $M_p = Z_x F_y$ (2.9)

โดยที่ Z_x คือ โมดูลัสพลาสติก

3) เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$

ในกรณีนี้คานจะมีการบิดร้งด้านข้างที่ไม่เพียงพอ เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$ คานจะเกิดการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินอีลาสติก (inelastic lateral-torsional buckling, inelastic LTB) AISC/LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุของคานช่วงนี้แปรเปลี่ยนแบบเส้นตรงจาก M_r ถึง M_p ($M_r \leq M_n < M_p$) ดังสมการที่ (2.10)

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.10)$$

AISC/LRFD ได้กำหนดค่า M_r และ L_r สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และ รูปรงน้ำ ดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ตามลำดับ

$$M_r = F_L S_x \quad (2.11)$$

$$L_r = \frac{r_y X_1}{F_L} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 F_L^2}} \quad (2.12)$$

AISC/LRFD ได้กำหนดค่า X_1 และ X_2 สามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับ

$$X_1 = \frac{f}{S_x} \sqrt{\frac{EGJ A}{2}} \quad (2.13)$$

$$X_2 = \frac{4C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2 \quad (2.14)$$

โดยที่	C_b	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ หาได้จากสมการที่ (2.15)
	M_r	คือ	กำลังโมเมนต์สูงสุดในช่วงอีลาสติก
	L_r	คือ	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอีลาสติก
	F_L	คือ	ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง $(F_{yf} - F_r)$ กับ F_{yw}
	F_{yf}	คือ	หน่วยแรงครากของปีก
	F_{yw}	คือ	หน่วยแรงครากของเอว
	F_r	คือ	หน่วยแรงคงค้างในปีก (สำหรับเหล็กgrupพรรณ $F_r = 69 \text{ MPa}$)

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (2.15)$$

โดยที่	M_{\max}	คือ	โมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวที่ปราศจากการยึดรั้ง
	M_A	คือ	โมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน
	M_B	คือ	โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน
	M_C	คือ	โมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน

ในกรณีที่โมเมนต์มีค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน (uniform moment) ค่า C_b มีค่าดังสมการ

$$C_b = \frac{12.5M}{2.5M + 3M + 4M + 3M} = 1.0 \quad (2.16)$$

4) เมื่อ $L_b > L_r$

ในกรณีคานมีการยึดรั้งด้านข้างไม่เพียงพอ เมื่อ $L_b > L_r$ คานเกิดการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอีลาสติก (elastic lateral-torsional buckling, elastic LTB) สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปร่าง AISC/LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุ ($M_n < M_r$) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

$$M_n = M_{cr} = C_b \frac{f}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{fE}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \leq M_p \quad (2.17)$$

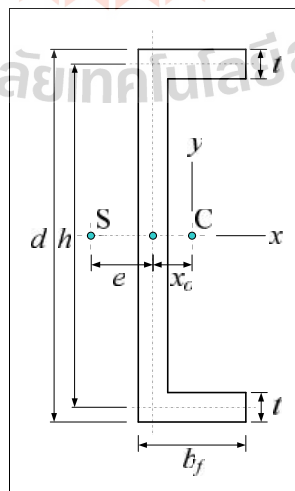
โดยที่	G	คือ	โมดูลัสแรงเฉือน
	I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping section constant)
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด (torsional section constant)

สมการที่ (2.17) สามารถใช้ได้สำหรับคานที่มีหน้าตัดสมมาตรรอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนของแรงกระทำ และที่ส่วนปลายทั้งสองข้างของคานมีการรับรอบแบบธรรมดา (simply supported) ซึ่งมีอิสระในการบิดเบี้ยวและหมุนรอบแกน Y ตลอดจนน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัด

สำหรับคานเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel section) ค่าคงที่เนื่องจากการบิด (J) และค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยว (C_w) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19) ตามลำดับ โดยที่พิกัดของหน้าตัดรูปร่างน้ำอ้างอิงจากรูปที่ 2.18

$$J = \frac{t^3}{3}(2b + h) \quad (2.18)$$

$$C_w = \frac{tb^3h^3}{12} \left(\frac{3b + 2h}{6b + h} \right) \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.7 พิกัดของหน้าตัดรูปร่างน้ำ

2.3.1.2 คานหน้าตัดไม่อัดแน่น

กำลังโมเมนต์ระบุที่ใช้ออกแบบคานหน้าตัดไม่อัดแน่น ($\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$) สามารถคำนวณจากการวิบัติ 3 กรณี แล้วเลือกใช้ค่าที่น้อยที่สุด

1) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีก (Flange Local Buckling, FLB)

ถ้า $\lambda_p \leq \lambda_f \leq \lambda_r$ เฉพาะส่วนปีก ดังนั้นปีกเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่น กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.20)

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda_f - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq M_p \quad (2.20)$$

โดยที่ λ_f คือ ค่าสัดส่วนความชะลูดของปีกคาน

2) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเอว (Web Local Buckling, WLB)

ถ้า $\lambda_p \leq \lambda_w \leq \lambda_r$ เฉพาะส่วนปีก ดังนั้นปีกเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่น กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$M_n = M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{\lambda_w - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \leq M_p \quad (2.21)$$

โดยที่ λ_w คือ ค่าสัดส่วนความชะลูดของเอวคาน

3) การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (Lateral-Torsional Buckling, LTB)

ถ้า $L_p < L_b \leq L_r$ เป็นกรณีที่คานเกิดการวิบัติในช่วงอินอีลาสติก เนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Inelastic LTB กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.22)

$$M_n = C_b \left[M_p - (M_p - M_r) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (2.22)$$

ถ้า $L_b > L_r$ เป็นกรณีที่เกิดการวิบัติในช่วงอิลาสติก เนื่องจากการโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Elastic LTB กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

2.3.2 การโก่งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงคัตของเหล็กgrupพรรณ

การคำนวณออกแบบส่วนของโครงสร้างที่รับแรงคัต นอกจากพิจารณาออกแบบให้มีกำลังต้านทานเพียงพอแล้ว ต้องพิจารณาให้ส่วนของโครงสร้างไม่เกิดการโก่งตัว (deflection) มากเกินไปในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน จนเป็นเหตุให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ซึ่งมีผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร ตลอดจนมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural elements) และที่เป็นชิ้นส่วน โครงสร้าง (structural elements)

โดยทั่วไป ในการออกแบบโครงสร้างควรมีการจำกัดการโก่งตัวของโครงสร้างไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไปเนื่องจาก

- 1) การโก่งตัวที่มีค่าสูงเกินไป อาจทำให้วัสดุฉาบหรือส่วนของโครงสร้างที่ถูกรองรับโดยโครงสร้างดังกล่าว เช่น ผนังที่กั้นห้องหรือเพดานเกิดการแตกร้าวเสียหาย
- 2) การโก่งตัวที่มีค่าสูงเกินไปอาจทำให้รูปร่างของโครงสร้างเสียความสวยงาม
- 3) โครงสร้างที่มีการโก่งตัวที่สูงเกินไป เป็นโครงสร้างที่เกิดการสั่นสะเทือน (vibration) ได้ง่าย และทำให้ผู้ใช้สอยโครงสร้างดังกล่าวรู้สึกถึงความไม่ปลอดภัย

การคำนวณหาระยะการโก่งตัวที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างหรือค่าระยะการโก่งตัวที่มากที่สุด ขึ้นกับค่าความโค้ง (curvature, w) ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สอดคล้องกับโมเมนต์คัตที่สภาวะนั้นๆ โดยที่ค่าความโค้งมีค่าเท่ากับ M / EI ตามทฤษฎีอิลาสติก ซึ่งค่า EI เป็นค่าสติเฟนสของส่วนโครงสร้าง ดังนั้น ระยะการโก่งตัวดังกล่าวขึ้นกับไดอะแกรมของ M / EI หรือขึ้นกับรูปแบบน้ำหนักที่กระทำ ความยาวช่วงคาน และลักษณะของจุดรองรับ ซึ่งสมการเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta = r \frac{WL^3}{EI} \quad (2.23)$$

โดยที่ Δ	คือ	ระยะการโก่งตัว
r	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับ ดังแสดงในตารางที่ 2.5
W	คือ	น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน
I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซีย

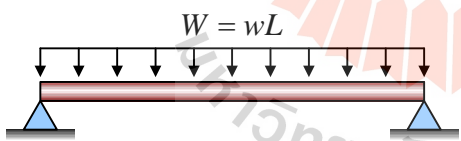
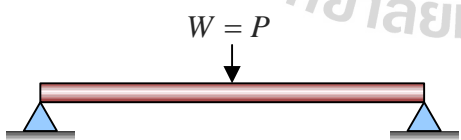
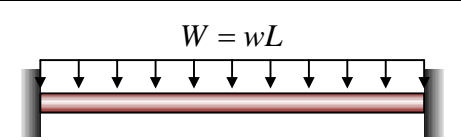
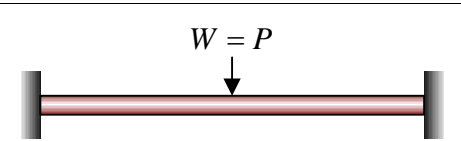
มาตรฐาน AISC/LRFD ได้กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขององค์อาคารภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ต้องไม่มีผลกระทบต่อลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง (AISC 350, 1999) โดยกำหนดระยะการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ (Δ_{allow}) ดังต่อไปนี้

$$\Delta_{allow} \leq \frac{L}{360} \quad \text{สำหรับองค์อาคารที่มีการฉาบผิว} \quad (2.24)$$

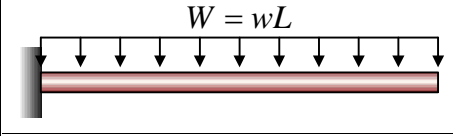

$$\Delta_{allow} \leq \frac{L}{240} \quad \text{สำหรับพื้นที่ไม่มีการฉาบผิว} \quad (2.25)$$

$$\Delta_{allow} \leq \frac{L}{180} \quad \text{สำหรับงานหลังคาที่ไม่มีการฉาบผิว} \quad (2.26)$$

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ r และระยะการโก่งตัวสูงสุด

แรงกระทำภายนอกและ ลักษณะของจตุรรองรับ	r	Δ_{max}
	$\frac{5}{384}$	$\frac{5wL^4}{384EI}$
	$\frac{1}{48}$	$\frac{PL^3}{48EI}$
	$\frac{1}{384}$	$\frac{wL^4}{384EI}$
	$\frac{1}{192}$	$\frac{PL^3}{192EI}$

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ r และระยะการโก่งตัวสูงสุด (ต่อ)

แรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับ	r	Δ_{\max}
	$\frac{1}{8}$	$\frac{wL^4}{8EI}$
	$\frac{1}{3}$	$\frac{PL^3}{3EI}$

2.3.3 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน

คู่มือการออกแบบ โครงสร้างพลาสติก (structural plastic design manual) โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน (American Society of Civil Engineers: ASCE) (ASCE, 1984) ได้นำเสนอสมการสำหรับการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย โดยคู่มือออกแบบดังกล่าวได้อ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัด wide-flange ภายใต้แรงดัดของ Davalos, Qiao, and Salim (1997); Qiao et al. (1999) พบว่าโดยส่วนมาก คานและชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากวัสดุ CFRP จะเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะ (buckling failure) ก่อนการวิบัติเนื่องจากการล้มตัวของวัสดุ (material failure) สาเหตุเนื่องจากวัสดุ CFRP มีคุณสมบัติแบบ Orthotropic material ซึ่งต่างจากเหล็กรูปพรรณที่มีพฤติกรรมแบบ Isotropic material ตลอดจนวัสดุ CFRP มีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 2.6 (Omidvar, 1998) ส่งผลให้การตอบสนองทางโครงสร้างของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากวัสดุ CFRP เกิดการโก่งเดาะได้ง่าย (Kim et al., 2007)

ASCE (1984) ได้นำเสนอสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด สำหรับคานที่วิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) กำลังรับโมเมนต์ดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ (2.27) นอกจากนี้ พบว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการเดียวกับสมการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$M_{cr} = C_b \frac{f}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{fE}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2.27)$$

2.3.4 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน FRP

จากคู่มือการออกแบบ (design manual) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่เผยแพร่ออกมา ในส่วนของสมการออกแบบที่มีลักษณะเกี่ยวข้องกับหน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงดัดยังมีจำนวนไม่มากนัก

1) Creative Pultrusions, Inc.

Creative Pultrusions, Inc. (2004) ได้เสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะด้านข้าง (P_{cr}) สำหรับคานยื่น (cantilever beam) โดยมีน้ำหนักกระทำที่ด้านปลาย (tip-load) ของคาน ดังสมการ

$$P_{cr} = x \frac{\sqrt{E I_y G J}}{L^2} \quad (2.28)$$

เมื่อ
$$x = 5.08 \sqrt{1 + \frac{19.3}{l} \left[\frac{(l+13)(l+3)}{(l+10)^2} \right]} \quad (2.29)$$

$$l = \frac{G J L^2}{I_w} \quad (2.30)$$

$$G J = \frac{2(G_{xy})_f t_f^3 b_f^3}{3} + \frac{(G_{xy})_w t_w^3 b_w^3}{3} \quad (2.31)$$

$$I_w = \frac{(E_x)_f t_f b_w^2 b_f^3}{24} + \frac{(E_x)_f t_f^3 b_f^3}{36} + \frac{(E_x)_w t_w^3 b_w^3}{144} \quad (2.32)$$

โดยที่	E_x	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย
	G_{xy}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย
	I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนรอง (weak axis)
	t_f	คือ	ความหนาของปีกคาน
	t_w	คือ	ความหนาของเอวคาน
	b_f	คือ	ความกว้างของปีกคาน
	b_w	คือ	ความยาวของเอวคาน

น้ำหนักโก่งเดาะดังกล่าวสามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน และใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ของโมเมนต์สำหรับทำนายความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างของหน้าตัดรูปร่างน้ำสำหรับจากรองรับในแบบต่างๆ

2) Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG)

MMFG (1994) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโก่งเดาะ (F_u) ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ ดังสมการ

$$F_u = \frac{E}{27(b_f/t_f)^{0.95}} \quad (2.33)$$

ดังนั้นหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ (F_b) มีค่าดังสมการ

$$F_b = \frac{F_u}{(F.S.)} = \frac{F_u}{2.5} \quad (2.34)$$

MMFG กำหนดให้คานมีค่าตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2.5

3) Bedford Reinforced Plastics, Inc.

Bedford Reinforced Plastics (2006) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโก่งเดาะที่ยอมให้ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ ดังสมการ

$$F_b = \frac{G(t_f/b_c)^2}{2.5} \quad (2.35)$$

โดยที่ b_c คือ ความกว้างปีกลบด้วยความหนาของปีก ($b_f - t_f$)

อย่างไรก็ตาม สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน PFRP ตามที่ได้เสนอมานี้ อาจไม่มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประมาณค่าน้ำหนักโก่งเดาะของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ เหตุเนื่องจากสมการที่ (2.28) เป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะสำหรับคานยื่น (cantilever beam) หน้าตัดของรูปร่างน้ำของ Creative Pultrusions (2004) โดยสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pandey, Kabir, and Sherbourne (1995) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะของคานยื่น (cantilever beam) ที่มีหน้าตัดรูปตัว I

นอกจากนี้ สมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.35) เป็นสมการสำหรับประมาณหน่วยแรงโก่งเดาะที่ยอมรับได้ (F_c) ของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างของบริษัท MMFG (1994) และ Bedford Reinforced Plastics (2006) ตามลำดับ โดยทั้งสองสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากสมการสำหรับการคำนวณหน่วยแรงวิกฤต (critical stress) ที่ทำให้คานเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกเท่านั้นซึ่งอยู่ในทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ (Gaylord et al., 1992)

2.3.5 การโก่งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงคัตสำหรับวัสดุ CFRP ภายใต้แรงคัต

โดยทั่วไป วัสดุ CFRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ก่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง (Bank, 1989a) โดยมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วงระหว่าง 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 2.6 (Omidvar, 1998) ส่งผลให้การออกแบบคาน CFRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) (Bank, 1987 และ Mallick, 1988)

ระยะการโก่งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงคัตสำหรับวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของวัสดุ โดยระยะการโก่งตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) (Timoshenko, 1921) ในทฤษฎีคานของ Timoshenko กล่าวว่า ความโค้งขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ 2 ส่วน ได้แก่ การโก่งตัวตามขวาง (transverse deflection, u) ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของแรงคัตร่วมกับเฉือน (bending and shearing) และความชัน (slope, w) ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของแรงคัต โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{dw}{dz} = \frac{M_x}{EI} \quad (2.36)$$

$$\frac{dy}{dz} - w = -\frac{V_y}{KAG} \quad (2.37)$$

โดยทั่วไป สภาวะเงื่อนไขจุกครองรับ (boundary condition) ของการโก่งตัวและความชันที่ใช้สำหรับทฤษฎีคานของ Timoshenko จะเหมือนกับที่ใช้ในทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli (Euler-Bernoulli beam theory) โดยรูปแบบผลเฉลยของสมการที่ (2.36) และ (2.37) สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (2.38) และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเห็นได้ว่าการโก่งตัวโดยรวม (total deflection) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของการโก่งตัวเนื่องจากแรงคัต (bending deflection) และ

การโก่งตัวจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งระยะการโก่งตัวดังกล่าวขึ้นอยู่กับรูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ความยาวช่วงคาน และลักษณะเงื่อนไขของจตุรรองรับ

$$y = r \frac{WL^3}{EI} + s \frac{WL}{KAG} \quad (2.38)$$

โดยที่ y คือ ระยะการโก่งตัว (Δ)

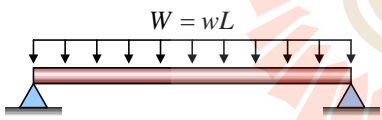
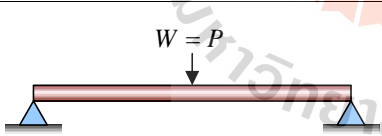
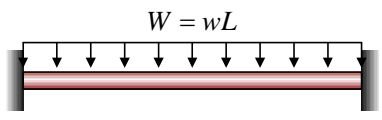
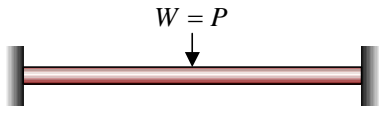
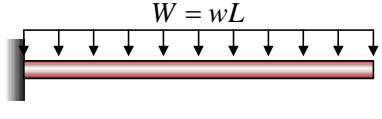
r คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงคด ดังแสดงในตารางที่ 2.6

s คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ดังแสดงในตารางที่ 2.6


EI คือ Flexural rigidity

KAG คือ Transverse shear rigidity

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ r และ s และระยะการโก่งตัวสูงสุด

แรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับ	r	s	Δ_{\max}
	$\frac{5}{384}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{5wL^4}{384EI} + \frac{wL^2}{8KAG}$
	$\frac{1}{48}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4KAG}$
	$\frac{1}{384}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{wL^4}{384EI} + \frac{wL^2}{8KAG}$
	$\frac{1}{192}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{PL^3}{192EI} + \frac{PL}{4KAG}$
	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{wL^4}{8EI} + \frac{wL^2}{2KAG}$

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ r และ s และระยะการโก่งตัวสูงสุด (ต่อ)

แรงกระทำภายนอกและลักษณะของจุดรองรับ	r	s	Δ_{\max}
	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{KAG}$

สำหรับการคำนวณหาระยะการโก่งตัวในสมการที่ (2.38) ให้พิจารณาว่าคุณสมบัติของส่วนปีกและเอวมีค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน โดยที่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของคาน CFRP หาได้จากสมการที่ (2.39) และ (2.40) ตามลำดับ

$$EI = E_L I_x \quad (2.39)$$

$$KAG = k_{\text{tim}} AG_{LT} \quad (2.40)$$

โดยที่	E_L	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนของเส้นใย
	I_x	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกน x
	k_{tim}	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (Timoshenko shear coefficient)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
	G_{LT}	คือ	โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ (in-plane shear modulus)

Bank (1987) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (k_{tim}) ของคานวัสดุประกอบผนังบาง (composite thin-walled beams) หน้าตัดรูปตัว I และรูปกล่อง (box section) ดังแสดงในสมการที่ (2.41) ถึงสมการที่ (2.44)

สำหรับหน้าตัดรูปตัว I ($t_w = t_f, b = h$)

$$k_{\text{tim}} = \frac{80}{192 + (\epsilon_L G_{LT} / E_L)(33)} \quad (2.41)$$

สำหรับหน้าตัดรูปกล่อง ($t_w = t_f, b = h$)

$$k_{tim} = \frac{80}{192 + (\epsilon_L G_{LT} / E_L)(-12)} \quad (2.42)$$

สำหรับหน้าตัดรูปตัว I ($t_w \neq t_f, b \neq h$)

$$k_{tim} = \frac{20(1+3m)^2}{(180m^3 + 300m^2 + 144m + 60m^2n^2 + 60mn^2 + 24) + (\epsilon_L G_{LT} / E_L)(30m^2 + 40mn^2 + 60m^2n^2 + 6m - 4)} \quad (2.43)$$

สำหรับหน้าตัดรูปกล่อง ($t_w \neq t_f, b \neq h$)

$$k_{tim} = \frac{20(1+3m)^2}{(180m^3 + 300m^2 + 144m + 60m^2n^2 + 60mn^2 + 24) + (\epsilon_L G_{LT} / E_L)(30m^2 - 50mn^2 - 30m^2n^2 + 6m - 4)} \quad (2.44)$$

ที่ผ่านมาในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (k_{tim}) สำหรับคานาวัสดุประกอบผนังบางค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากดังกล่าว Bank (1989a); Nagaraj and Gangarao (1997) ได้นำเสนอการประมาณค่า Transverse shear rigidity, KAG แทนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko โดยตรง โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ (2.45)

$$k_{tim} AG_{LT} \approx A_{web} G_{LT(web)} \quad (2.45)$$

โดยที่ A_{web} คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว

$G_{LT(web)}$ คือ โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของเอว

อย่างไรก็ตาม Bank (2006) พบว่าสำหรับตัวอย่างหน้าตัดรูปตัว I การคำนวณโดยสมการที่ (2.45) ให้ผลการแตกต่างจากค่า Transverse shear rigidity, KAG ที่คำนวณหาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (k_{tim}) ไม่มากนัก

2.4 การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงดัด

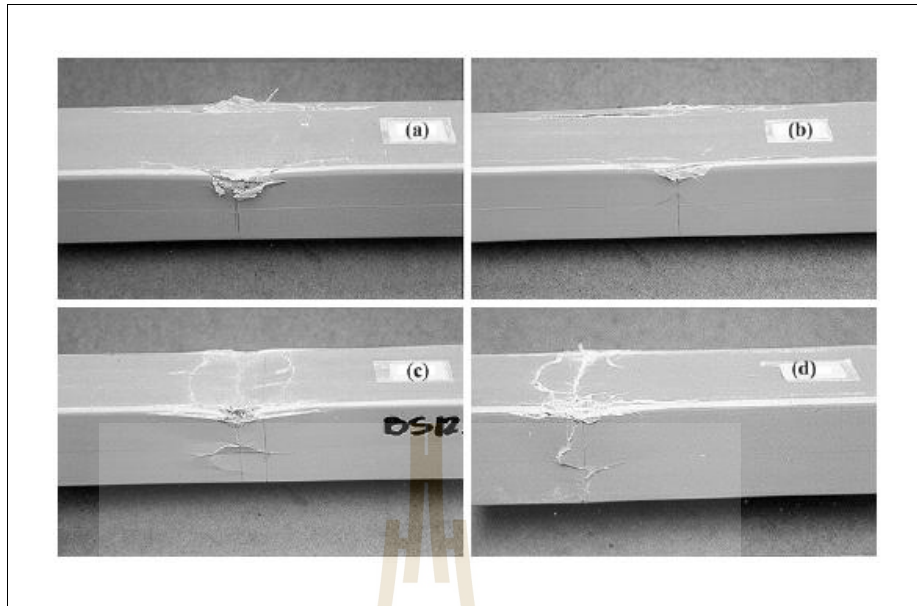
Seangatith (2002) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางกลและลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกต่ำ (low span-to-depth ratio) ที่มักถูกนำไปใช้ในกรณีของราวกันตก (guard rail) และราวสะพาน (bridge rail) การทดสอบทำตามมาตรฐาน ASTM D198-99 ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาความสามารถของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงภายใต้แรงดัด ได้แก่ กำลังรับแรงดัดประลัย (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดของหน้าตัด (flexural modulus) และลักษณะของการวิบัติ ตัวอย่างของคานรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกว้าง 50 mm ลึก 50 mm และมีความหนา 3.2 และ 6.4 mm ทำมาจากเส้นใยแก้วชนิด E (E-glass fiber) เรซินเป็นชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc.



รูปที่ 2.8 การทดสอบคาน FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

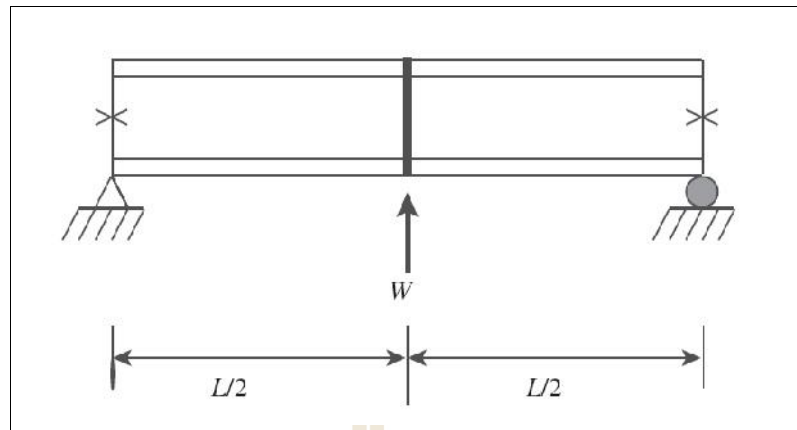
จากผลการทดสอบพบว่า พฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงที่ใช้ในการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมเชิงเส้นตรง (linear) พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear) และพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้า (progressive failure) ในส่วนของพฤติกรรมเชิงเส้นตรงนั้นจะมีค่าถึง 35 ถึง 75 % ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย สำหรับอัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัดของหน้าตัดต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าของคานเหล็กรูปพรรณ ดังนั้นอิทธิพลของการแอ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนจะมีมาก ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัดของหน้าตัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยไม่ได้พิจารณาเป็นคุณสมบัติของตัวเนื้อวัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของหน้าตัด ตลอดจนลักษณะการจัดวางเส้นใย ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าน้อยกว่าเหล็กรูปพรรณอยู่ 7 ถึง 9 เท่า ดังนั้นการโก่งตัวของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมหลักในการการออกแบบหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใย

ในช่วงที่พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรง การวิบัติของคานเริ่มจากการรูดแตกของส่วนเอว (web crushing) ที่บริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำ ตามด้วยการแตกตามแนวยาวตลอดแนวของรอยต่อระหว่างส่วนปีกตอนบนและส่วนเอวในลักษณะของพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้าซึ่งแตกต่างจากการวิบัติของวัสดุเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2.9 พฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงที่นำมาทดสอบตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของหุนแรงเข้มข้น (stress concentration) บริเวณจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ซึ่งควรให้ความสนใจและคำนึงถึงในการออกแบบ อาทิเช่นในกรณีของราวกันตกและราวสะพาน



รูปที่ 2.9 ลักษณะการวิบัติของแกน FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง
ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

Sirjani และ Razzaq (2005) ได้นำเสนอผลการทดสอบและสมการคำนวณทางทฤษฎีสำหรับแกนพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ตัวอย่างแกนถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) แรงกระทำจะกระทำที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยมีสถานะจุดรองรับเป็นแบบ Pinned-Pinned supports ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ตัวอย่างของแกนรูปตัว I ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดลึก 101.6 mm กว้าง 50.8 mm และหนา 6.35 mm ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 4 ค่า ได้แก่ 1800, 2100, 2400 และ 2700 mm โดยที่แรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะถูกเปรียบเทียบกับสมการคำนวณทางทฤษฎีที่ดัดแปลง (modified) จากสมการสำหรับการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design, LRFD) (AISC 350, 1999) โดยที่การดัดแปลงดังกล่าวใช้หลักการสมดุล (equilibrium approach) ในการแก้สมการอนุพันธ์ (differential equation)



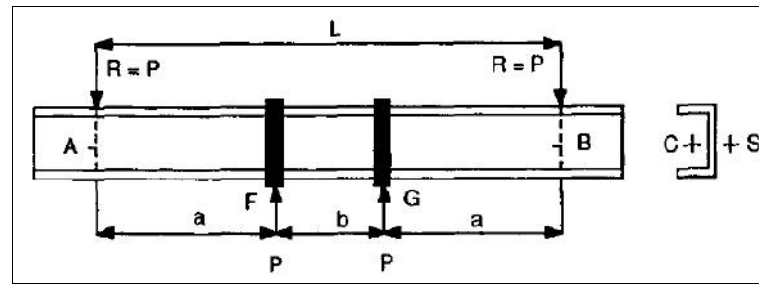
รูปที่ 2.10 แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I
ภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด (Sirjani และ Razzaq, 2005)

จากผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีลักษณะวิบัติแบบโก่งเดาะด้านข้าง โดยปราศจากการแตกหักของเนื้อวัสดุ หรือการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ตลอดจนผลการทดสอบที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับสมการดัดแปลง (modified equation) ที่ปรับปรุงจากวิธี AISC/LRFD โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ (2.45)

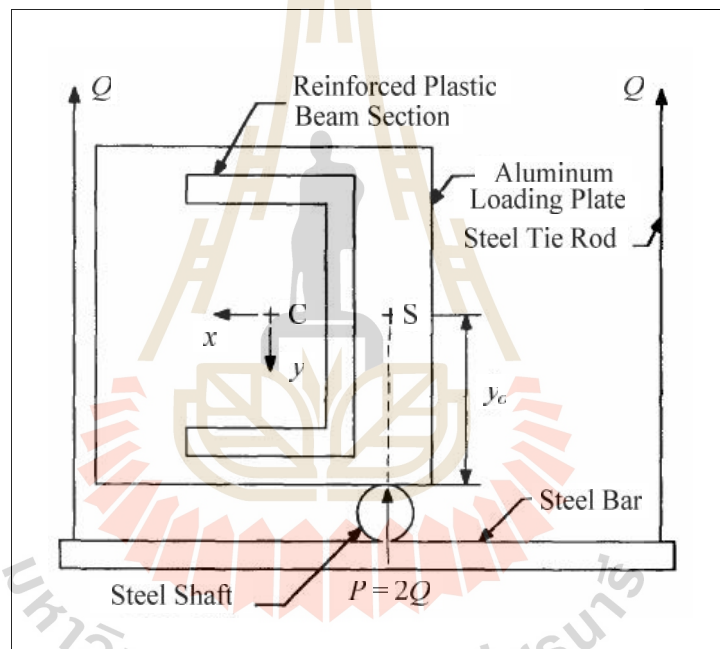
$$M_{\max} = \Gamma \frac{f}{L_b} C_b \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{fE}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2.45)$$

$$\text{เมื่อ } \Gamma = \frac{L}{175} + 0.5715 \quad (2.46)$$

Razzaq, Prabhakaran และ Sirjani (1996) ได้นำเสนอผลการทดสอบและสมการคำนวณทางทฤษฎีของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel section) โดยเน้นพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 4 จุด (four-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แรงกระทำจะถูกกระทำจุด Shear center โดยผ่านแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยมีสภาวะของจตุรรองรับเป็นแบบ Pinned-Pinned supports ตัวอย่างคานหน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดลึก 152.4 mm กว้าง 41.3 mm และหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion, Inc. โดยความยาวของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1520, 1830, 2130, 2440 และ 2740 mm



รูปที่ 2.11 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด
(Razzaq, Prabhakaran และ Sirjani, 1996)



รูปที่ 2.12 ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ
(Razzaq, Prabhakaran และ Sirjani, 1996)

จากผลการทดสอบพบว่า พฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำมีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงค่าน้ำหนักโก่งเดาะของคาน และที่น้ำหนักโก่งเดาะลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดเป็นการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ในงานวิจัยได้นำเสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ (approximate buckling load formula, P_{cr}) ของคานซึ่งแรงกระทำที่กระทำผ่านจุด Shear center โดยใช้วิธี Rayleigh-Ritz Method

ดังแสดงในสมการที่ (2.47) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ค่าของน้ำหนักโก่งเดาะสอดคล้องกับน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ

$$P_{cr} = \frac{0.5[-f_2 + f_2^2 + 4f_1f_3]}{f_1} \quad (2.47)$$

เมื่อ $f_1 = \frac{1}{16} \left[f(a) - \frac{f^2 a^2}{L^2} - \frac{2fa}{L} g(a) \right]^2$ (2.48)

$$f_2 = \frac{f^4 E_{11} I_y}{4L^3} y_0^* \sin^2 \left(\frac{fa}{L} \right) \quad (2.49)$$

$$f_3 = \frac{f^6 E_{11} I_y}{16L^4} \left[\frac{f^2 E_{11} C_w}{L^2} + G_{12} J \right] \quad (2.50)$$

$$f(a) = \frac{fa}{L} \sin \left(\frac{2fa}{L} \right) - \sin^2 \left(\frac{fa}{L} \right) \quad (2.51)$$

$$g(a) = \frac{1}{2} \left[f \left(1 - \frac{2a}{L} \right) - \sin f \left(1 - \frac{2a}{L} \right) \right] \quad (2.52)$$

โดยที่	a	คือ	ระยะห่างระหว่างแรงกระทำและจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11
	E_{11}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย
	G_{12}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย
	y_0^*	คือ	ระยะห่างระหว่างแรงกระทำถึงแกนสะเทิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12
	I_y	คือ	โมดูลัสอินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping section constant)
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด (torsional section constant)

2.5 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า สมการที่ใช้ออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงค้ำส่วนใหญ่มาจากสมการคำนวณทางทฤษฎีของเหล็กรูปพรรณ และส่วนหนึ่งถูกพัฒนาสมการจากการทดสอบ (empirical formula) รวมทั้งยังไม่ได้มีการศึกษา

พฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงดัด โดยมีสถานะของจตุรรองรับแบบ Simply supported อย่างจริงจัง ตลอดจนสมการออกแบบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มียังไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอ จึงเห็นสมควรที่จะทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะในการรับแรงดัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ โดยทำการทดสอบความสามารถในการรับแรงดัดของคานในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาพัฒนาสมการการออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ เพื่อให้เกิดประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



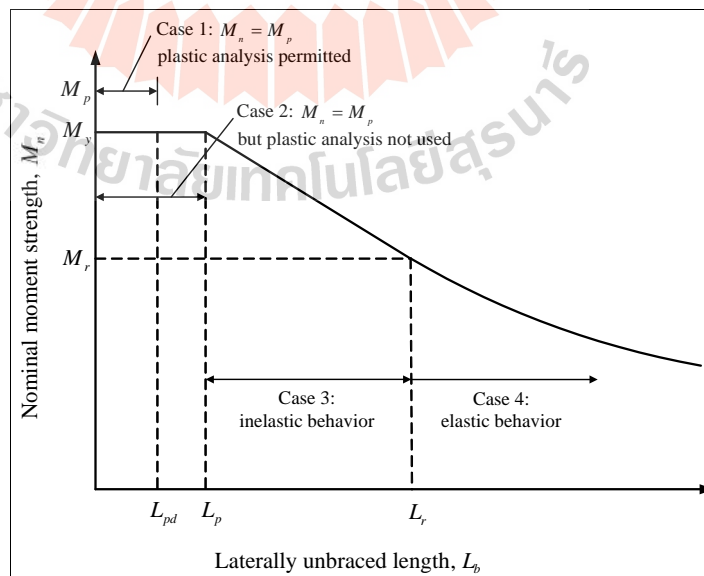
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

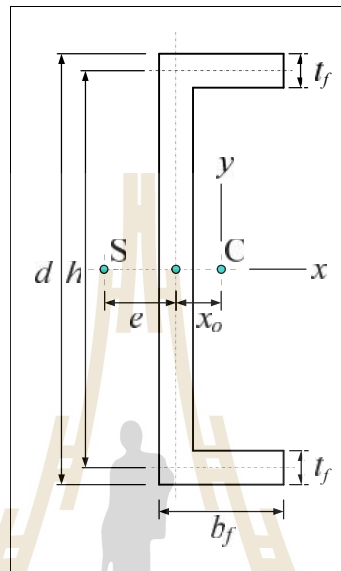
บทนี้กล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงคด การศึกษาประกอบด้วย การทดสอบกำลังรับแรงคดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ การวิเคราะห์กำลังรับแรงคดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยใช้สมการคำนวณทางทฤษฎี และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงคดกับการวิเคราะห์กำลังรับแรงคดของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยสมการทางทฤษฎี

การออกแบบการทดสอบเริ่มจากการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุ FRP รวมถึงเกี่ยวกับเหล็กgrupพรรณ คานประกอบหน้าตัดรูปแบบต่างๆ จากการปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่พบว่าม้งานวิจัยใดที่นำวัสดุ FRP มาใช้ในคานประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะใช้สมการออกแบบของเหล็กgrupพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบของ AISC-LRFD (American Institute of Steel Construction-Load and resistance Factor Design) ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3.1



รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์รับกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน

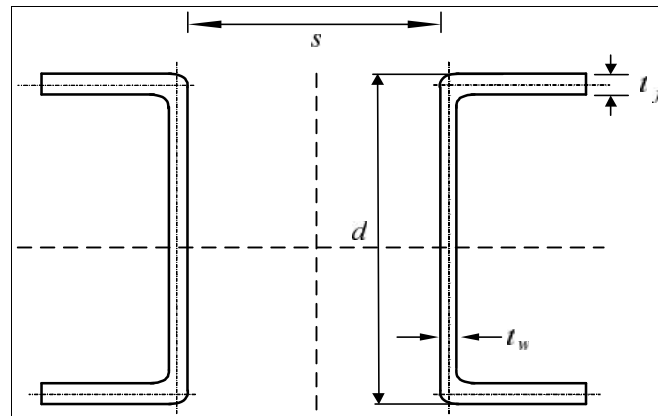
รายละเอียดหน้าตัดของชิ้นส่วน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย แสดงในรูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงกดอัดของคานประกอบ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำในเบื้องต้น แสดงในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างน้ำของคานประกอบ FRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างน้ำของชิ้นส่วน FRP ที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ขนาดหน้าตัด	d (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h (mm)	e (mm)	x_0 (mm)
76×22×6	76	22	6	6	70	7.19	3.2593
102×29×6	102	29	6	6	96	9.34	4.5068
152×43×10	152	43	10	10	142	13.87	6.5092

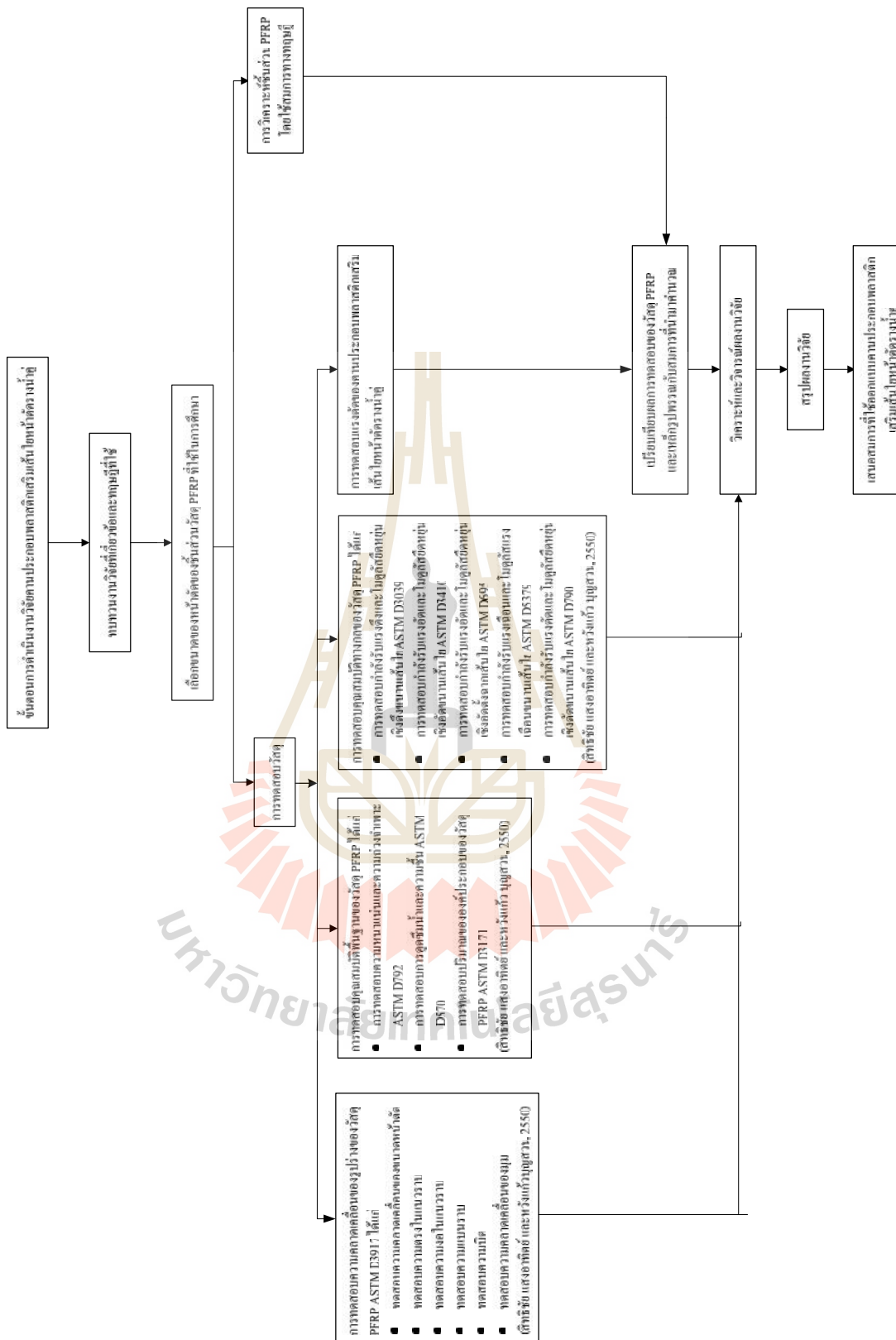


รูปที่ 3.3 คานประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของคานประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่ใช้ในการศึกษา

ขนาดหน้าตัด (mm)	A (mm ²)	F_L^C (MPa)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	E_L (GPa)	G_{LT} (GPa)	ϵ_{LT}	s (mm)
2×76×22×6	1296	121.86	910528	937280	31.07	2.18	0.15	40
2×102×29×6	1776	121.86	2334672	2347048	31.07	2.18	0.15	56
2×152×43×10	4360	121.86	12518133	12138493	31.07	2.18	0.15	80

หลังจากที่ได้หน้าตัดและรูปแบบของการประกอบเสาประกอบดังกล่าวแล้วจึงเริ่มทำการทดสอบต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ เมื่อได้ผลการทดสอบแล้วนำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP ไปใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณความสามารถในการรับแรงกอดด้วยสมการทางทฤษฎี ทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาการวิเคราะห์การรับแรงกอดของเสาประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยสมการทางทฤษฎี แล้วก็นำผลการทดสอบการรับแรงกอดของวัสดุ PFRP มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการทางทฤษฎี เพื่อพัฒนาสมการการออกแบบเสาประกอบที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงกอด สุดท้ายทำการวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาพร้อมกับจัดทำรายงานเอกสาร โดยแผนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนงานวิจัยการดำเนินงานวิจัย

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมี 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 ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 6.6-52.6 มีจำนวนทั้งสิ้น 144 ตัวอย่าง มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.3-3.5 โดยอัตราส่วน L/d ดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานโดยมีจุดรองรับแบบง่าย

สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ 2CXX-YY-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ 2CXX หมายถึง คาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ซึ่งมีขนาดหน้าตัดทั้งหมด 3 ขนาด ได้แก่ $2C76 \times 22 \times 6$ mm, $2C102 \times 29 \times 6$ mm และ $2C152 \times 43 \times 10$ mm YY หมายถึง ความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็นเมตร และ ZZ หมายถึง ระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ (Connector spacing) มีหน่วยเป็นเมตร

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C76×22×6 mm

Specimens	($d \times b \times t$) (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
2C76-0.5-0.50	76×22×6	0.5	6.58	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-0.5-0.25	76×22×6	0.5	6.58	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-0.7-0.70	76×22×6	0.7	9.21	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-0.7-0.35	76×22×6	0.7	9.21	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-1.0-1.00	76×22×6	1.0	13.16	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-1.0-0.50	76×22×6	1.0	13.16	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-1.5-1.50	76×22×6	1.5	19.74	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-1.5-0.75	76×22×6	1.5	19.74	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.0-2.00	76×22×6	2.0	26.32	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.0-1.00	76×22×6	2.0	26.32	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.0-0.50	76×22×6	2.0	26.32	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.5-2.50	76×22×6	2.5	32.89	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.5-1.25	76×22×6	2.5	32.89	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-2.5-0.63	76×22×6	2.5	32.89	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.0-3.00	76×22×6	3.0	39.47	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.0-1.50	76×22×6	3.0	39.47	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.0-0.75	76×22×6	3.0	39.47	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.0-0.38	76×22×6	3.0	39.47	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.5-3.50	76×22×6	3.5	46.05	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.5-1.75	76×22×6	3.5	46.05	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.5-0.88	76×22×6	3.5	46.05	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-3.5-0.44	76×22×6	3.5	46.05	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-4.0-4.00	76×22×6	4.0	52.63	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-4.0-2.00	76×22×6	4.0	52.63	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-4.0-1.00	76×22×6	4.0	52.63	937280	8208	2.660×10^7	2
2C76-4.0-0.50	76×22×6	4.0	52.63	937280	8208	2.660×10^7	2

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C102×29×6 mm

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
2C102-0.7-0.70	102×29×6	0.7	6.86	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-0.7-0.35	102×29×6	0.7	6.86	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-1.0-1.00	102×29×6	1.0	9.80	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-1.0-0.50	102×29×6	1.0	9.80	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-1.5-1.50	102×29×6	1.5	14.71	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-1.5-0.75	102×29×6	1.5	14.71	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.0-2.00	102×29×6	2.0	19.61	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.0-1.00	102×29×6	2.0	19.61	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.0-0.50	102×29×6	2.0	19.61	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.5-2.50	102×29×6	2.0	24.51	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.5-1.25	102×29×6	2.0	24.51	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-2.5-0.63	102×29×6	2.5	24.51	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.0-3.00	102×29×6	3.0	29.41	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.0-1.50	102×29×6	3.0	29.41	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.0-0.75	102×29×6	3.0	29.41	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.0-0.38	102×29×6	3.0	29.41	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.5-3.50	102×29×6	3.5	34.31	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.5-1.75	102×29×6	3.5	34.31	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.5-0.88	102×29×6	3.5	34.31	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-3.5-0.44	102×29×6	3.5	34.31	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-4.0-4.00	102×29×6	4.0	39.22	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-4.0-2.00	102×29×6	4.0	39.22	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-4.0-1.00	102×29×6	4.0	39.22	2334672	11088	1.161×10^8	2
2C102-4.0-0.50	102×29×6	4.0	39.22	2334672	11088	1.161×10^8	2

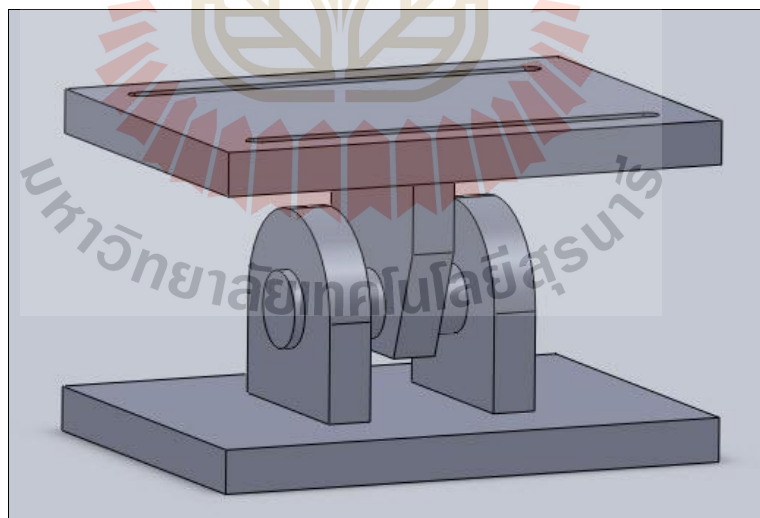
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด 2C152×43×10 mm

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
2C152-1.0-1.00	152×43×10	1.0	6.58	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-1.0-0.50	152×43×10	1.0	6.58	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-1.5-1.50	152×43×10	1.5	9.87	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-1.5-0.75	152×43×10	1.5	9.87	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.0-2.00	152×43×10	2.0	13.16	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.0-1.00	152×43×10	2.0	13.16	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.0-0.50	152×43×10	2.0	13.16	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.5-2.50	152×43×10	2.5	16.45	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.5-1.25	152×43×10	2.5	16.45	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-2.5-0.63	152×43×10	2.5	16.45	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.0-3.00	152×43×10	3.0	19.74	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.0-1.50	152×43×10	3.0	19.74	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.0-0.75	152×43×10	3.0	19.74	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.0-0.38	152×43×10	3.0	19.74	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.5-3.50	152×43×10	3.5	23.03	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.5-1.75	152×43×10	3.5	23.03	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.5-0.88	152×43×10	3.5	23.03	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-3.5-0.44	152×43×10	3.5	23.03	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-4.0-4.00	152×43×10	4.0	26.32	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-4.0-2.00	152×43×10	4.0	26.32	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-4.0-1.00	152×43×10	4.0	26.32	12518133	76000	1.379×10^9	2
2C152-4.0-0.50	152×43×10	4.0	26.32	12518133	76000	1.379×10^9	2

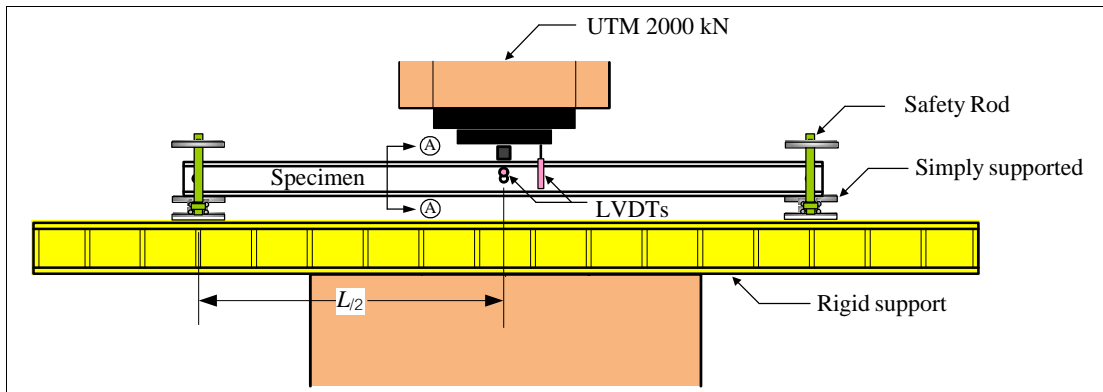
ขั้นตอนการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีขั้นตอนดังนี้

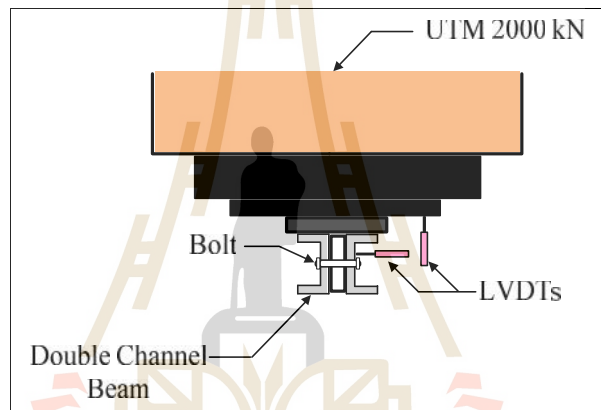
- 1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบตัวอย่างทดสอบจะถูกเจาะรูตามตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ
- 2) ติดตั้งจุดเชื่อมต่อตามจำนวนที่ออกแบบไว้ตามตารางที่ 3.3 ถึง 3.5
- 3) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย โดยออกแบบให้จตุรรองรับดังกล่าวเป็นจตุรรองรับแบบไร้แรงเสียดทาน (frictionless) ดังรูปที่ 3.5 ตัวอย่างทดสอบถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย
- 4) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ
- 5) ระยะเวลาแอนตัวแนวตั้ง (vertical deflection) และระยะเวลาแอนตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัด โดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณหัวคดให้แรงกระทำและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด
- 6) เริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกอย่างช้า ๆ โดยเครื่องทดสอบ UTM 2000 kN ตลอดการทดสอบ Data Logger YOKOGAWA-MW100 ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.5 ลักษณะจตุรรองรับแบบ Pinned support



(a) Schematic view of pultruded FRP channel beams with UTM: Simply supported



(b) Load application system (Section A-A)

รูปที่ 3.6 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย

3.3 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเต้าโดยสมการออกแบบ

Davalos, Qiao, and Salim (1997); Qiao et al. (1999) กล่าวว่าโดยส่วนมากคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากวัสดุ FRP จะเกิดการวิบัติแบบโก่งเดาะ (buckling failure) ก่อนการวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ (material failure) สาเหตุเนื่องจากวัสดุ FRP มีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ ในปัจจุบันคู่มือการออกแบบโครงสร้างพลาสติก (structural plastic design manual) โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน (American Society of Civil Engineers: ASCE) (ASCE, 1984) ได้นำเสนอสมการสำหรับการออกแบบคานที่วิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) โดยคู่มือออกแบบดังกล่าวได้อ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD (AISC/LRFD, 1999) ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ เพื่อหาน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) หรือน้ำหนักวิกฤต (critical load) รวมถึงทำนายพฤติกรรมการโก่งเดาะ (buckling behavior) ของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำเต้าภายใต้แรงดัด

AISC/LRFD 350-99 ได้นำเสนอ สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะ (M_{cr}) ของเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่วิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$M_{cr} = C_b \frac{f}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{fE}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (3.1)$$

โดยที่	L	คือ	ความยาวคาน
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ
	G	คือ	โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็กรูปพรรณ
	I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด
	C_b	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่มีโมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ หาได้จากสมการที่ (3.2)

Kirby and Nethercot (1979) นำเสนอสมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สำหรับกรณี
ที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ (non-uniform moment diagram) ดังนี้

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.2)$$

โดยที่	M_{\max}	คือ	โมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวคาน
	M_A	คือ	โมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน
	M_B	คือ	โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน
	M_C	คือ	โมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน

ดังนั้น จากผลการคำนวณตามสมการที่ 3.2 พบว่ากรณีจากรองรับแบบง่าย C_b เท่ากับ 1.0 โดยปกติวัสดุ FRFP จะถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบ Orthotropic material ซึ่งคุณสมบัติทางกลขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นคุณสมบัติทางกลในสมการที่ (3.1) (E, G) สามารถถูกแทนที่ด้วยค่า E_L และ G_{LT} ดังนั้น สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะของวัสดุ FRFP ที่วิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด ($M_{cr,LRFD}$) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

$$M_{cr,LRFD} = C_b \frac{f}{L} \sqrt{E_L I_y G_{LT} J + \left(\frac{f E_L}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (3.3)$$

โดยที่	E_L	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกน (longitudinal modulus)
	G_{LT}	คือ	โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ (in-plane shear modulus)

3.4 การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคาน FRFP โดยทฤษฎี

การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคานตามทฤษฎีของ Euler-Bernoulli นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4 ดังนี้

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (3.4)$$

Mottram (1992) เสนอว่าเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน การวิเคราะห์และออกแบบคานหรือชิ้นส่วนรับแรงดัดของพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือนเสมอ เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง (Bank, 1989a)

การแอ่นตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดสำหรับวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของวัสดุ โดยระยะการแอ่นตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) จากทฤษฎีการแอ่นตัวโดยรวม (total deflection) มีค่าเท่ากับผลรวมของการแอ่นตัวเนื่องจากแรงดัด (bending deflection) และการแอ่นตัวจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deflection) ดังนั้นการแอ่นตัวสูงสุดสามารถหาได้จากสมการดังนี้

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported)

$$\Delta_{\max} = \frac{PL^3}{48E_L I} + \frac{PL}{4k_{\text{tim}}AG_{LT}} \quad (3.5)$$

Bank (1989a); Nagaraj and Gangarao (1997) ได้เสนอการประมาณค่า Transverse shear rigidity, KAG แทนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (k_{tim}) โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ในรูปของ $k_{\text{tim}}AG_{LT} \approx A_{\text{web}}G_{LT}$

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

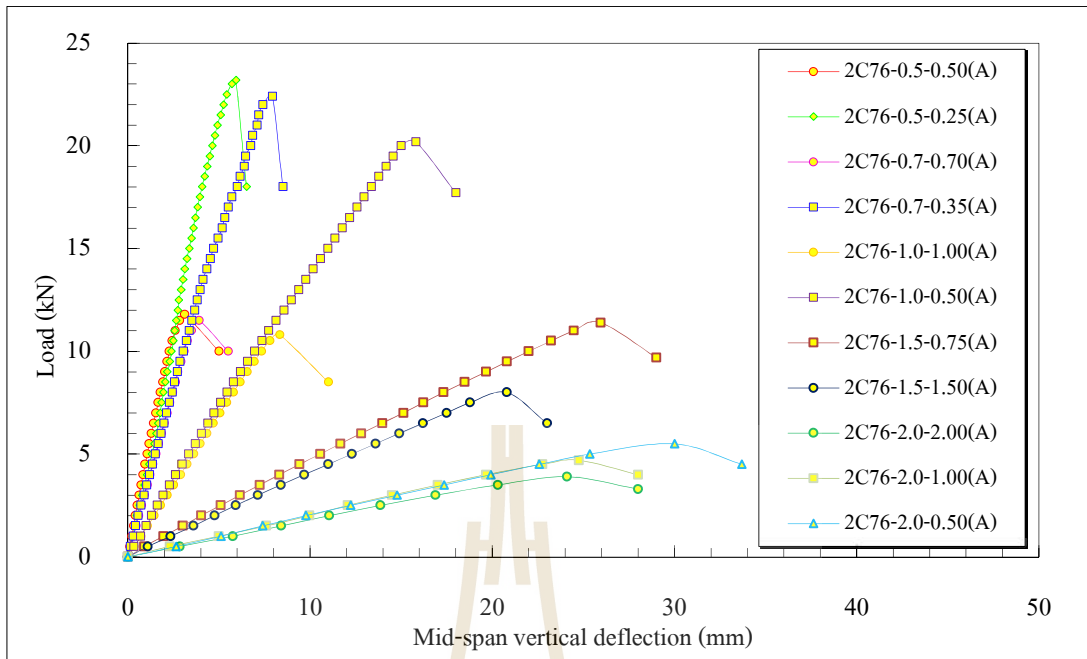
4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการนำเสนอออกเป็นพฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด จากนั้นเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่ได้กับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD

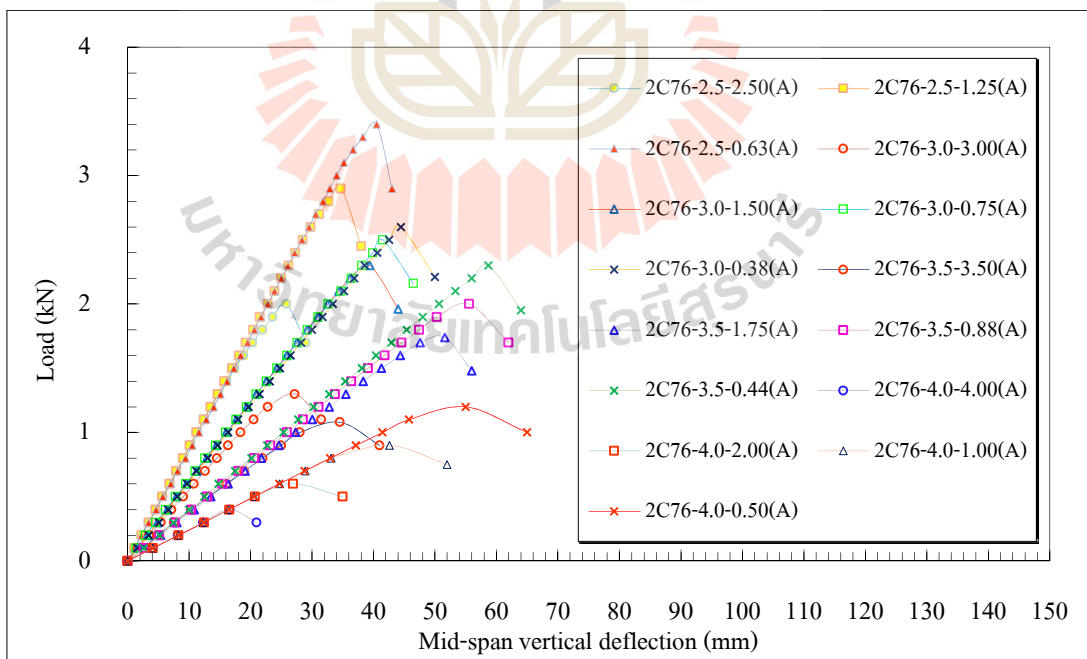
4.2 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคาน

รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางคานมีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) เล็กน้อยจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

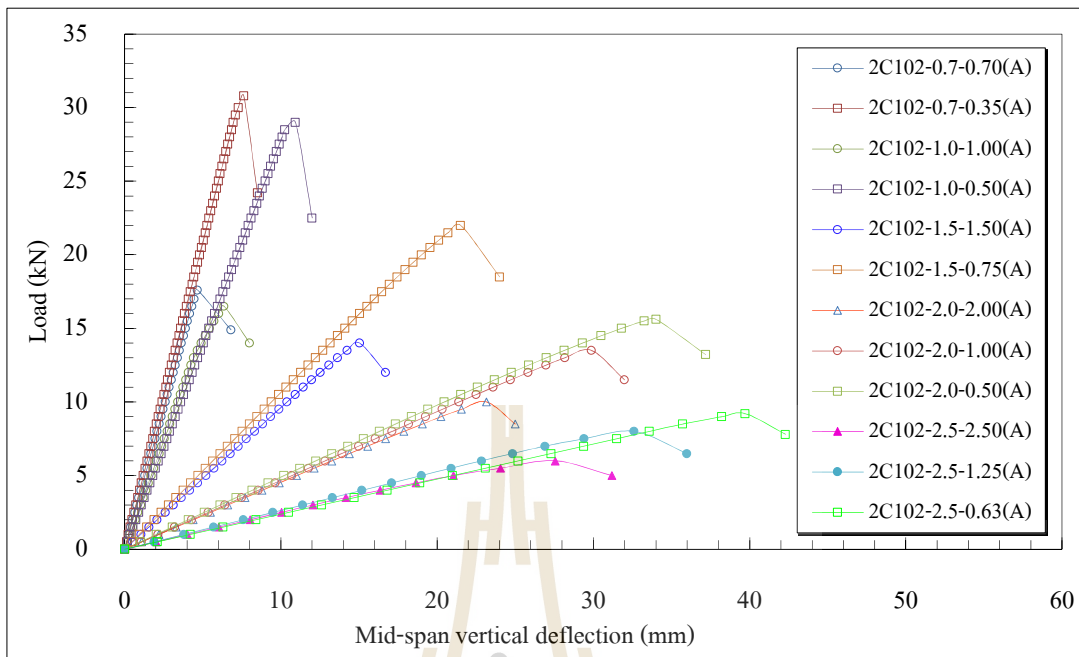
ลักษณะการวิบัติของคานจะแบ่งโดยอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน (L/d) สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ จะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบเดี่ยว (individual lateral buckling) ในกลุ่มตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุด แต่จะมีการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากหน่วยแรงเฉือนตามขวาง (transverse shear) ในกลุ่มของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุด ส่วนการวิบัติของคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$ จะมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะทางด้านข้าง (lateral buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวในแนวตั้งโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามจำนวนของจุดเชื่อมต่อ (connector) ดังนี้ กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มที่มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุด จะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบเดี่ยว (individual lateral buckling) และกลุ่มที่ 2 คือกลุ่มที่มีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 3 ถึง 9 จุด จะเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้างแบบองค์รวม (overall lateral buckling) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด



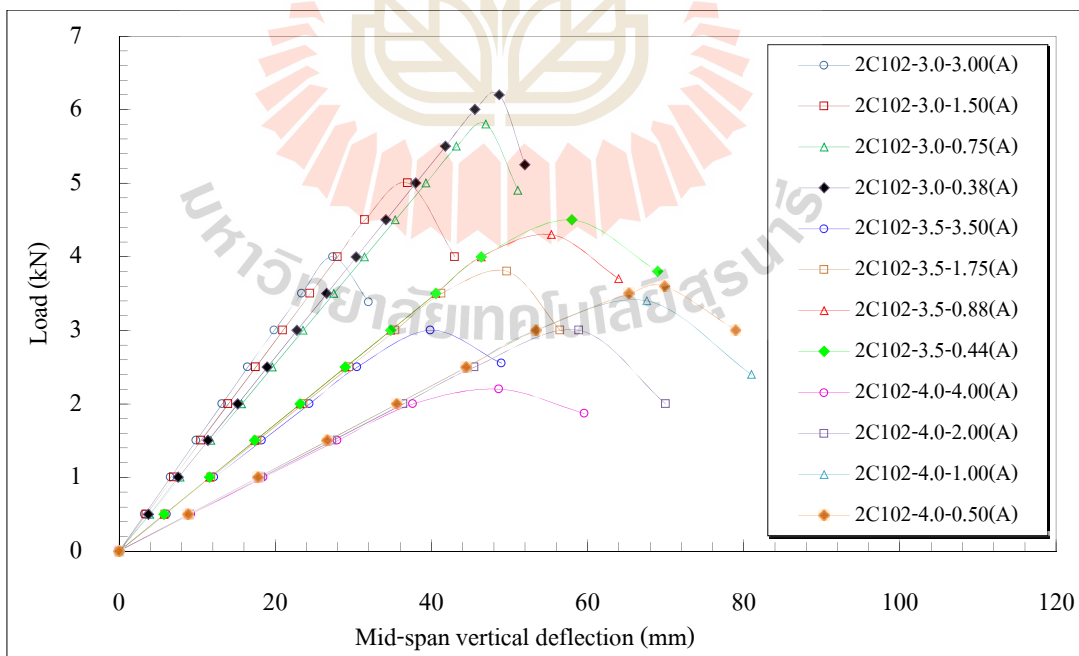
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน
ของตัวอย่างขนาด 2C76×22×6 mm ความยาว 0.5 ถึง 2.0 m



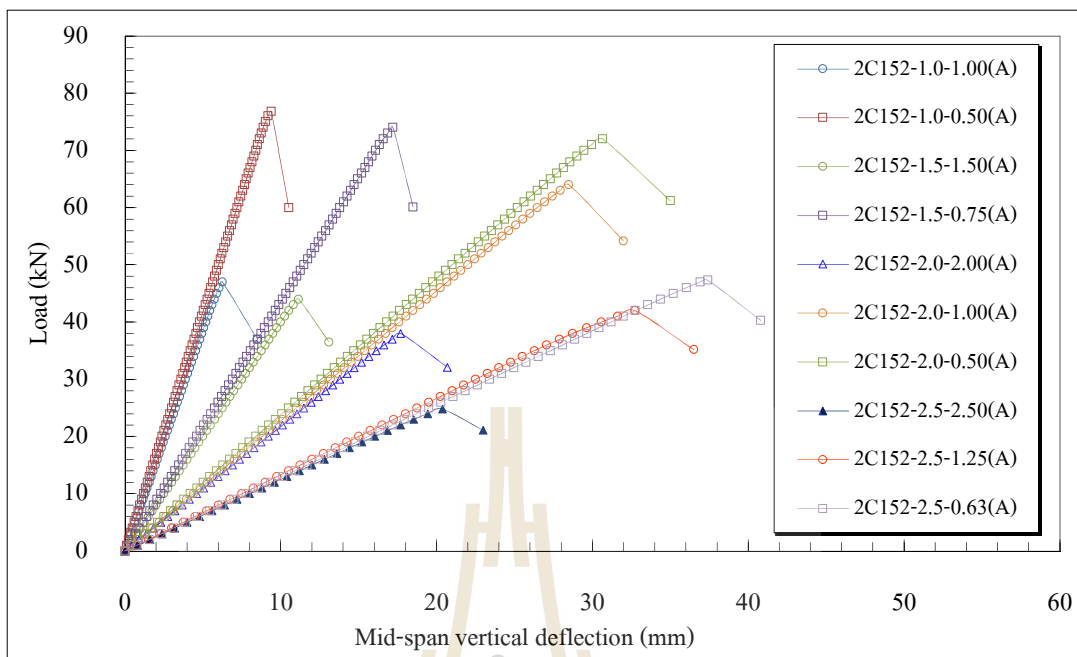
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน
ของตัวอย่างขนาด 2C76×22×6 mm ความยาว 2.5 ถึง 4.0 m



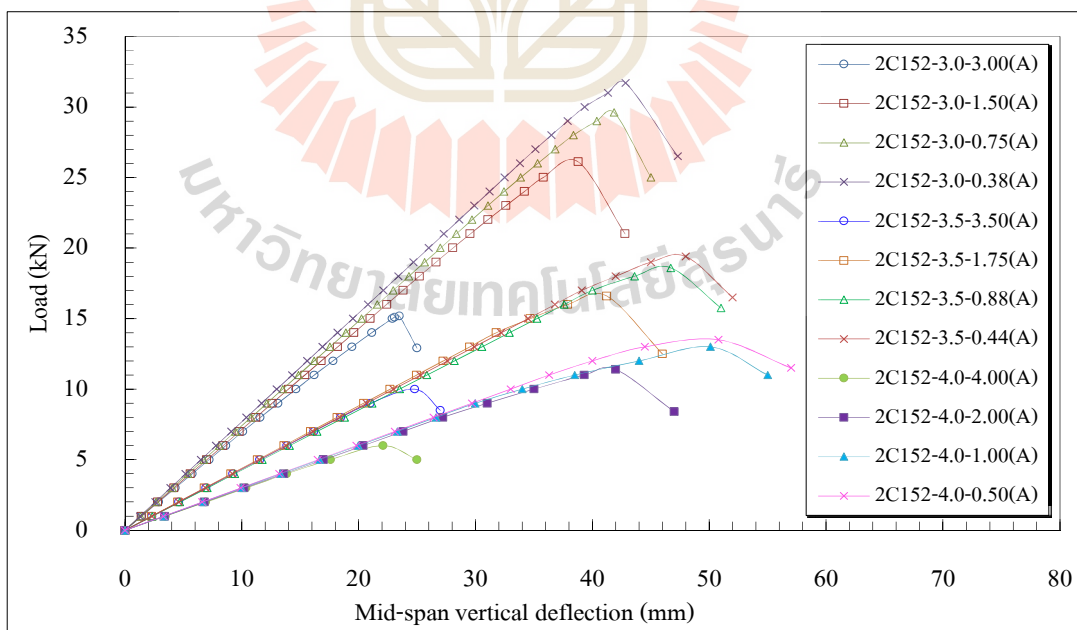
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างขนาด 2C102×29×6 mm ความยาว 0.7 ถึง 2.5 m



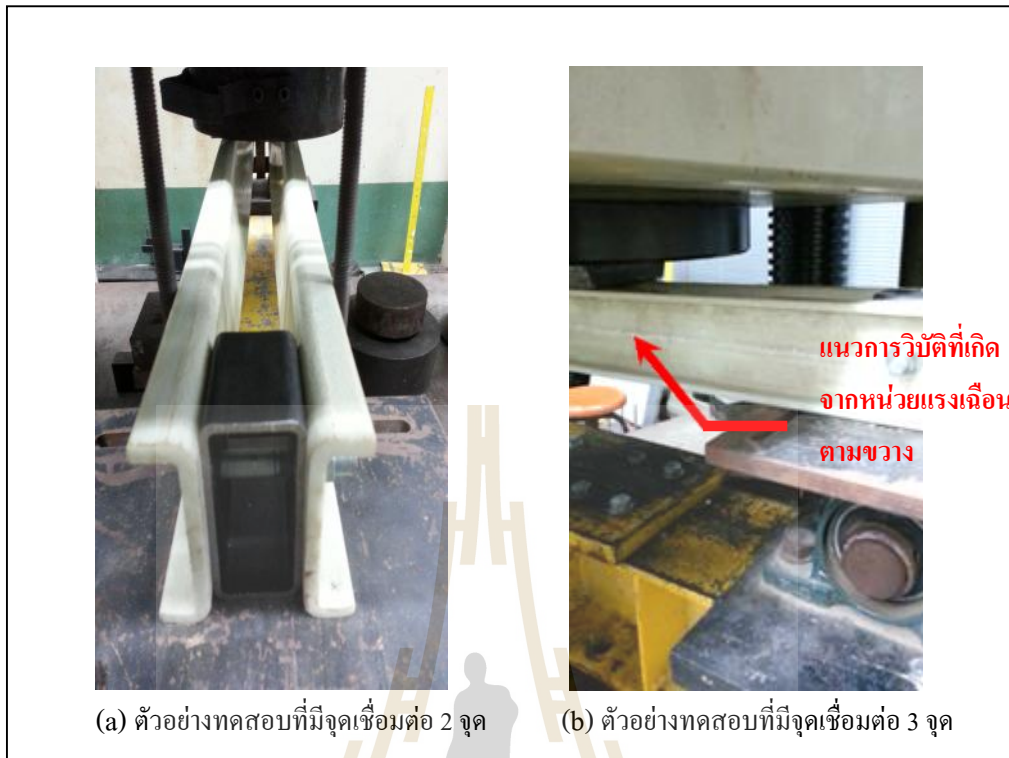
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างขนาด 2C102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างขนาด 2C152×43×10 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m



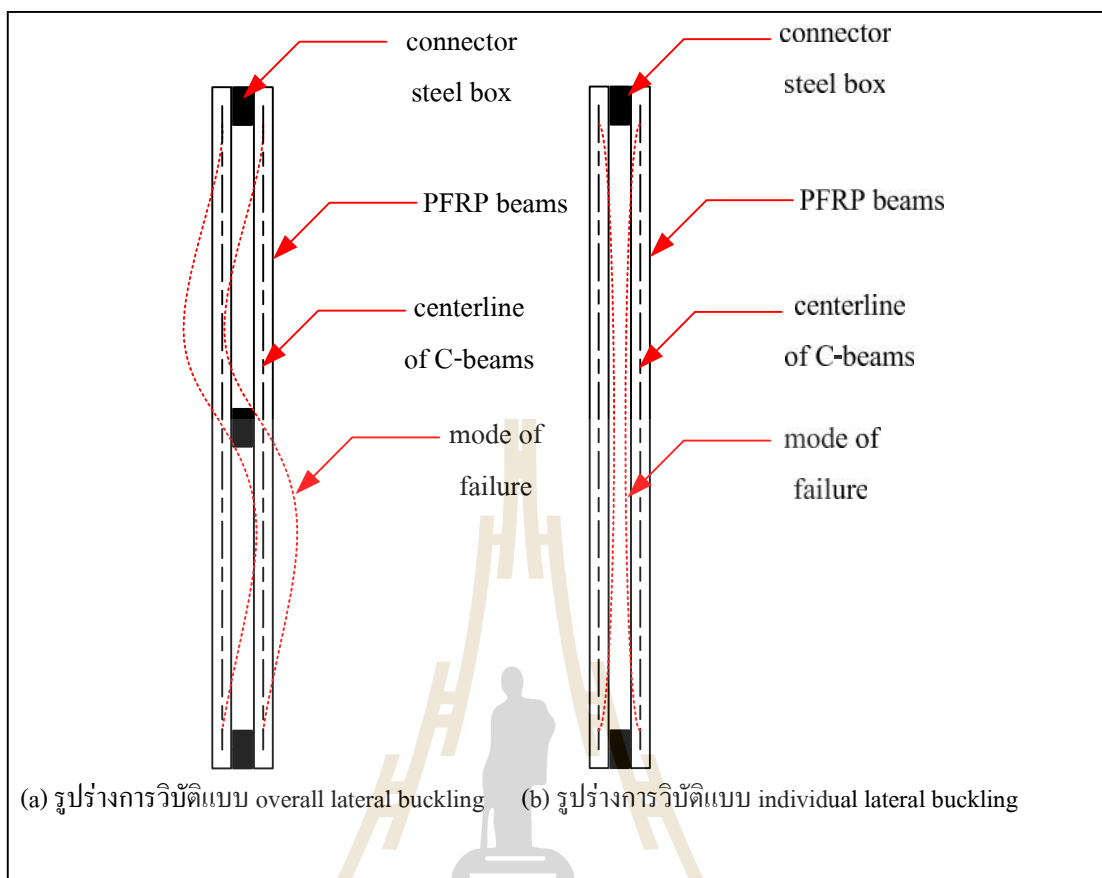
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคานของตัวอย่างขนาด 2C152×43×10 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m



รูปที่ 4.7 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$



รูปที่ 4.8 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$



รูปที่ 4.9 รูปร่างการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

4.3 กำลังของคานที่ได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน PFRP สำหรับตัวอย่างทดสอบขนาด $2C76 \times 22 \times 6$, $2C102 \times 29 \times 6$ และ $2C152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักวิกฤติ (critical load) คือน้ำหนักสูงสุดที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาว (L) ของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักสูงสุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่มีความยาวเท่ากันพบว่า คานตัวอย่างทดสอบที่มีขนาดหน้าตัด $2C152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $2C102 \times 29 \times 6$ และ $2C76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ และตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้มากขึ้นตามการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อ เนื่องจากหน้าตัดจะเป็น compact section

มากขึ้น และการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อยังช่วยในการยึดรั้งเพื่อช่วยลดการโก่งคดทางด้านข้างได้บางส่วนด้วย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C76×22×6 mm

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm × mm × mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A	Test B	Average
				$P_{cr,A}$ (kN)	$P_{cr,B}$ (kN)	$P_{cr,EXP}$ (kN)
2C76-0.5-0.50	76×22×6	0.5	0.50	11.80	11.50	11.65
2C76-0.5-0.25	76×22×6	0.5	0.25	23.20	22.70	22.95
2C76-0.7-0.70	76×22×6	0.7	0.70	11.52	11.02	11.27
2C76-0.7-0.35	76×22×6	0.7	0.35	22.44	22.54	22.49
2C76-1.0-1.00	76×22×6	1.0	1.00	10.82	11.18	11.00
2C76-1.0-0.50	76×22×6	1.0	0.50	20.22	21.02	20.62
2C76-1.5-1.50	76×22×6	1.5	1.50	8.06	8.50	8.28
2C76-1.5-0.75	76×22×6	1.5	0.75	11.42	11.50	11.46
2C76-2.0-2.00	76×22×6	2.0	2.00	3.90	4.02	3.96
2C76-2.0-1.00	76×22×6	2.0	1.00	4.70	4.58	4.64
2C76-2.0-0.50	76×22×6	2.0	0.50	5.52	5.30	5.41
2C76-2.5-2.50	76×22×6	2.5	2.50	2.02	2.10	2.06
2C76-2.5-1.25	76×22×6	2.5	1.25	2.90	2.80	2.85
2C76-2.5-0.63	76×22×6	2.5	0.63	3.42	3.28	3.35
2C76-3.0-3.00	76×22×6	3.0	3.00	1.30	1.32	1.31
2C76-3.0-1.50	76×22×6	3.0	1.50	2.32	2.24	2.28
2C76-3.0-0.75	76×22×6	3.0	0.75	2.54	2.58	2.56
2C76-3.0-0.38	76×22×6	3.0	0.38	2.64	2.72	2.68
2C76-3.5-3.50	76×22×6	3.5	3.50	1.08	1.10	1.09
2C76-3.5-1.75	76×22×6	3.5	1.75	1.74	1.70	1.72
2C76-3.5-0.88	76×22×6	3.5	0.88	2.00	2.10	2.05
2C76-3.5-0.44	76×22×6	3.5	0.44	2.32	2.30	2.31

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C76×22×6 mm (ต่อ)

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm × mm × mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A	Test B	Average
				$P_{cr,A}$ (kN)	$P_{cr,B}$ (kN)	$P_{cr,EXP}$ (kN)
2C76-4.0-4.00	76×22×6	4.0	4.00	0.40	0.44	0.42
2C76-4.0-2.00	76×22×6	4.0	2.00	0.60	0.54	0.57
2C76-4.0-1.00	76×22×6	4.0	1.00	0.92	0.90	0.91
2C76-4.0-0.50	76×22×6	4.0	0.50	1.20	1.28	1.24

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C102×29×6 mm

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm × mm × mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A	Test B	Average
				$P_{cr,A}$ (kN)	$P_{cr,B}$ (kN)	$P_{cr,EXP}$ (kN)
2C102-0.7-0.70	102×29×6	0.5	0.70	17.60	17.50	17.55
2C102-0.7-0.35	102×29×6	0.5	0.35	30.82	31.00	30.91
2C102-1.0-1.00	102×29×6	0.7	1.00	16.50	16.02	16.26
2C102-1.0-0.50	102×29×6	0.7	0.50	29.00	29.02	29.01
2C102-1.5-1.50	102×29×6	1.0	1.50	14.04	14.00	14.02
2C102-1.5-0.75	102×29×6	1.0	0.75	22.00	22.20	22.10
2C102-2.0-2.00	102×29×6	1.5	2.00	10.02	10.00	10.01
2C102-2.0-1.00	102×29×6	1.5	1.00	13.50	13.70	13.60
2C102-2.0-0.50	102×29×6	2.0	0.50	15.62	15.44	15.53
2C102-2.5-2.50	102×29×6	2.0	2.50	6.00	6.12	6.06
2C102-2.5-1.25	102×29×6	2.0	1.25	8.04	7.88	7.96
2C102-2.5-0.63	102×29×6	2.5	0.63	9.20	9.00	9.10
2C102-3.0-3.00	102×29×6	3.0	3.00	4.00	4.04	4.02
2C102-3.0-1.50	102×29×6	3.0	1.50	5.02	5.10	5.06
2C102-3.0-0.75	102×29×6	3.0	0.75	5.80	5.90	5.85

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C102×29×6 mm (ต่อ)

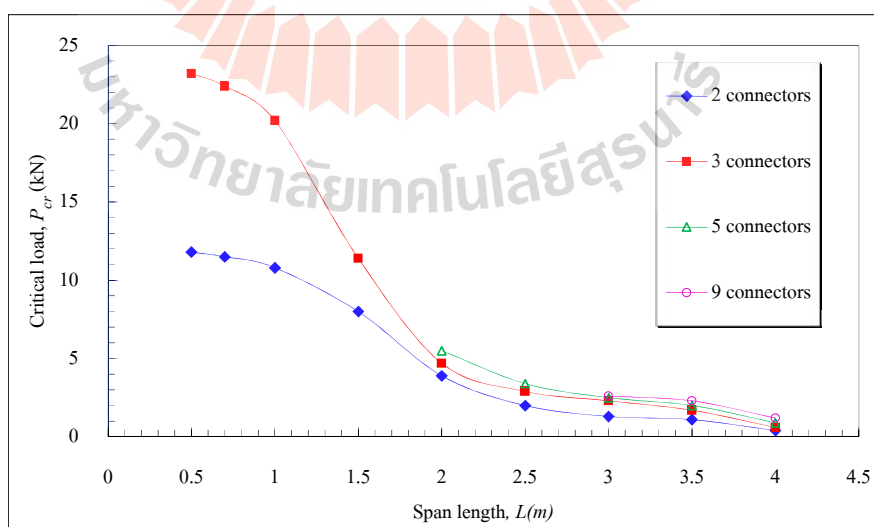
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm×mm×mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A	Test B	Average
				$P_{cr,A}$ (kN)	$P_{cr,B}$ (kN)	$P_{cr,EXP}$ (kN)
2C102-3.5-3.50	102×29×6	3.5	3.50	3.02	3.00	3.01
2C102-3.5-1.75	102×29×6	3.5	1.75	3.82	3.80	3.81
2C102-3.5-0.88	102×29×6	3.5	0.88	4.34	4.22	4.28
2C102-3.5-0.44	102×29×6	3.5	0.44	4.50	4.64	4.57
2C102-4.0-4.00	102×29×6	4.0	4.00	2.20	2.28	2.24
2C102-4.0-2.00	102×29×6	4.0	2.00	3.02	3.10	3.06
2C102-4.0-1.00	102×29×6	4.0	1.00	3.42	3.48	3.45
2C102-4.0-0.50	102×29×6	4.0	0.50	3.60	3.58	3.59

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C152×43×10 mm

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm×mm×mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A	Test B	Average
				$P_{cr,A}$ (kN)	$P_{cr,B}$ (kN)	$P_{cr,EXP}$ (kN)
2C152-1.0-1.00	152×43×10	1.0	1.00	47.00	47.50	47.25
2C152-1.0-0.50	152×43×10	1.0	0.50	76.80	76.76	76.78
2C152-1.5-1.50	152×43×10	1.5	1.50	44.02	44.80	44.41
2C152-1.5-0.75	152×43×10	1.5	0.75	74.00	74.60	74.30
2C152-2.0-2.00	152×43×10	2.0	2.00	38.04	38.22	38.13
2C152-2.0-1.00	152×43×10	2.0	1.00	64.12	64.00	64.06
2C152-2.0-0.50	152×43×10	2.0	0.50	72.10	72.88	72.49
2C152-2.5-2.50	152×43×10	2.5	2.50	24.80	25.00	24.90
2C152-2.5-1.25	152×43×10	2.5	1.25	42.04	42.88	42.46
2C152-2.5-0.63	152×43×10	2.5	0.63	47.30	48.04	47.67

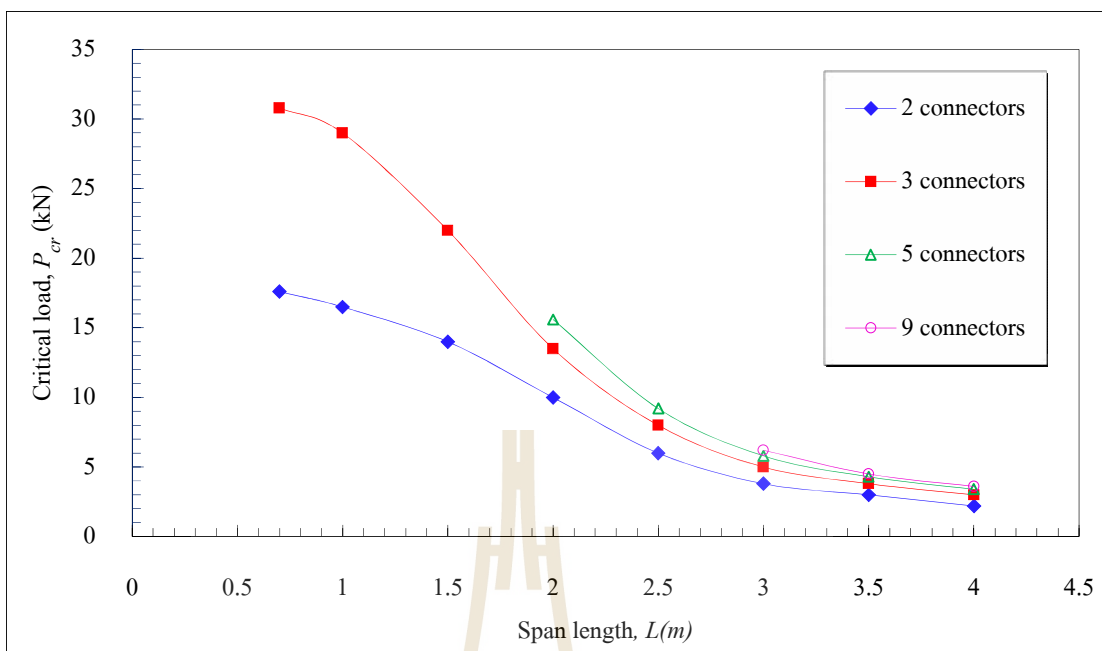
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 2C152×43×10 mm (ต่อ)

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm × mm × mm)	L (m)	Connectors spacing (m)	Experiment		
				Test A $P_{cr,A}$ (kN)	Test B $P_{cr,B}$ (kN)	Average $P_{cr,EXP}$ (kN)
2C152-3.0-3.00	152×43×10	3.0	3.00	15.20	15.68	15.44
2C152-3.0-1.50	152×43×10	3.0	1.50	26.16	26.56	26.36
2C152-3.0-0.75	152×43×10	3.0	0.75	29.62	30.00	29.81
2C152-3.0-0.38	152×43×10	3.0	0.38	31.70	31.54	31.62
2C152-3.5-3.50	152×43×10	3.5	3.50	10.02	10.08	10.05
2C152-3.5-1.75	152×43×10	3.5	1.75	16.68	17.02	16.85
2C152-3.5-0.88	152×43×10	3.5	0.88	18.60	18.86	18.73
2C152-3.5-0.44	152×43×10	3.5	0.44	19.42	19.54	19.48
2C152-4.0-4.00	152×43×10	4.0	4.00	6.00	6.06	6.03
2C152-4.0-2.00	152×43×10	4.0	2.00	11.40	11.48	11.44
2C152-4.0-1.00	152×43×10	4.0	1.00	13.02	13.00	13.01
2C152-4.0-0.50	152×43×10	4.0	0.50	13.50	13.44	13.47

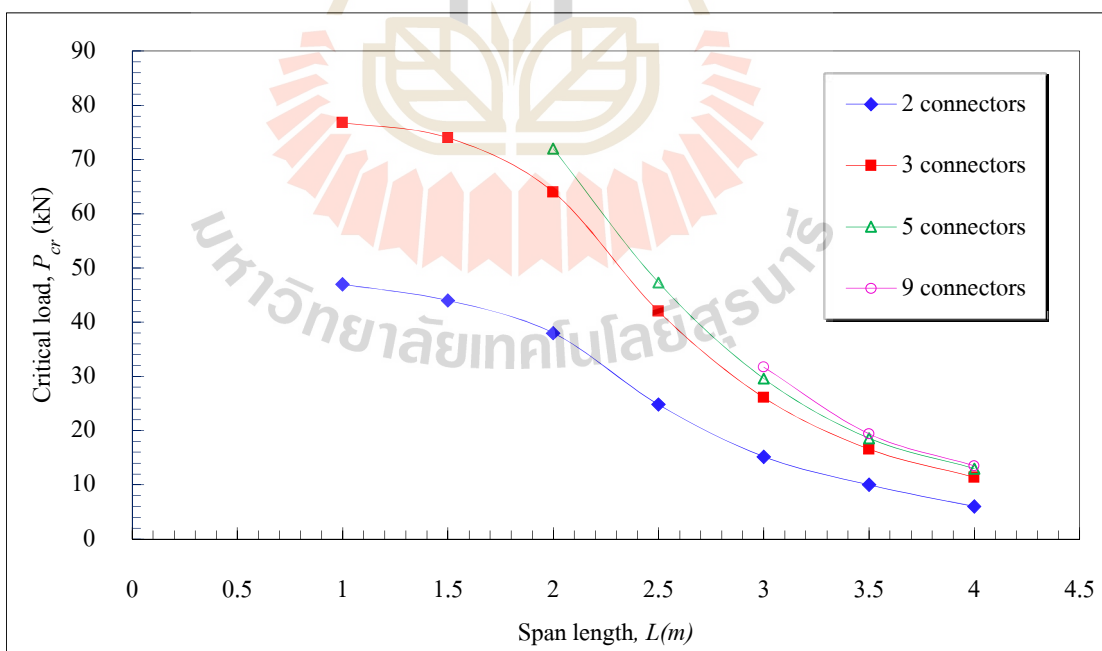


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน FRP

ขนาด 2C76×22×6 mm



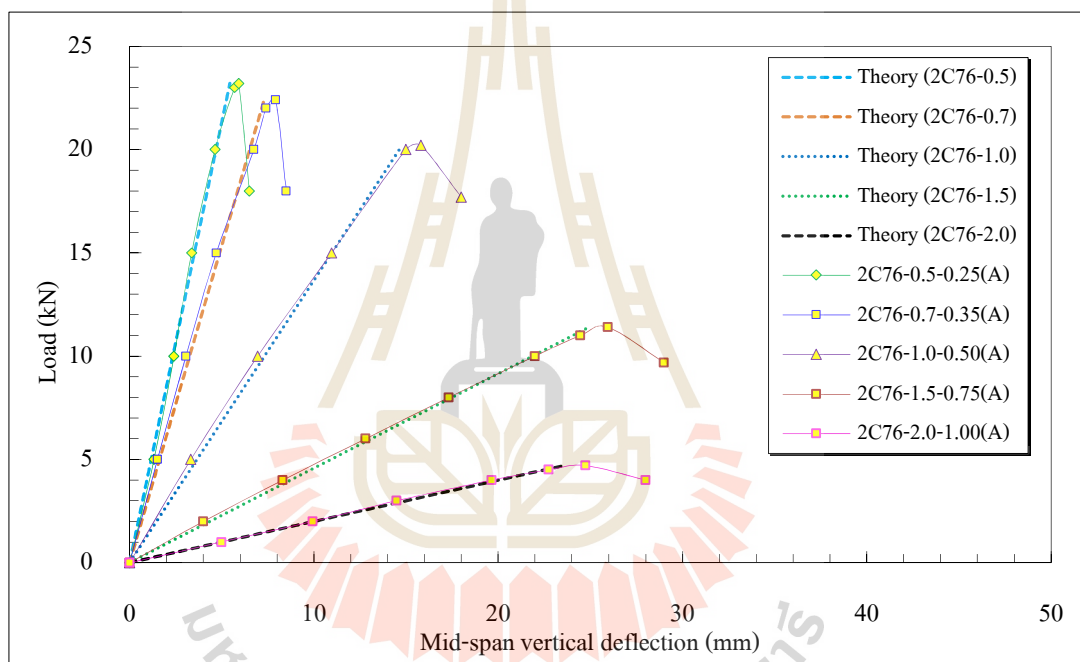
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 2C102×29×6 mm



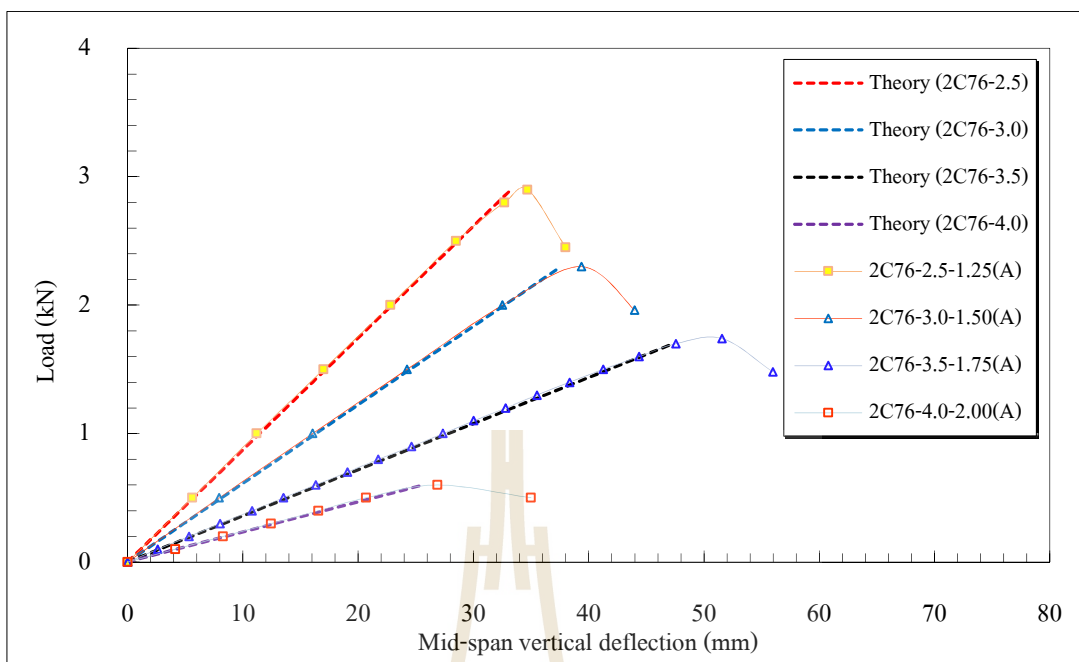
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 2C152×43×10 mm

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่ได้จากการทดสอบ

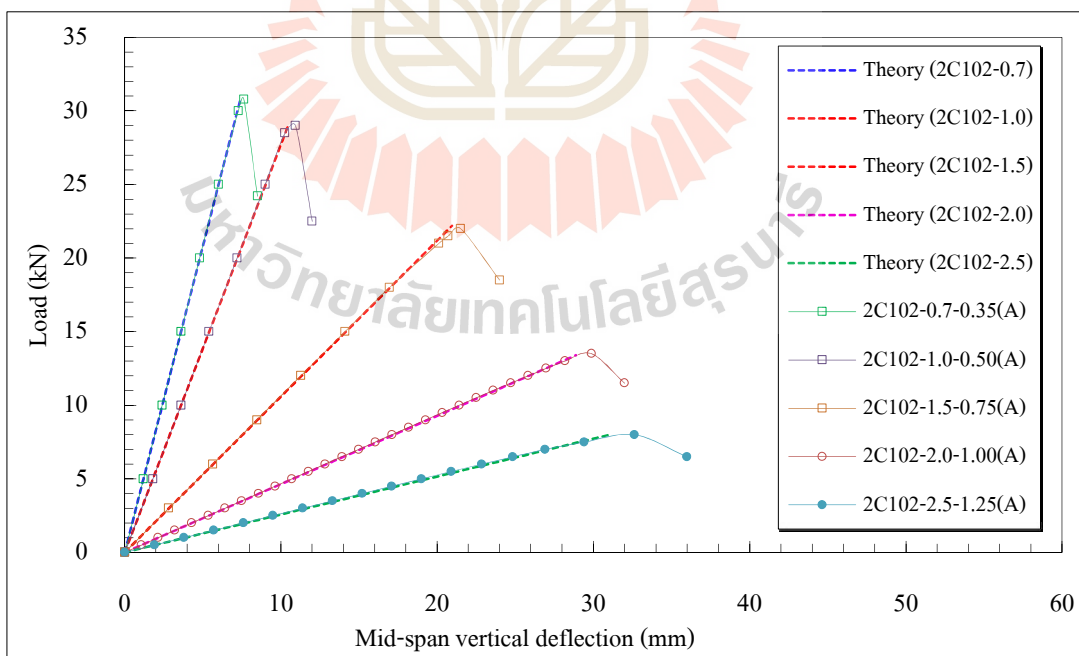
รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (3.4) จากรูปพบว่าระยะการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีของ Euler-Bernoulli สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้กับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะอยู่ในช่วง 5-10 %



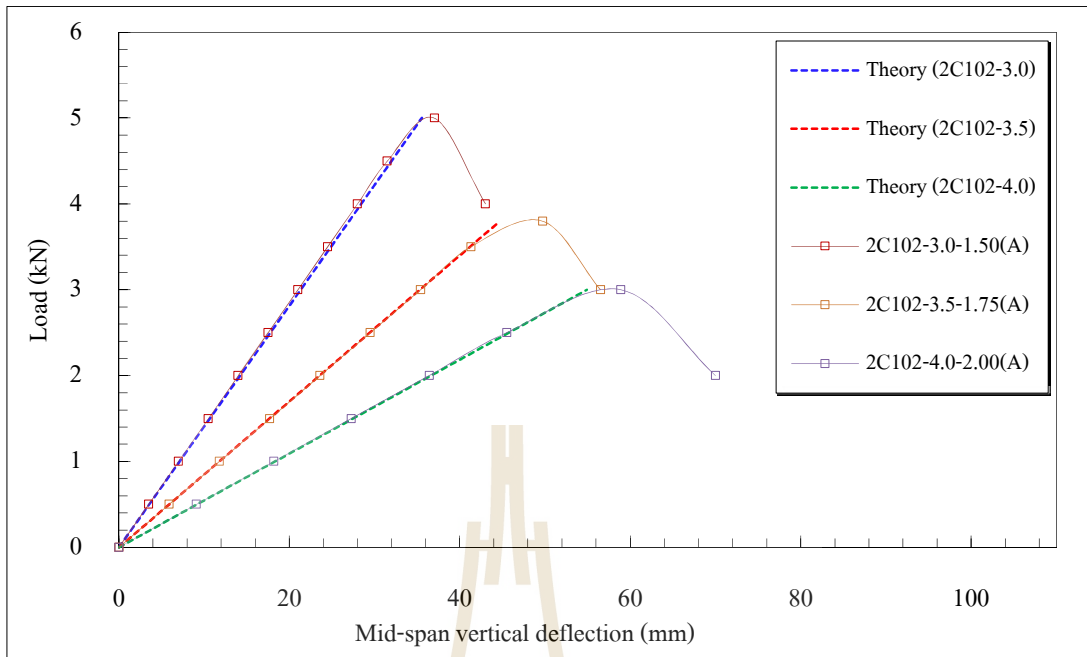
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ความยาว 0.5 ถึง 2.0 m



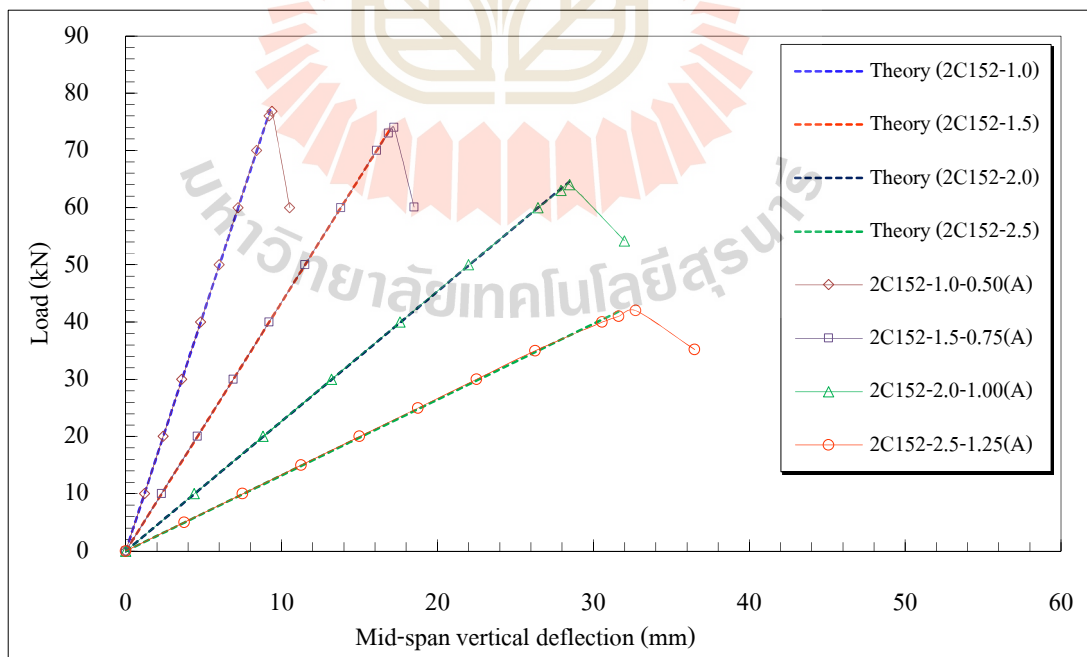
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ความยาว 2.5 ถึง 4.0 m



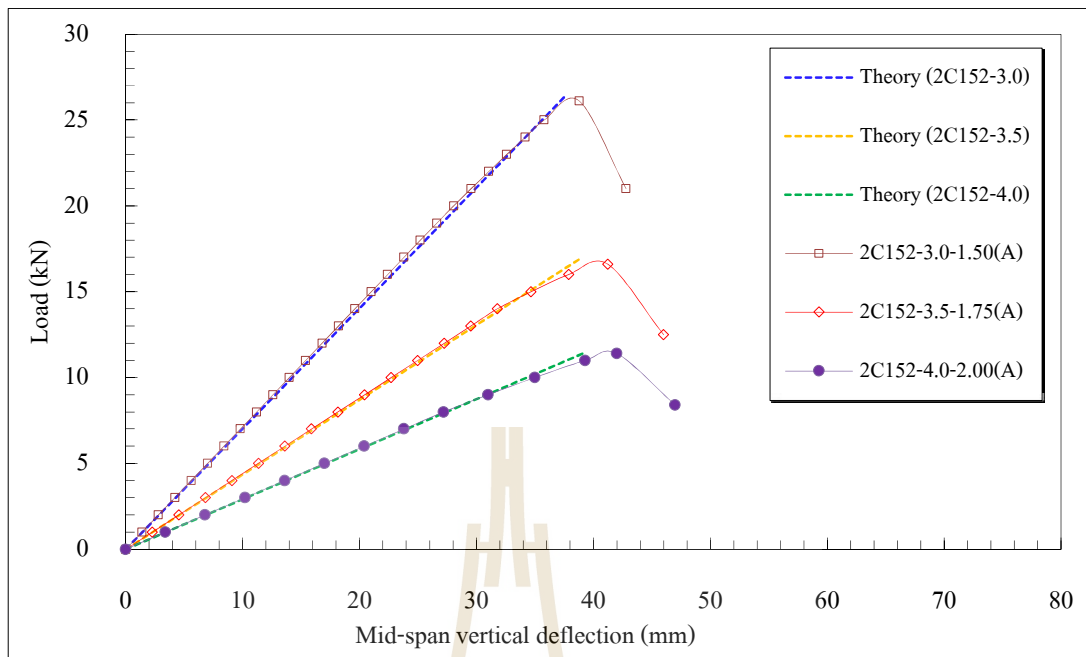
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ความยาว 0.7 ถึง 2.5 m



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m



รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m

สำหรับค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้ง (K) สามารถนำมาคำนวณหาค่า โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity, E) ได้ดังสมการที่ 4.3 ซึ่งค่า E ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 12.2 ถึง 37.3 GPa ดังแสดงในตารางที่ 4.4

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (4.1)$$

$$\frac{P}{\Delta} = \frac{48EI}{L^3} = K \quad (4.2)$$

$$E = \frac{KL^3}{48I} \quad (4.3)$$

ค่า E ของตัวอย่างทดสอบจะมีค่าตั้งแต่ 12.20 ถึง 37.25 GPa. โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อ $L/d < 10$ เนื่องจากมีผลของโมดูลัสแรงเฉือน (G) เข้ามาเกี่ยวข้อง (Bank, 1987) ในช่วงที่ $L/d > 10$ ค่า E มีแนวโน้มที่จะคงที่ โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ ดังตารางที่ 4.4 ถึง

ตารางที่ 4.6 และจะเห็นได้ว่าเมื่อเทียบกับโครงสร้างเหล็กที่ค่า $E = 200$ GPa. แล้ว ค่า E ของ FRP จะต่ำกว่าเหล็กอยู่ประมาณ 6 เท่า ดังนั้นค่าการ โกงตัวจึงเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงในการ ออกแบบโครงสร้าง FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

ตารางที่ 4.4 ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C76

Specimens	L/d	Modulus of Elasticity, E (GPa)
2C76-0.5	6.6	12.20*
2C76-0.7	9.2	24.09*
2C76-1.0	13.2	31.27
2C76-1.5	19.7	35.32
2C76-2.0	26.3	36.50
2C76-2.5	32.9	31.17
2C76-3.0	39.5	37.25
2C76-3.5	46.1	35.22
2C76-4.0	52.6	34.27

ตารางที่ 4.5 ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C102

Specimens	L/d	Modulus of Elasticity, E (GPa)
2C102-0.7	6.9	12.73*
2C102-1.0	9.8	24.73*
2C102-1.5	14.7	31.79
2C102-2.0	19.6	33.13
2C102-2.5	24.5	35.96
2C102-3.0	29.4	33.90
2C102-3.5	34.3	31.20
2C102-4.0	39.2	32.50

ตารางที่ 4.6 ค่า Modulus of Elasticity, E ของตัวอย่างทดสอบขนาด 2C152

Specimens	L/d	Modulus of Elasticity, E (GPa)
2C152-1.0	6.6	13.85*
2C152-1.5	9.9	24.40*
2C152-2.0	13.2	30.22
2C152-2.5	16.4	34.42
2C152-3.0	19.7	31.55
2C152-3.5	23.0	30.68
2C152-4.0	26.3	29.77

* ค่า Modulus of Elasticity (E) ที่มีผลกระทบของค่า Shear Modulus (G) เข้ามาเกี่ยวข้อง (Bank, 1987)

4.5 การเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โค้งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.4)

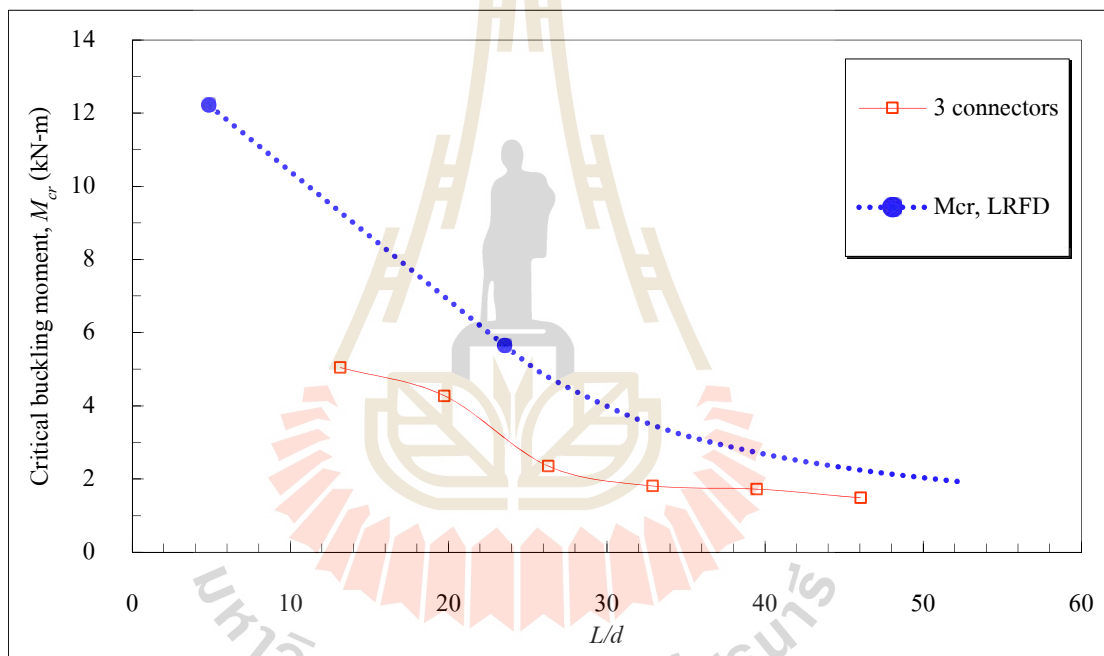
$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L/4 \quad (4.4)$$

4.5.1 ตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุด

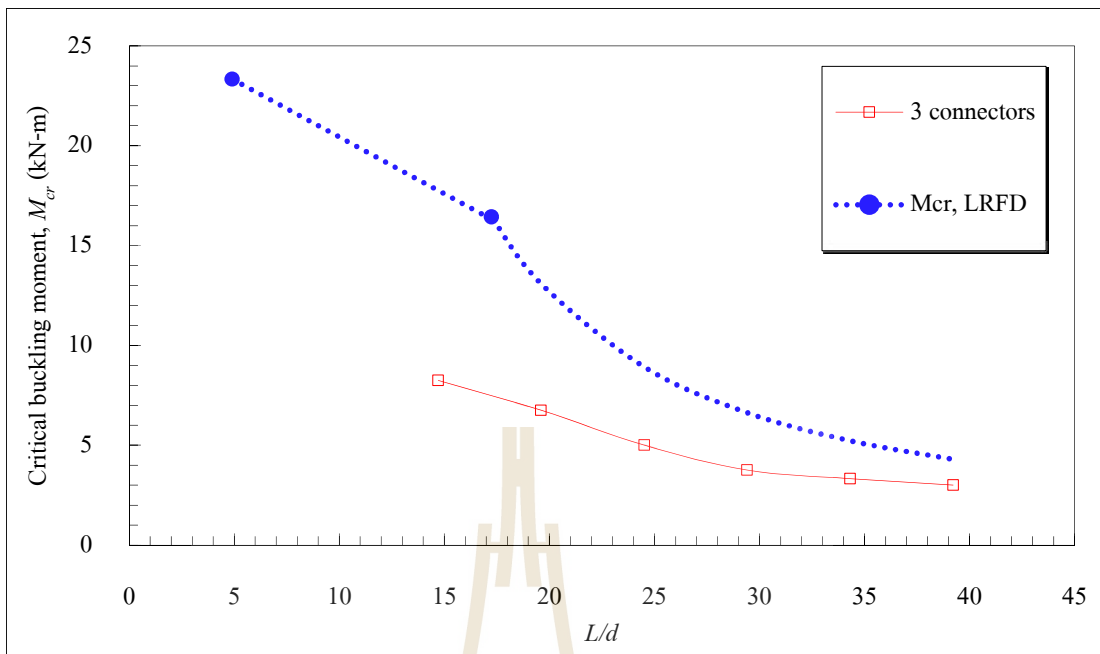
รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบ และโมเมนต์โค้งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.3) โดยมีอัตราส่วน L/d อยู่ในช่วง 10-50 เท่านั้น เนื่องจากคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ เป็นคานที่สั้นมากจนแทบไม่ได้มีการนำมาใช้งานและการวิบัติไม่ได้เกิดการโค้งเดาะจึงไม่นำมาพิจารณาค่าโมเมนต์โค้งเดาะและคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 50$ เป็นคานที่ยาวมากและขาดเสถียรภาพจนแทบรับแรงกระทำไม่ได้จึงไม่นำมาพิจารณา จากรูปพบว่าหาก

พิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

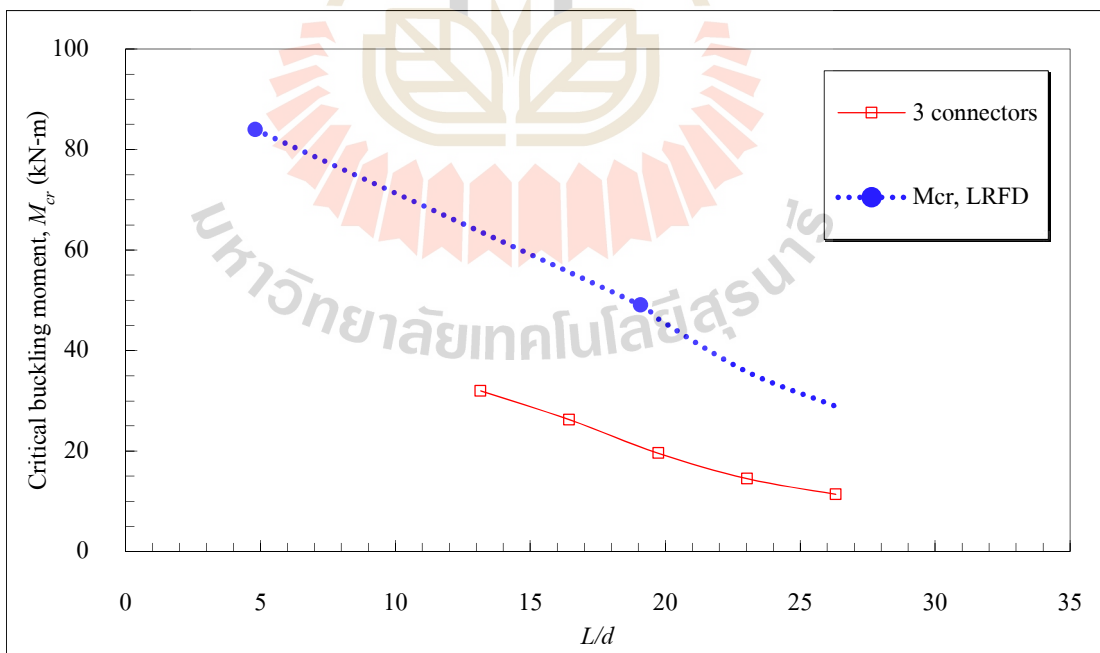
นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) จะมีอัตราส่วน อยู่ระหว่าง 0.4 – 0.7 สาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD เนื่องมาจากหน้าตัดของตัวอย่างคานเป็น partially compact section จึงรับแรงได้ไม่เต็มที่ และสมการของ LRFD นั้นถูกคำนวณมาจากหน้าตัดซึ่งเป็น fully compact section และวัสดุทำจากเหล็ก จึงทำให้ได้ค่าโมเมนต์โก่งเดาะที่สูงกว่าการทดสอบค่อนข้างมาก



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm

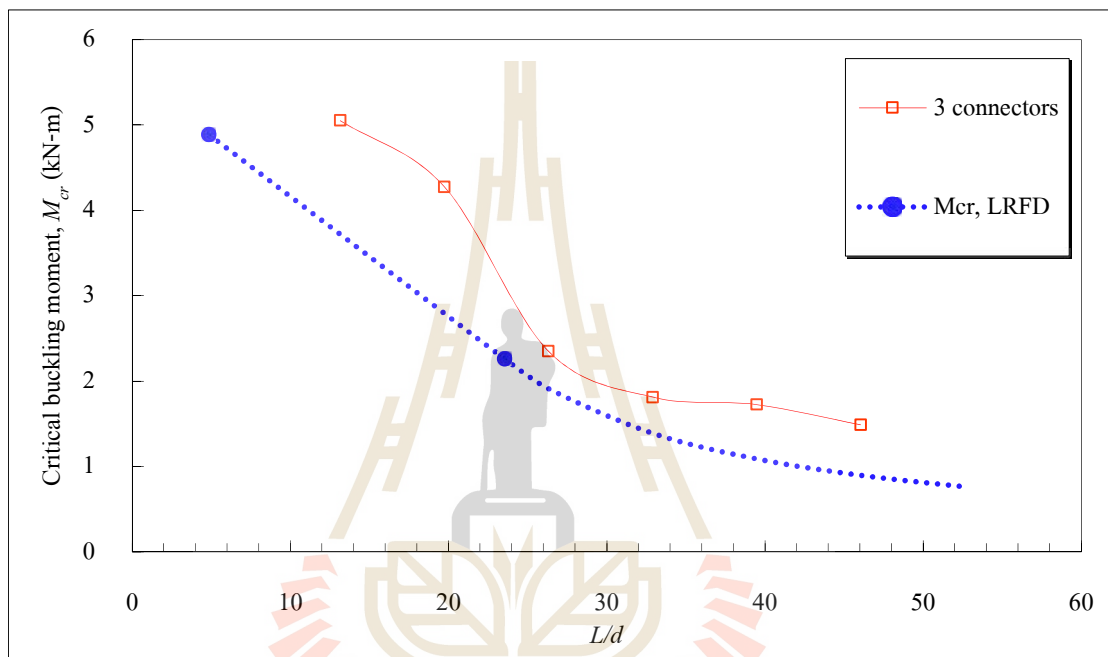


รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm

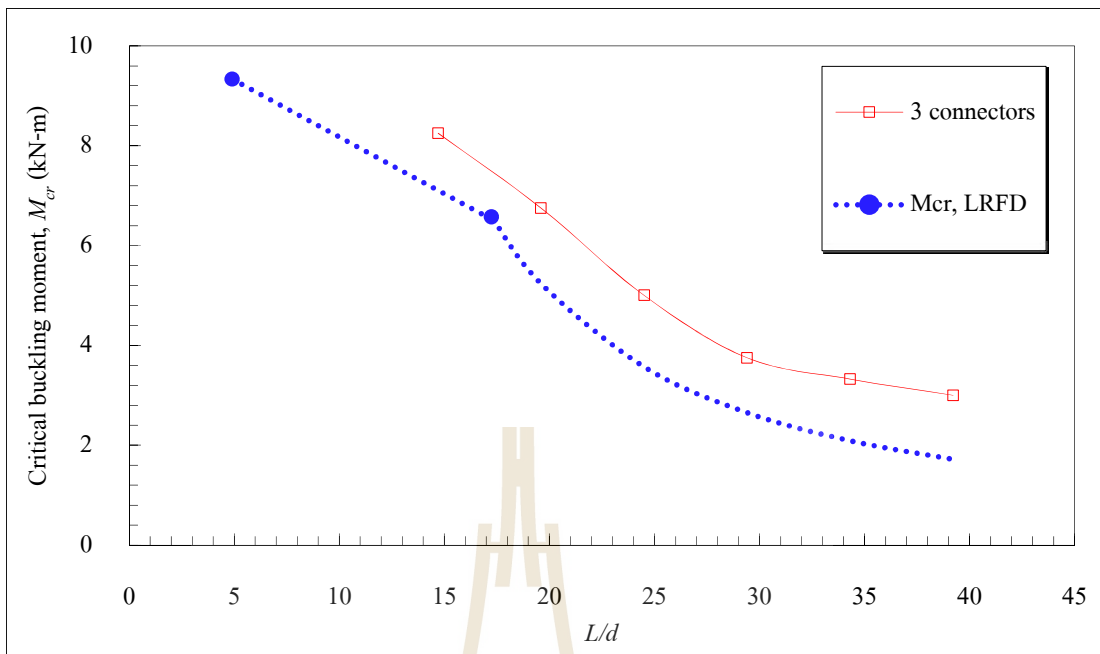


รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm

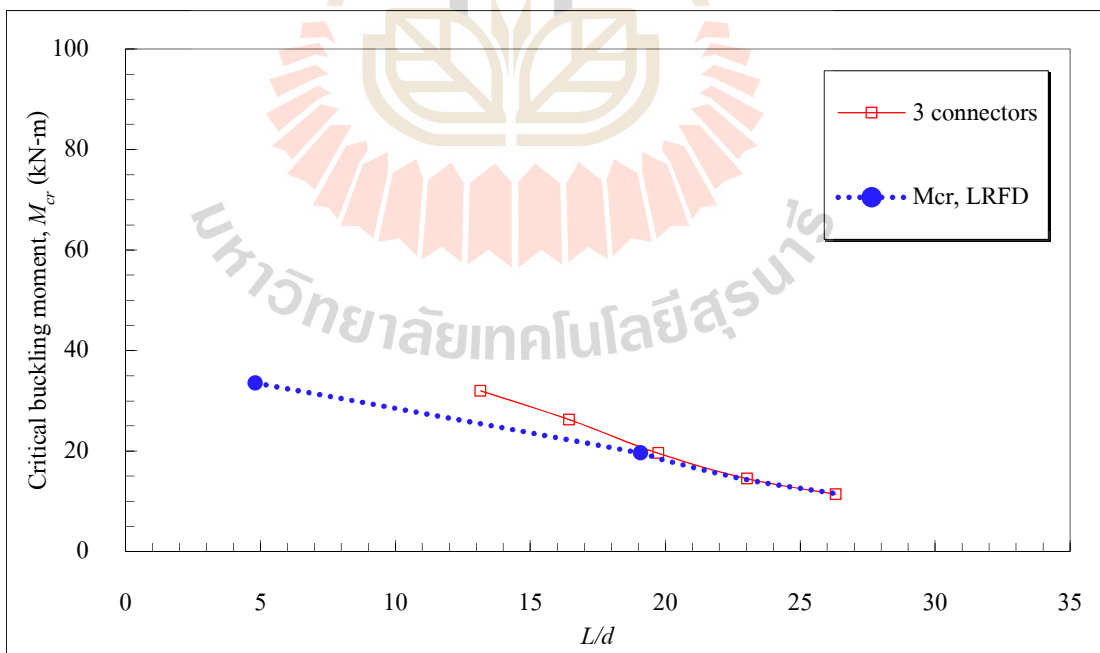
เนื่องจากค่าโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบต่างจากโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD มาก จึงเสนอให้มีการใช้ reduction factor (R) เท่ากับ 0.4 เพื่อลดกำลังของโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ดังรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 ซึ่งค่า $R = 0.4$ นี้จะไปคล้ายกับการหารด้วย factor of safety เท่ากับ 2.5 ของการออกแบบโครงสร้างพลาสติกที่รับแรงดัดโดยวิธี ASD (ASCE, 1984)



รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C76×22×6 mm ที่มีค่า $R = 0.4$



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C102×29×6 mm ที่มีค่า $R = 0.4$

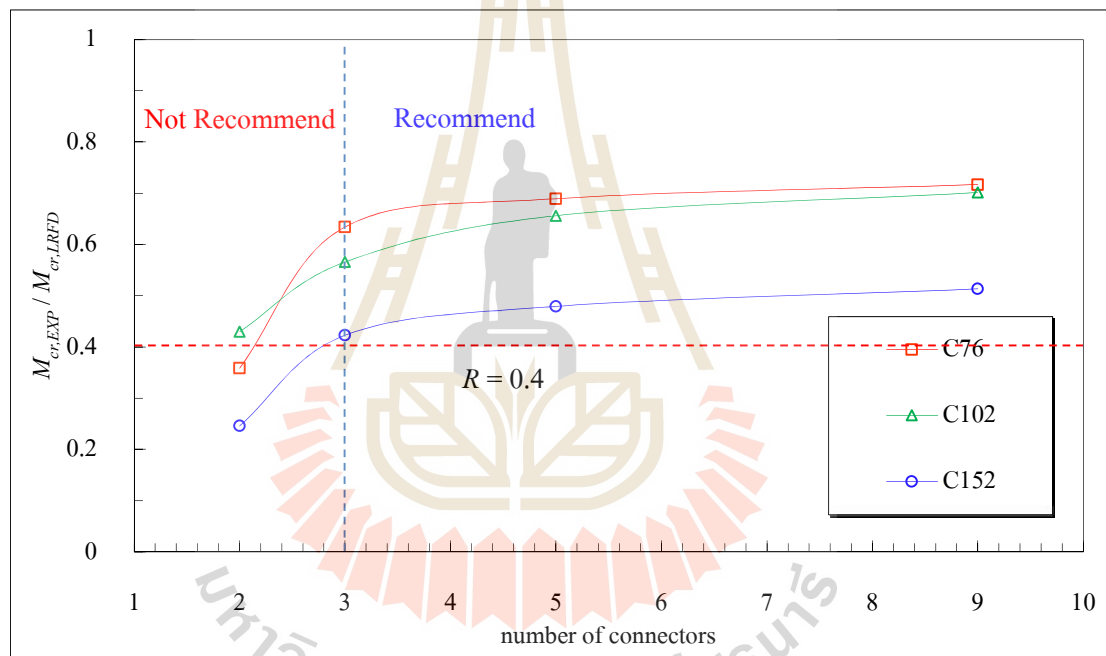


รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วนความยาว ต่อความลึกของตัวอย่างคาน 2C152×43×10 mm ที่มีค่า $R = 0.4$

4.5.2 ตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 2, 5 และ 9 จุด

รูปที่ 4.25 แสดงอัตราส่วนระหว่าง ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) และจำนวนจุดเชื่อมต่อ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อจาก 3 จุด ไปเป็น 5 และ 9 จุดเชื่อมต่อ จะทำให้โมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าเข้าใกล้โมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการ LRFD มากขึ้น แต่ค่าโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าเพียงเล็กน้อยอยู่ระหว่าง 5-15% ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นแบบไม่ได้มีนัยสำคัญ

ในส่วนของจุดเชื่อมต่อ 2 จุด จะเห็นได้ว่าลักษณะของการวิบัติไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน ดังรูปที่ 4.7 (a) และ 4.8 (a) อีกทั้งค่าโมเมนต์ที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้จุดเชื่อมต่อแบบ 3 จุด ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 อัตราส่วนระหว่าง ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) และจำนวนจุดเชื่อมต่อ

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงคด ที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported) โดยมีจำนวนจุดเชื่อมต่อ (connectors) ที่ต่างกัน และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

5.2 สรุปผลทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน PFRP

พฤติกรรมการรับแรงกระทำของคานจะมีลักษณะยืดหยุ่นเชิงเส้นตรง (linear elastic) จนถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมของคานจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) เล็กน้อยจนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

5.2.2 ลักษณะการวิบัติของคาน PFRP

ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้
กลุ่มที่ 1 วิบัติโดยการ โกงเดาะทางด้านข้างแบบเดี่ยว (individual lateral buckling) เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อเพียง 2 จุด โดยมีอัตราส่วน L/d ตั้งแต่ 6.6 จนถึง 52.6

กลุ่มที่ 2 วิบัติโดยการ โกงเดาะทางด้านข้างแบบองค์รวม (overall lateral buckling) เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 3 จุดขึ้นไปจนถึง 9 จุด โดยมีอัตราส่วน $L/d > 10$

กลุ่มที่ 3 วิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) เกิดขึ้นกับตัวอย่างคานที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุดขึ้นไปจนถึง 9 จุด โดยมีอัตราส่วน $L/d < 10$

5.2.3 กำลังของคาน PFRP ที่ได้จากการทดสอบ

กำลังของคานมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างคานมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อ นั้นกำลังของคานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนของจุดเชื่อมต่อ โดยจะแบ่งคานออกเป็น 3 ช่วงตามอัตราส่วน L/d ดังนี้

- 1) คานสั้น อัตราส่วน $L/d < 10$ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อกันจาก 2 จุด ไปเป็น 3 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นประมาณ 60-100%
- 2) คานยาวปานกลาง อัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 10 ถึง 30 เมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อกันจาก 2 จุด ไปเป็น 3 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นประมาณ 30-85% แต่เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อกันจาก 3 จุด ไปเป็น 5 และ 9 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 10% และ 5% ตามลำดับ
- 3) คานยาว อัตราส่วน $L/d > 30$ เมื่อทำการเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อกันจาก 2 จุด ไปเป็น 3 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นประมาณ 20-75% แต่เมื่อเพิ่มจุดเชื่อมต่อกันจาก 3 จุด ไปเป็น 5 และ 9 จุด กำลังของคานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 15% และ 7% ตามลำดับ

5.2.4 เปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน FRP

การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน โดยใช้สมการของ Euler-Bernoulli สามารถทำนายค่าการแอ่นตัวได้ใกล้เคียงและถูกต้องเพียงพอ โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ประมาณ 5-10% สาเหตุที่ค่าการแอ่นตัวที่ทดสอบได้มีค่ามากกว่าสมการของ Euler-Bernoulli นั้นเกิดจากช่วงก่อนการวิบัติคานมีพฤติกรรมเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จึงทำให้การแอ่นตัวมีค่ามากกว่าสมการอยู่เล็กน้อย

5.2.5 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

เมื่อทำการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะที่ได้จากการทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD พบว่ามีค่าต่ำกว่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.7 สาเหตุที่โมเมนต์โค้งเดาะมีค่าต่ำกว่าสมการออกแบบของ LRFD เนื่องมาจากหน้าตัดที่ใช้ในการคำนวณของสมการ LRFD นั้น ถูกคำนวณมาจากหน้าตัดซึ่งเป็น fully compact section แต่จากการทดสอบหน้าตัดเป็นเพียง partially compact section และวัสดุทำจากเหล็ก โครงสร้างจึงทำให้รับแรงกระทำได้ไม่เต็มที่

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน

ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้งาน ควรออกแบบโดยคำนึงถึงค่าการโค้งตัวของคานเป็นหลักเนื่องจากค่า E ของคาน FRP มีค่าน้อยกว่าเหล็กถึงประมาณ 6 เท่า สำหรับค่าโมเมนต์โค้งเดาะคานที่มีอัตราส่วน $L/d > 10$ นั้นให้ออกแบบตามสมการของ LRFD โดยออกแบบให้มีจุดเชื่อมต่ออย่างน้อย 3 จุด เพื่อจะได้คุ้มค่ากับหน้าตัดคานที่นำมาใช้งาน และใช้ตัวคูณลดกำลัง (reduction factor) เท่ากับ 0.4 ลดกำลังในส่วนของสมการ LRFD ทั้งนี้การใช้จุดเชื่อมต่อที่เกิน 3 จุดจะขึ้นกับ

วิจารณ์งานของผู้ออกแบบเนื่องจากกำลังที่ได้จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้ ไม่แนะนำให้ใช้งานในส่วนของคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ และคานที่มีจุดเชื่อมต่อเพียง 2 จุด เนื่องจากเกิดการวิบัติที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีพารามิเตอร์และข้อจำกัดอยู่มาก การนำผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ตลอดจนสมการออกแบบที่นำเสนอในการศึกษาครั้งนี้ไปใช้ในงานก่อสร้างจริงนั้น วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานต้องใช้วิจารณญาณ โดยคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ คุณภาพการก่อสร้าง ขนาดหน้าตัด ความยาวของคาน วัสดุที่ใช้ทำจุดเชื่อมต่อ รวมทั้งลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยเป็นหลักด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของคานประกอบหน้าตัดรางน้ำคู่ภายใต้แรงคดโดยใช้พารามิเตอร์เป็นระยะห่างระหว่างหน้าตัด
- 2) ศึกษาพฤติกรรมการวิบัติของคานประกอบหน้าตัดรางน้ำคู่ภายใต้แรงคด โดยใช้แบบจำลองจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

รายการอ้างอิง

- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2542). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุใยแก้วเสริมพลาสติก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5. หน้า MAT-202-MAT-207, ชลบุรี, 24-26 มีนาคม 2542.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. (2552). การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ. รายงานฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Adams, D.F., and Walrath, D.E. (1982). Iosipescu shear properties of SMC composite materials. **Composite Materials: Testing and Design (sixth conference)**. ASTM STP 787. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.:19-33.
- Adams, D.F., and Walrath, D.E. (1987). Further development of the iosipescu shear test method. **Exp. Mech.** 27(2): 113-119.
- Agarwal, B.D., Broutman, L.J., and Chandrashekhara, K. (2006). **Analysis and Performance of Fiber Composites**. (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- 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.
- 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. (1987). Shear coefficients for thin-walled composite beams. **Composite Structures**. 8: 47-61.
- Bank, L.C. (1989a). Flexural and shear moduli of full-section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. **Journal of Testing and Evaluation**. 17(1): 40-45.

- Bank, L.C. (1989b). Shear properties of pultruded glass FRP materials. **ASCE Structures Congress**. San Francisco, California.
- Bank, L.C. (2006). **Composites and Construction: Structural Design with FRP Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Bank, L.C., and Melehan, T.P. (1989). Shear coefficients for multicelled thin-walled composite beams. **Composite Structures**. 11: 259-276.
- Bank, L.C., Barkatt, A., and Gentry, T.R. (1995). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 14(6): 559-587.
- Bank, L.C., Mosallam, A.S., and Gonsior, H.E. (1990). Beam-to-column connections for pultruded FRP structures. **Proceedings of the 1st 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., Fu, S.H., and Raftoyiannis, I. (1991). Ultimate bending strength of composite beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 3(4): 292-306.
- Bedford. (2005). **Bedford Reinforced Plastics Design Guide**. Bedford, Pennsylvania: Bedford Plastic.
- Brooks, R.J., and Turvey, G.J. (1995). Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers. **Composite Structures**. 32(1-4): 203-215.
- 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.
- Cowper, G.R. (1966). The shear coefficient in Timoshenko's beam theory. **J Appl Mech Trans**. ASME 33: 335-340.
- 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.
- Davalos, J.F., Qiao, P.Z., and Salim, H.A. (1997). Flexure-torsional buckling of pultruded fiber reinforced plastic composite I-beams: experimental and analytical evaluations. **Composite Structures**. 38(1-4): 241-250.
- 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.
- Fibreforce. (2002). **Composite Profiles**. Essex, United Kingdom: Fibreforce.
- Gaylord, Jr., E. H., Gaylord, C. N., and Stallmeyer, J. E. (1992). **Design of Steel Structures**. (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- Goldsworthy, B. (1954). The continuous extrusion of RP. **Proceeding of the 9th 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.
- Harte, A.M., and Fleck, N.A. (2000). Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion. **Acta Materialia**. 48(6), 1259-1271.
- Hodgkinson, J. M. (2000). **Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites**. Cambridge, England: Woodhead Pub. Limited.
- Hofer, Jr., K.E., and Rao, P.N. (1977). A new static compression fixture for advanced composite materials. **J. Testing Eval**. 5(4): 278-283.
- Iosipescu, N. (1967). New accurate procedure for single shear testing of metals. **Journal of Materials**. 2(3): 537-566.
- Jones, R.M. (1975). **Mechanics of Composite Materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Kabir, M.Z., and Sherbourne, A.N. (1998). Optimal fibre orientation in lateral stability of laminated channel section beams. **Composites Part B: Engineering**. 29(1): 81-87.
- Kassimali, A. (1999). **Matrix analysis of structures**. California: Brooks/Cole Publishing Company.

- Keller, T. (1999). Towards structural forms for composite fiber materials. **Structural Engineering International**. 9(4): 297-300.
- 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.
- Kelly, A., and Zweben, C. (2000). **Comprehensive Composite Materials**. Vol (1). Elsevier, Pergamon.
- Kim, N.I., Shin, D.K., and Kim, M.Y. (2007). Exact lateral buckling analysis for thin-walled composite beam under end moment. **Engineering Structures**. 29: 1739-1751.
- Kirby, P.A., and Nethercot, D.A. (1979). **Design for Structural Stability**. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.
- Kollar, L. P., and Springer, S.S. (2003). **Mechanics of Composite Structures**. Cambridge, United Kingdom: The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Mallick, P.K. (1988). **Fiber-Reinforced Composites; Materials, Manufacturing, and Design**. New York: Marcel Dekker.
- McGuire, W., Gallagher, R.H., and Ziemian, R.D. (1999). **Matrix Structural Analysis**. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Ministry of Commerce. (2011). **Trade Summary of Thailand** [On-line]. Available: <http://www2.ops2.moc.go.th/menucomen/>
- Moaveni, S. (1999). **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. New Jersey: Prentice Hall.
- Morrison Molded Fiber Glass Company. (1994). **Extren Fiberglass Structural Shapes: Design Manual**. Virginia: Morrison Molded Fiber Glass Company.
- Mottram, J.T., (1992). Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam. **Composites**. 32(2): 81-92.
- 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.
- Omidvar, B. (1998). Shear coefficient in orthotropic thin-walled composite beams. **Journal of Composites for Construction**. 2(1): 46-56.
- Pandey, M.D., Kabir, M.Z., and Sherbourne, A.N. (1995). Flexural-torsional stability of thin-walled composite I-section beams. **Composites Engineering**. 5(3): 321-342.
- Prian, L., and Barkatt, A. (1999). Degradation mechanism of fiber-reinforced plastics and its implications to prediction of long-term behavior. **Journal of Material Science**. 34 (16): 3977-3989.
- Promis, G., Gabor, A., Maddaluno, G., and Hamelin, P. (2010). Behaviour of beams made in textile reinforced mineral matrix composites, an experimental study. **Composite Structures**. 92: 2565-2572.
- Qiao, P., Zou, G.P., and Davalos, J.F. (2003). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams. **Composite Structures**. 60: 205-217.
- Qiao, P., Davalos, J.F., Barbero, E.J., and Troutman, D.L. (1999). Equations facilitate composite designs. **Modern Plastics Magazine**. 76(11): 77-80.
- Razzaq, Z., Prabhakaran, R., and Sirjani, M. M. (1996). Load and resistance factor design (LRFD) approach for reinforced-plastic channel beam buckling. **Composites: Part B**, 27B: 361-369.
- 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.
- Salmon, C.E., and Johnson, J.E. (1996). **Steel Structures: Design and Behavior**. (4th ed.) New York: HarperCollins College Publishers.
- Schwartz, M.M. (1997). **Composite Materials: Vol. II, Processing, Fabrication and Applications**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Shah, V. (2007). **Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis**. (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Seangatith, S. (1997). **Characterization and Analysis of Composite Beams Subjected to Impact Loads**. Ph.D. Dissertation. University of Texas at Arlington. Texas, USA.

- 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.
- Seymour, R.B. (1987). **Polymer for Engineering Applications**. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Shan, L.Y., and Qiao, P.Z. (2005). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams. **Composite Structures**. 68(2): 211-224.
- Sirjani, M.B., and Razzaq, Z. (2005). Stability of FRP beams under three-point loading and LRFD approach. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 24(18): 1921-1927.
- 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.
- Spigel, B.S., Prabhakaran, R., and Sawyer, J.W. (1987). An investigation of the Iosipescu and asymmetrical four-point bend tests. **Experimental Mechanics**. 27(1): 57-63.
- Starr, T. (2000). **Pultrusion for Engineers**. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Strongwell. (2002). **Strongwell Design Manual**. Bristol, Virginia: Strongwell.
- Timoshenko, S.P. (1921). On the correction for shear of the differential equation for transverse vibration of prismatic bars. **Philosophical Magazine**. 41: 744-746.
- Tosh, M.W., and Kelly, D.W. (2001). Fibre steering for a composite C-beam. **Composite Structures**. 53(2): 133-141.
- Trahair, N. S. (1993). **Flexural-Torsional Buckling of Structures**. London: Chapman and Hall.
- Turvey, G.J. (1996). Lateral buckling tests on rectangular cross-section pultruded GRP cantilever beams. **Composites Part B**. 27B: 34-42.
- Vo, T. P., and Lee, J. (2008). Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory. **Engineering Structures**. 30: 1958-1968.
- Walrath, D.E., and Adams, D.F. (1983). The Iosipescu shear test as applied to composite materials. **Experimental Mechanics**. 23(1): 105-110.

- Whitney, J.M., Daniel, I.M., and Pipes, R.B. (1981). **Experimental Mechanics for Fiber Reinforced Composite Materials**. SESA Monograph No.4. Brookfield Center, Connecticut: Society of Experimental Stress Analysis.
- Yang, Y.B., and McGuire, W. (1986). A Stiffness Matrix for Geometric Nonlinear Analysis. **Journal of Structural Engineering (ASCE)**. 112(4): 853-877.





ภาคนวก ก

คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 บทนำ

การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและการคำนวณทางทฤษฎีนั้น ผลการทดสอบวัสดุมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการสำหรับทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าหากไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้น ภาคผนวกนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวได้อ้างอิงจากรายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปตัวซี” (สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน, 2550) การศึกษาประกอบด้วย (1) การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปราง (2) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) และ (3) คุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อ ดังนี้

ก.2 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปรางของวัสดุ FRP

การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของรูปราง (dimensional tolerance) นับว่ามีความสำคัญสำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP เช่น Structural profile หน้าตัดต่าง ๆ การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของรูปรางเนื่องจากกระบวนการผลิตถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินความสม่ำเสมอและความคลาดเคลื่อนของชิ้นส่วน Structural profile พลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion ของบริษัทผู้ผลิตต่าง ๆ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลของวัสดุได้

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อต้องการทราบความคลาดเคลื่อนของรูปรางของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่ผลิตจากโรงงานภายในประเทศ และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานของ ASTM C3917-02 “Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shape” ซึ่งเป็นการตรวจสอบวัสดุ FRP ที่ได้รับจากโรงงานผู้ผลิตมีมาตรฐานด้านรูปรางเป็นที่ยอมรับหรือไม่ ตัวอย่างทดสอบได้จากการสุ่มตัวอย่างขนาดหน้าตัดละ 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 PFRP โดยไมโครมิเตอร์



รูปที่ ก.3 การวัดขนาดความกว้างของปีกวัสดุ FRP โดยเวอร์เนียคาลิเบอร์

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 ตัวอย่างเท่านั้น คือ C152-TO-01

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด

ชื่อตัวอย่าง	ดัชนีความคลาดเคลื่อน (dimensional tolerance index)					
	ความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด	ความตรงแนวราบ	ความงอแนวราบ	ความแบนราบ	ความบิด	ความคลาดเคลื่อนของมุม
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

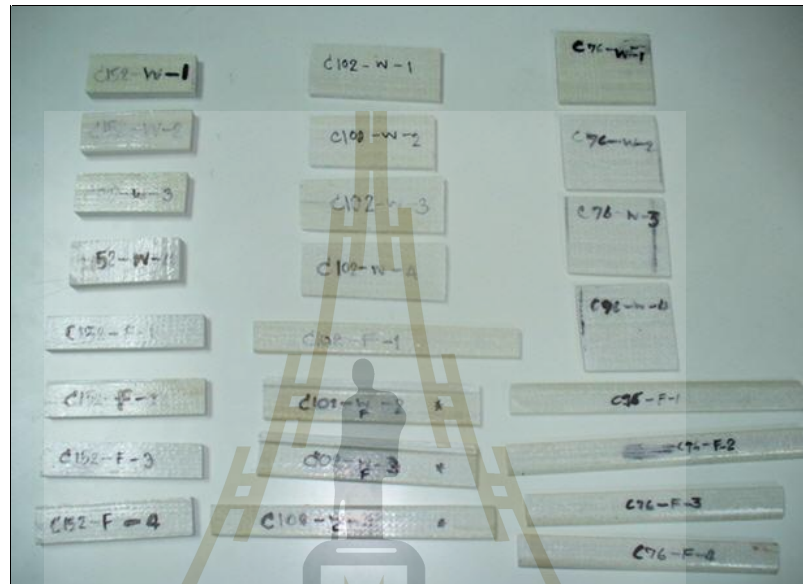
โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุ FRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ FRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนปริมาตรของวัสดุ FRP ต่อปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ 23°C (Shah, 2007) การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของวัสดุ FRP ผลการทดสอบที่ได้จะนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานของวัสดุ FRP 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^3 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 FRP จากตารางพบว่าโดยรวมวัสดุ FRP ทั้ง 3 ขนาดมีค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1958.5 kg/m^3 และค่าความถ่วงจำเพาะ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.96 เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับข้อมูลของบริษัท Creative Pultrusions ที่ระบุว่าวัสดุ FRP มีค่าความหนาแน่น 1656-1925 kg/m^3 และค่าความถ่วงจำเพาะ 1.66-1.93 (Creative Pultrusions, 2004) พบว่าค่าความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ FRP ที่ทดสอบได้มีใกล้เคียงกับข้อมูลของบริษัท Creative Pultrusions

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ขนาดระบุ	บริเวณ	ความหนาแน่น (kg/m^3)		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 การดูดซึมน้ำในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลัง (strength properties) และความเกร็ง (stiffness properties) ของวัสดุ PFRP (Prian and Barkatt, 1999) ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการผ่านจุดเยือกแข็งและการหลอมเหลว (freezing and thawing) และการทำลายด้วยสารเคมีที่ผสมอยู่ในน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ PFRP กล่าวคือ หากวัสดุ PFRP มีความสามารถในการดูดซึมน้ำและความชื้นสูง อาจมีโอกาที่วัสดุจะถูกทำลายโดยสาเหตุดังกล่าวได้ง่าย ส่งผลให้วัสดุมีความคงทนต่ำ ตลอดจนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุ PFRP โดยความสามารถการดูดซึมน้ำของวัสดุ PFRP เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ทำนายความคงทนของวัสดุ PFRP

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ PFRP โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาว 76.2 mm กว้าง 25.4 mm และมีความหนาเท่ากับความหนาของวัสดุ (ASTM D570, 1998) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 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

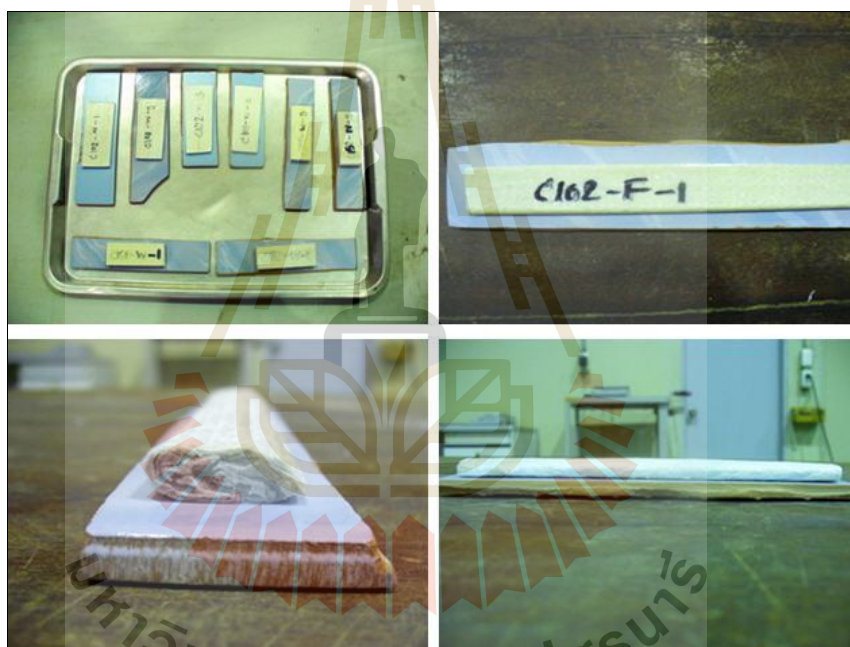
ขนาดระบุ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	ปริมาณความชื้น (%)
C76×22×6	เอว	0.24
C76×22×6	ปีก	0.31
C102×29×6	เอว	0.48
C102×29×6	ปีก	0.68
C152×43×10	เอว	0.58
C152×43×10	ปีก	0.47
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด		0.46

ก.3.3 การทดสอบปริมาณขององค์ประกอบ

ปริมาณขององค์ประกอบมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ PFRP ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาปริมาณ โดยน้ำหนักและโดยปริมาตรของเรซิน ไยแก้ว และช่องว่าง (void) รวมถึงลักษณะของการจัดวาง (alignment) ของใยแก้วที่อยู่ภายในเนื้อ

วัสดุ FRP โดยผลการทดสอบสามารถนำไปใช้ทำนายความสามารถและทิศทางในการรับแรงของชิ้นส่วน FRP โดยประมาณได้

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ FRP 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 องค์ประกอบของเรซินจะถูกแยกออกจากตัวอย่างทดสอบโดยการให้ความร้อนจากเตาเผา (furnace) ในขณะที่องค์ประกอบของเส้นใยแก้วยังคงอยู่ เช่นเดิม 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 PFRP ได้แก่ เตาอบ และเตาเผา ซึ่งสามารถรักษาความร้อนได้คงที่ที่อุณหภูมิ 70°C และ 565°C ตามลำดับ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการ preheated ตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 70°C เพื่อกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ ก.9 จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปเผาภายในเตาเผาที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 565°C จนกระทั่งปริมาณเรซินถูกเผาจนหมด โดยขั้นตอนดังกล่าวใช้ระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (ASTM D3171, 2004) ดังแสดงในรูปที่ ก.10 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่อไป



รูปที่ ก.9 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C



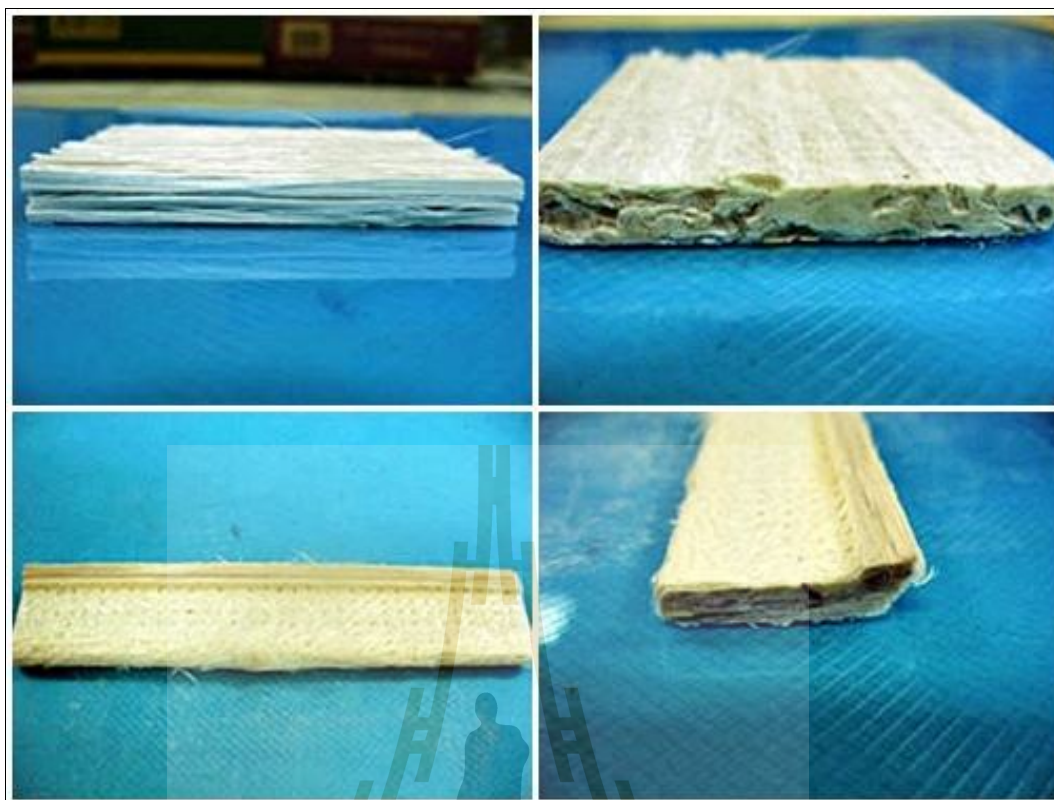
รูปที่ ก.10 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C

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

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด

ขนาดระบุ	บริเวณ	ปริมาณใยแก้วโดยน้ำหนัก (%)		ปริมาณเรซินโดยน้ำหนัก (%)	
		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) ที่มีการวางตัวของใยแก้วโดยไม่มีการสานแบบสุ่มทิศทาง (random fiber non-woven filaments) ส่วนภายในมีกลุ่มของเส้นใยแก้ว (continuous strand rovings) เรียงตัวไปในทิศทางตามยาวของชิ้นส่วน โดยไม่มีใยแก้วแบบแผ่น (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

โครงสร้างที่ถูกออกแบบต้องมีความแข็งแรงที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้ ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกลขององค์อาคาร แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้อาจมาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ FRP จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับวัสดุ FRP ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ และนำค่าคุณสมบัติทางกลที่ทดสอบได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงดัดของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปวงรี โดยสมการทางทฤษฎีและวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ต่อไป ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบถูกตัดออกจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ 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

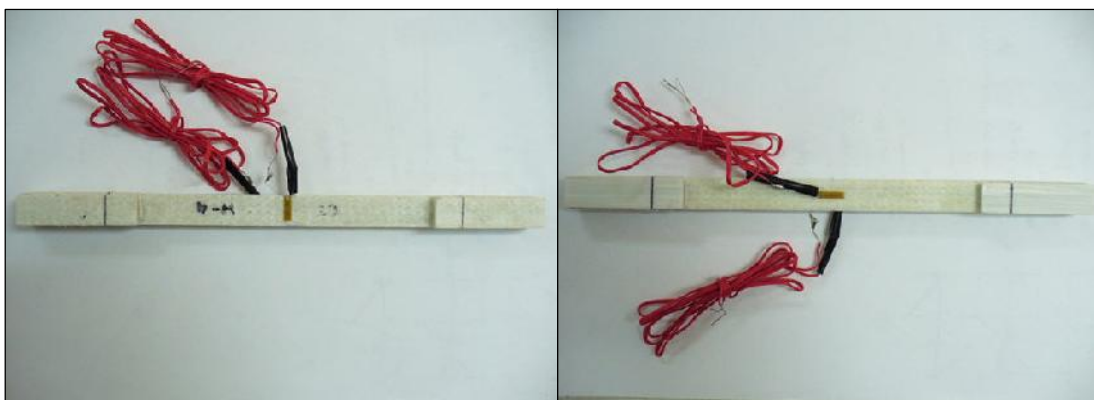
กำลังรับแรงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile strength) และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile modulus) เป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP (Shah, 2007) วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูงสุด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

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP 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) ตามแนวแกนของเส้นใยสามารถหาได้โดยการติดมาตรวัดความเครียด (strain gauge)

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

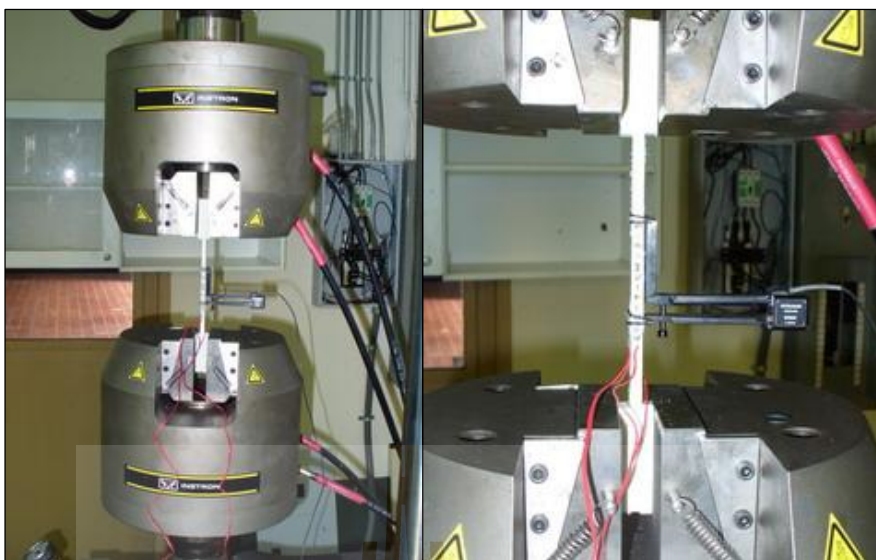
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-TL-W-No.	เอว	10
C76-TL-F-No.	ปีก	10
C102-TL-W-No.	เอว	10
C102-TL-F-No.	ปีก	10
C152-TL-W-No.	เอว	10
C152-TL-F-No.	ปีก	10



รูปที่ ก.14 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

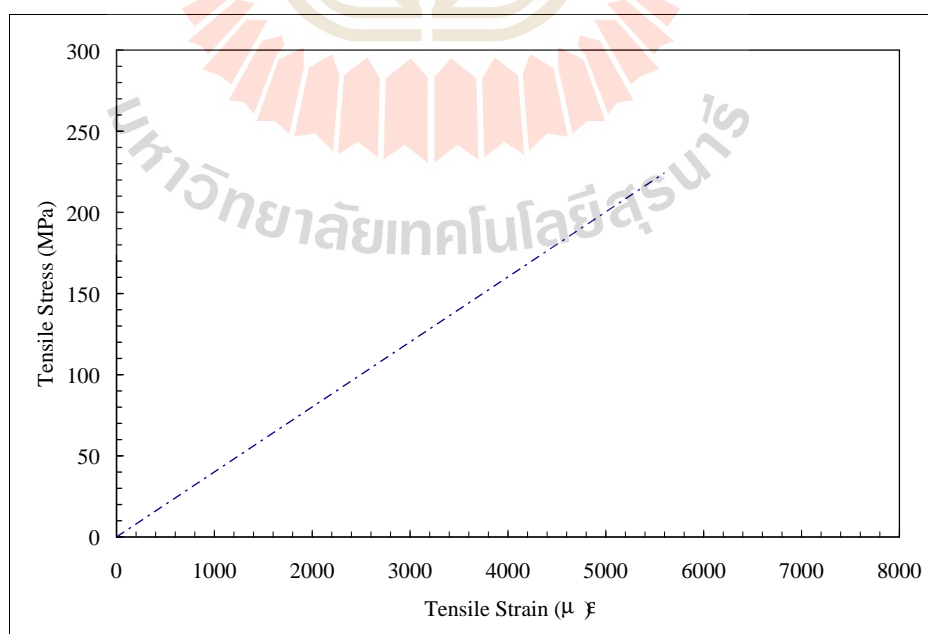
สำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN โดยชิ้นส่วนยึดจับ (grip) ต้องถูกบีบด้วยความดัน (pressure) ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเลื่อน (slip) ระหว่างหัวจับและชิ้นส่วนยึดจับ และหลีกเลี่ยงการวิบัติแบบอัดแตก (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 PFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.17



รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.17 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

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

ตารางที่ ก.10 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP

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) ปัญหาหลักที่พบระหว่างการทดสอบ คือ ภายใต้อันตรึงกระทำตัวอย่างมักเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ตามทิศทางของเส้นใย (fiber direction) หรืออาจเกิดการวิบัติก่อนเวลาอันควร (premature failure) โดยมีลักษณะการวิบัติแบบ Localized brooming บริเวณส่วนปลายของตัวอย่างทดสอบ (Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006) ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว มาตรฐาน ASTM D3410-03 “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (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



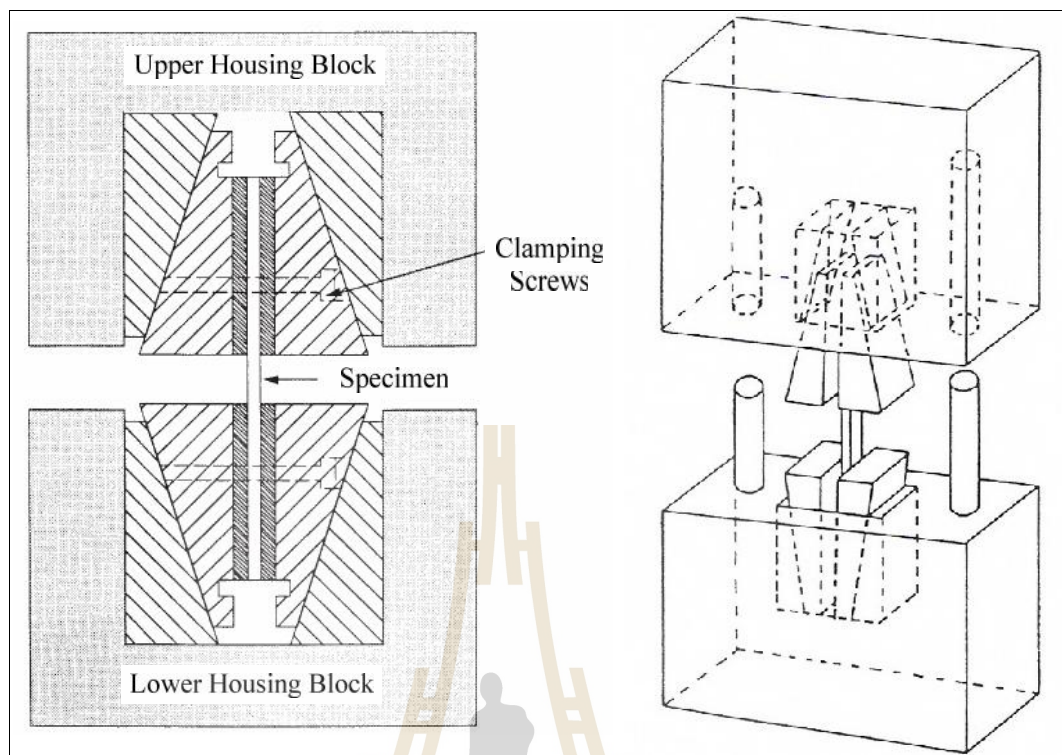
รูปที่ ก.18 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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) ตัวอย่างทดสอบในแนวดิ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ Test fixture สำหรับใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เพื่อลดการเยื้องศูนย์ในขั้นตอนการติดตั้ง ตลอดจนช่วยป้องกันการโก่งเดาะตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ โดยอุปกรณ์ Test fixture ที่นิยมใช้ในการทดสอบมากที่สุด คือ IITRI Test fixture ซึ่งถูกพัฒนาโดย Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) (Hofer and Rao, 1977) ดังแสดงในรูปที่ ก.19 และรูปที่ ก.20 ซึ่งต่อมาภายหลังอุปกรณ์ Test fixture ดังกล่าวได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับมาตรฐาน ASTM D3410-03

ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1200 กิโลกรัม การให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 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)

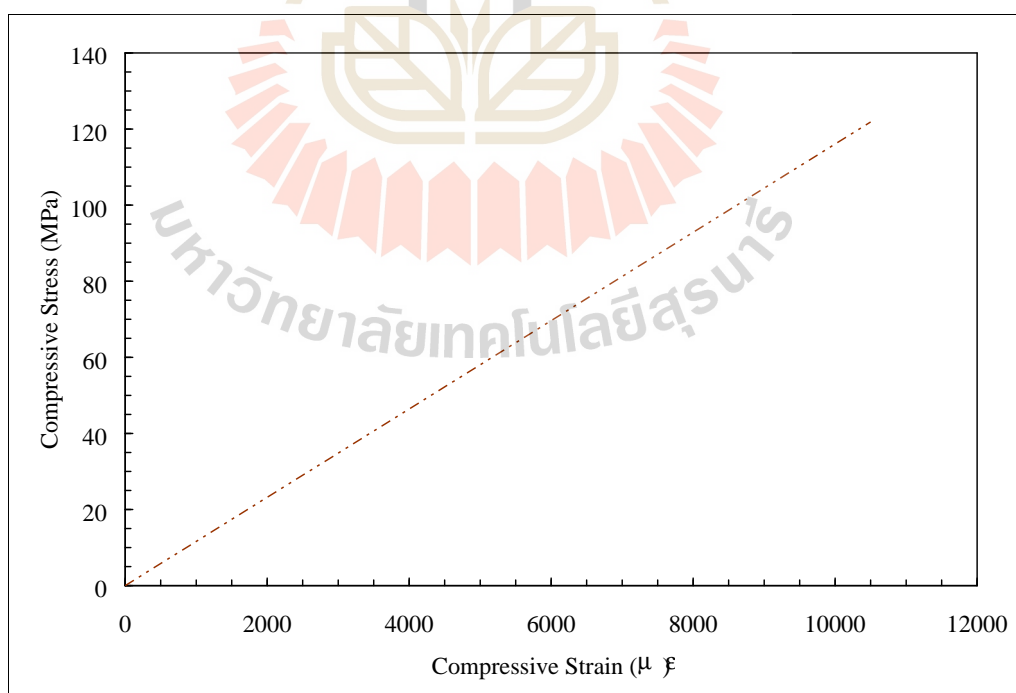


รูปที่ ก.20 Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

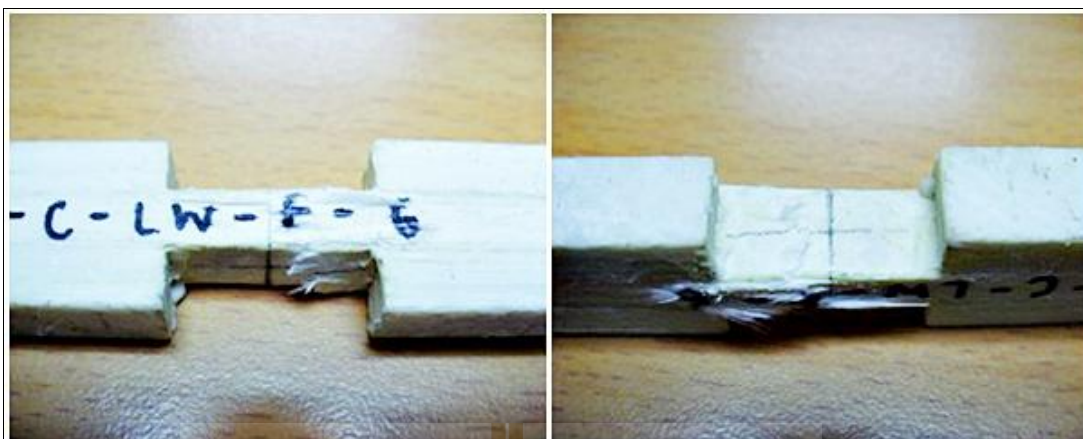


รูปที่ ก.21 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

ตารางที่ ก.12 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP

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 FRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตาม

แนวขวาง (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

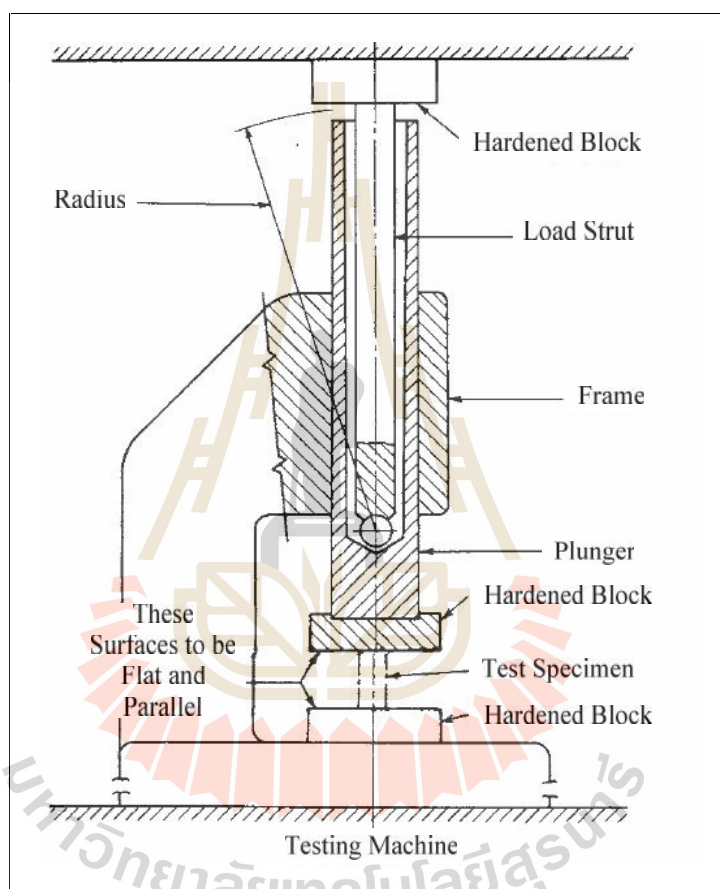
ตารางที่ ก.13 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

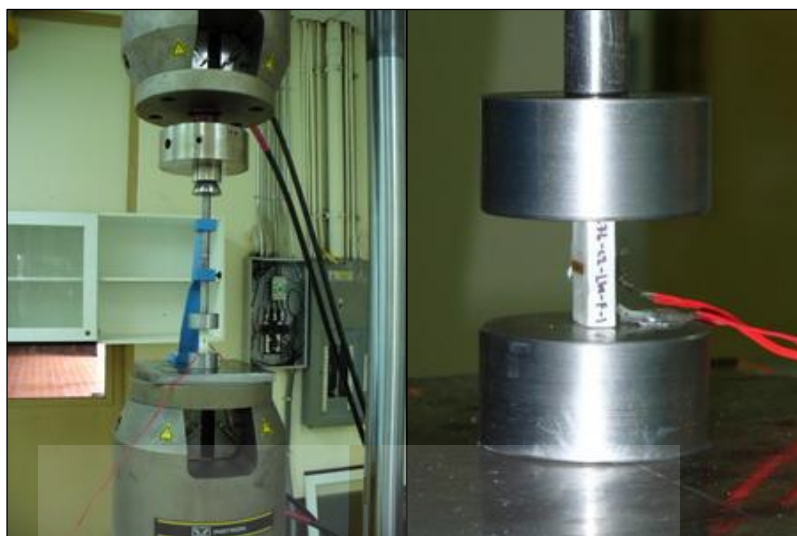
มาตรฐาน ASTM D695 (2002) ได้กำหนดขนาดตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีขนาด 12.7×25.4 mm สำหรับความหนา 6 mm และขนาด 12.7×40.0 mm สำหรับความหนา 10 mm สำหรับความค่าความเครียดเชิงอัด (compressive strain) และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย สามารถหาได้โดยการติดตามวัดความเครียด ยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ซึ่งถูกติดตั้งแบบ back-to-back บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ โดยค่าที่วัดได้เป็นค่าความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางและแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN กำหนดหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 ตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงอัด (compression tool) ดังแสดงตัวอย่างใน

รูปที่ ก.24 ตัวอย่างถูกวางระหว่างจตุรรองรับที่มีลักษณะแบบผิวเรียบ โดยให้ผิวของตัวอย่างทดสอบขนานกับผิวของจตุรรองรับ และให้ทิศทางของแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D695, 2002) รูปที่ ก.25 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

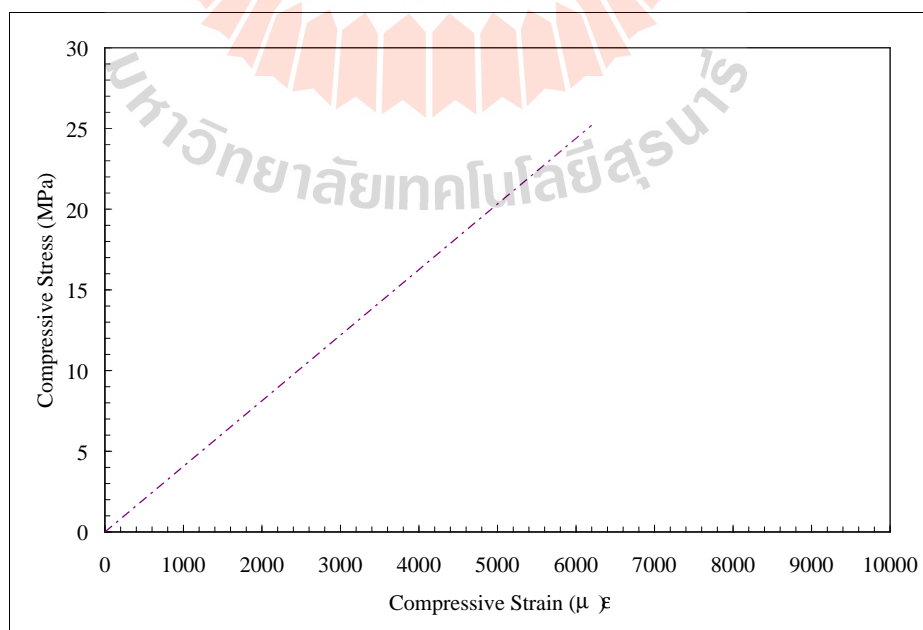


รูปที่ ก.24 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย (ASTM D695, 2002)



รูปที่ ก.25 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

รูปที่ ก.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใยของวัสดุ CFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ ก.27 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย จากรูปพบว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบการแตกหักโดยฉับพลันของเรซินและการเลื่อนของเส้นใย



รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ ก.27 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยต่ำ เนื่องจากภายใต้แรงอัดตั้งฉากเส้นใย เรซินเป็นตัวหลักในการรับแรงกระทำ ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการเลื่อนได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ตามทิศทางที่รับแรงกระทำ การรับแรงในทิศทางขนานเส้นใยมีกำลังและความแกร่งมากกว่าการรับแรงในทิศทางตั้งฉากเส้นใย แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใยแก้วหรือเป็นวัสดุออร์โทโทรปิก (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 การทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal flexural test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงคัตสูงสุด (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นคัต (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติ

ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRFP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกน (longitudinal flexural modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ FRFP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D790-03 “Standard Test Method for Flexural of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials” ASTM D790 (2003) ไม่ ได้ระบุขนาดของตัวอย่างทดสอบอย่างชัดเจน หากแต่กล่าวว่า ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (support span) ควรค่าไม่น้อยกว่า 16 เท่าของความลึก (หนา) ของตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสเชิงคด มาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำว่าตัวอย่างทดสอบควรมีอัตราส่วนระหว่างจุดรองรับต่อความลึก (span-to-depth ratio) เท่ากับ 60:1 เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉือน (shear effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ รูปที่ ก.28 แสดงลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.15

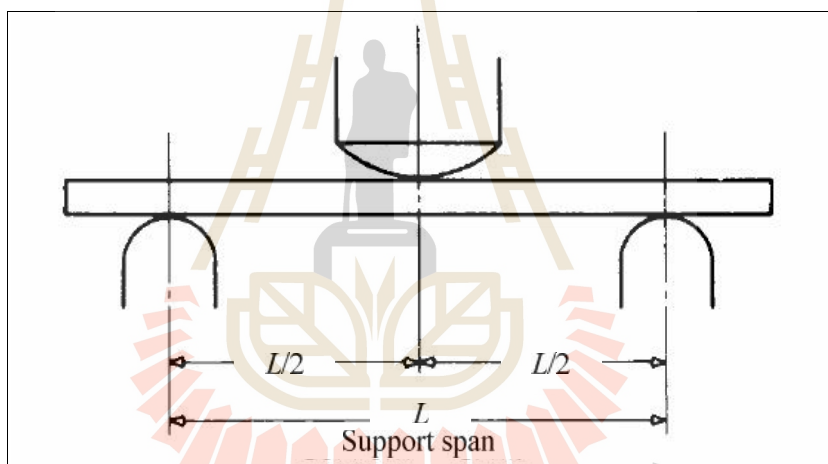


รูปที่ ก.28 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.15 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย

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

สำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำ โดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN การทดสอบเป็นการทดสอบแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) โดยมีแรงกระทำเป็น จุดบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ และมีจุดรองรับแบบง่าย ASTM D790 (2003) ได้ระบุว่า สำหรับการทดสอบแรงคัต จุดรองรับ และ loading nose จำเป็นต้องมีพื้นผิวลักษณะ รูปทรงกระบอก (cylindrical surface) เพื่อลดผลกระทบของหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับและหัวกด ดังแสดงในรูปที่ ก.29 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อ ตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวกดที่มีอัตราความเครียดคงที่ (constant strain rate) เท่ากับ 0.1 mm/mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D790, 2003) รูปที่ ก.30 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

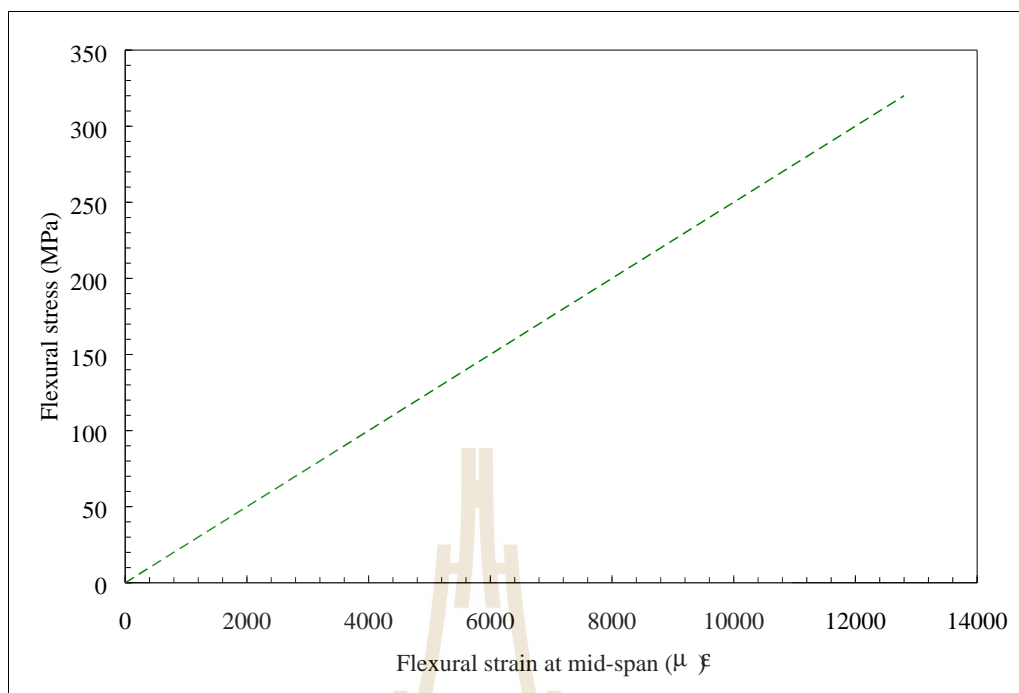


รูปที่ ก.29 ลักษณะจุดรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D790, 2003)



รูปที่ ก.30 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.31 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดดัดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ ก.32 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่า การวิบัติของตัวอย่างเริ่มต้นจากการวิบัติของเรซิน จากนั้นจึงเกิดการขาดออกของเส้นใยแก้วบริเวณที่รับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบในทิศทางขนานกับเส้นใยแก้ว การวิบัติเริ่มจากผิวนอกของตัวอย่างที่มีหน่วยแรงดัดสูงสุด



รูปที่ ก.31 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.32 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.16 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงดัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยสำหรับวัสดุ FRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRP มี

หน่วยแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัดตามแนวแกนของเส้นใยสูง เนื่องจากวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณเส้นใยแก้วสูง ดังนั้นภายใต้แรงตัดเส้นใยแก้วดังกล่าวทำหน้าที่รับหน่วยแรงดึงและแรงอัดเป็นหลักส่งผลให้กำลังวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูง

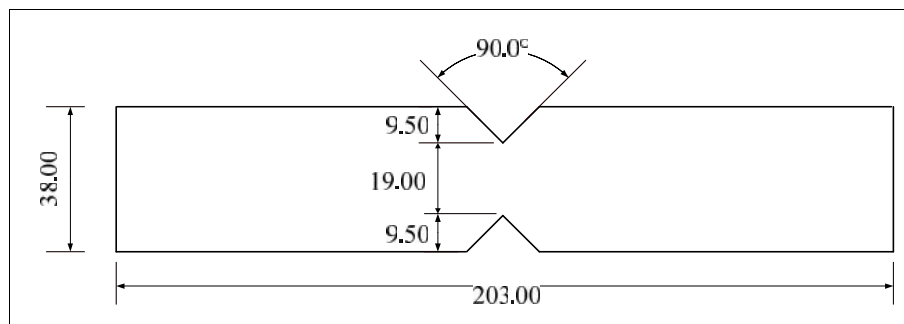
ตารางที่ ก.16 ผลทดสอบแรงตัดตามแนวแกนของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงตัดประลัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	509.73 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงตัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	31.07 GPa	11.00 GPa

ก.4.5 การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (longitudinal V-notch shear test) ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดย Iosipescu (1967) เพื่อใช้ในการทดสอบลักษณะเฉพาะของแรงเฉือนที่กระทำต่อเหล็กรูปพรรณ 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 พบว่าผลทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch ที่ได้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ต่อมาภายหลัง ASTM ได้นำรูปแบบของการทดสอบดังกล่าวตีพิมพ์เผยแพร่และออกเป็นมาตรฐาน ASTM D5379 (2005)

การทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ultimate shear strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเฉือน (shear modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ 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 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงดังตารางที่ ก.17

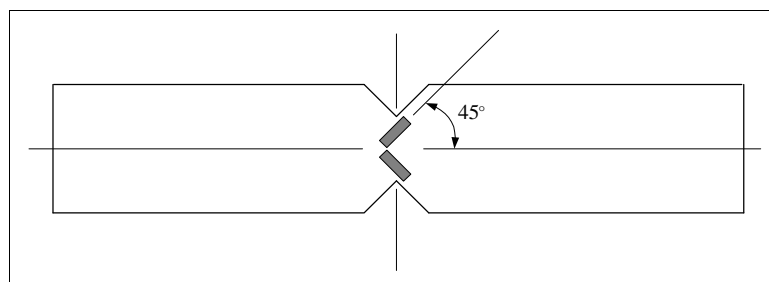


รูปที่ ก.33 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย
(ASTM D5379, 2005)

ตารางที่ ก.17 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

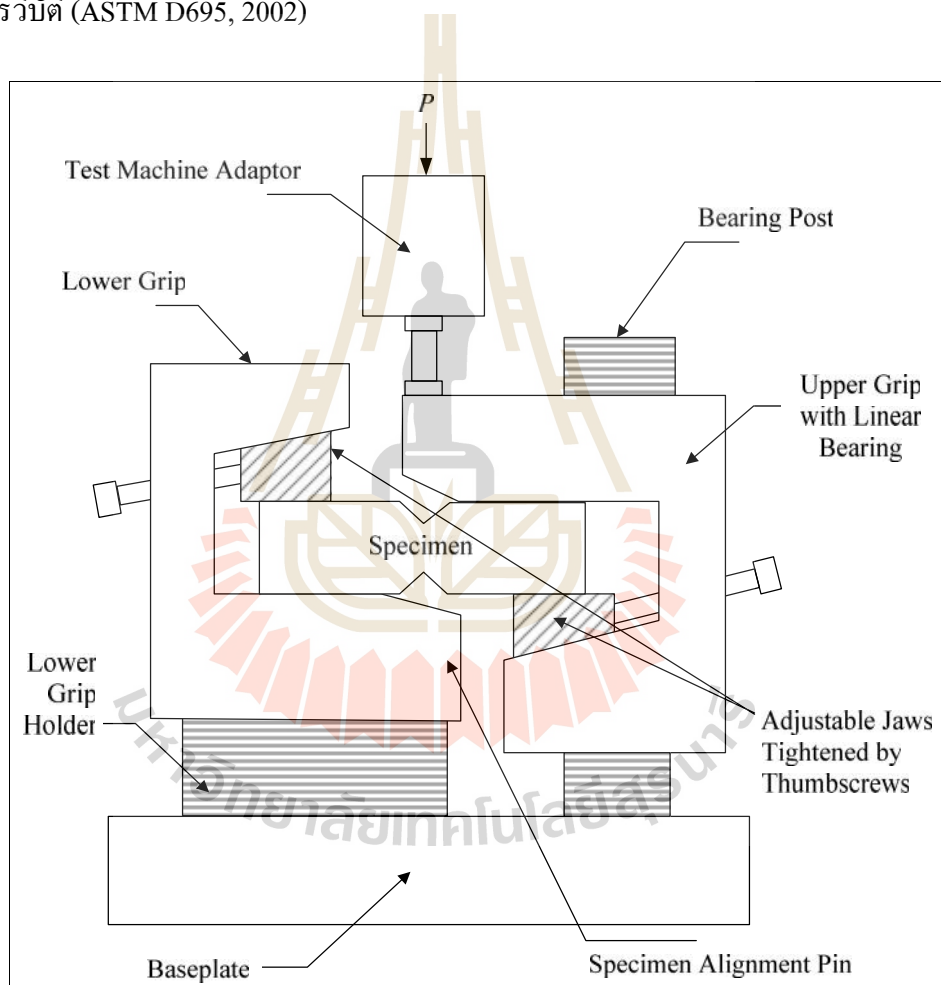
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-SL-W-No	เอว	10
C76-SL-F-No.	ปีก	10
C102-SL-W-No.	เอว	10
C102-SL-F-No.	ปีก	10
C152-SL-W-No.	เอว	10
C152-SL-F-No.	ปีก	10

สำหรับการหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเส้นของตัวอย่างทดสอบ ได้ทำการติดตามวัดความเครียดที่ห้อง 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)

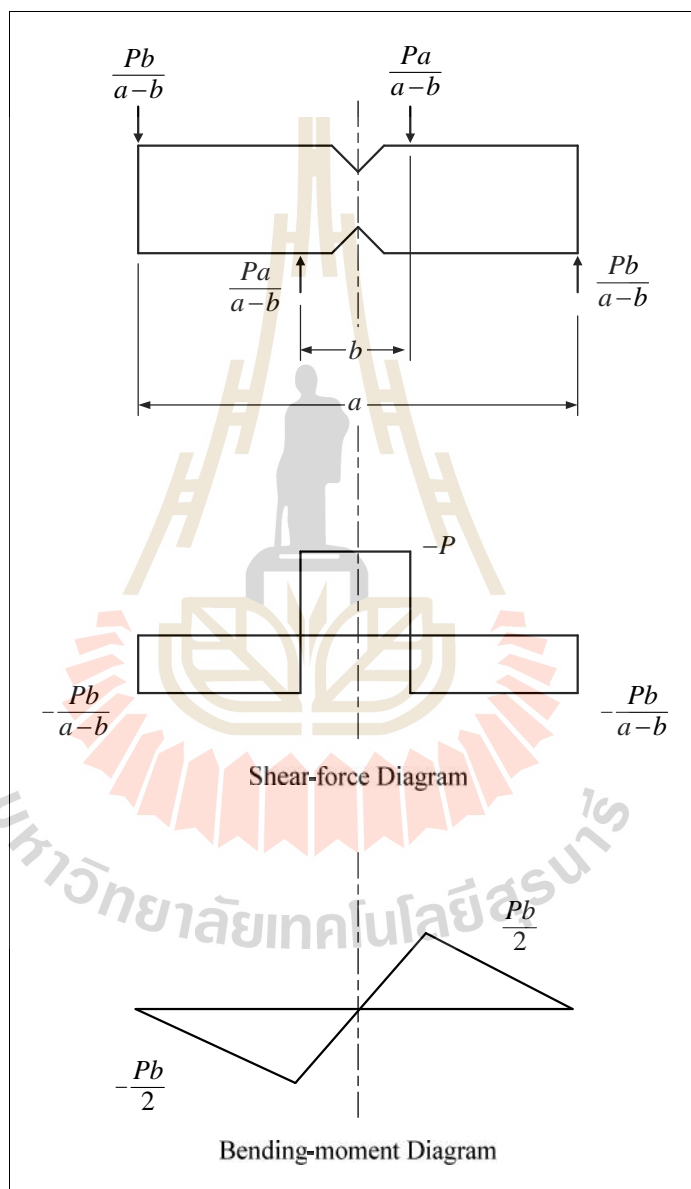
สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบถูกกระทำ โดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1200 kN ค่าหน่วยแรง และค่าความเครียดเชิงเฉือนถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 โดยตัวอย่าง ทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (V-notched shear test fixture) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.35 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่าง ทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบ เกิดการวิบัติ (ASTM D695, 2002)



รูปที่ ก.35 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

รูปที่ ก.36 แสดงแผนผังวัตถุอิสระ (free body diagram) แผนภาพแรงเฉือน และโมเมนต์ (shear-bending moment diagram) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

จากรูปเห็นได้ว่าบริเวณกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างจะถูกกระทำโดยแรงเฉือนเพียงอย่างเดียว (pure shear) ทำให้ในการทดสอบดังกล่าวสามารถหาค่าแรงเฉือนสูงสุด และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนได้โดยปราศจากผลกระทบเนื่องจากแรงดัด (bending effect) (Agarwal et al., 2006) รูปที่ ก.37 แสดงการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

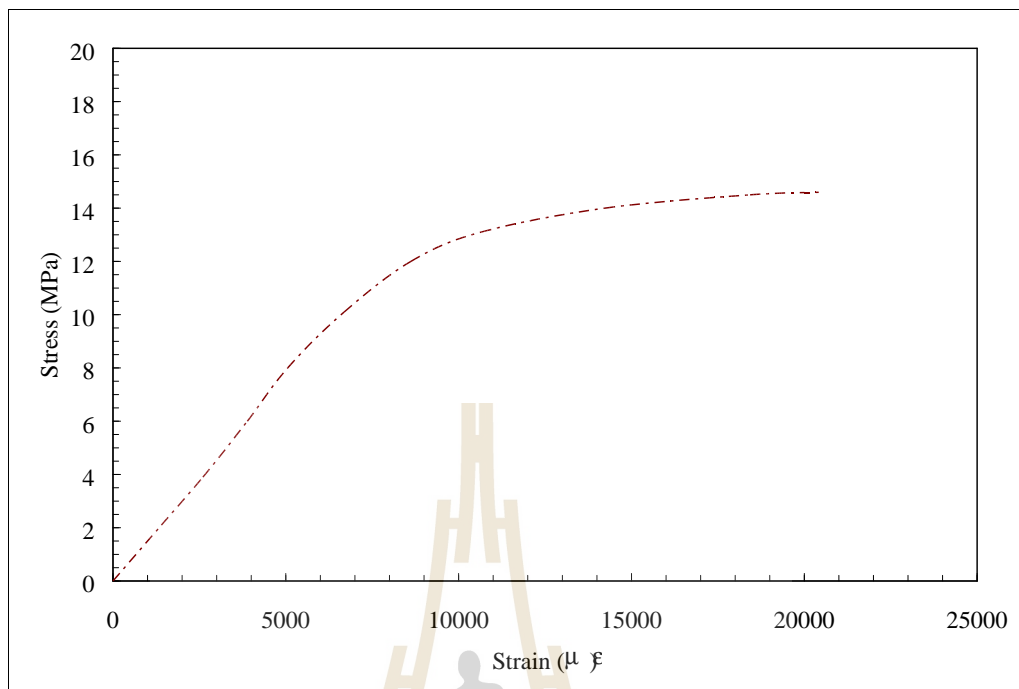


รูปที่ ก.36 แผนผังวัตถุอิสระของแรงเฉือนและโมเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (Agarwal et al., 2006)



รูปที่ ก.37 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเหวี่ยงตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.38 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเหวี่ยงและความเครียดเชิงเหวี่ยงตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงจนใกล้ถึงหน่วยแรงเหวี่ยงสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง พฤติกรรมของตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ หน่วยแรงเหวี่ยงของวัสดุมีค่าลดลงแต่ตัวอย่างยังสามารถรับแรงต่อไปได้ หรือหน่วยแรงเหวี่ยงของวัสดุมีค่าคงที่ โดยความเครียดที่บันทึกได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมาตรฐานความเครียดเกิดการหลุดร่อน การตรวจสอบลักษณะวิบัติของตัวอย่างใช้การสังเกตขณะทดสอบร่วมกับการเปลี่ยนแปลงโดยฉับพลันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเหวี่ยงและความเครียดเชิงเหวี่ยง วัสดุเหนียวบางประเภทอาจไม่เกิดการวิบัติแบบเหวี่ยงเพียงอย่างเดียวแต่อาจเกิดการวิบัติหลายแบบร่วมกัน (ASTM D5379-05, 2005) รูปที่ ก.39 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเหวี่ยงตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติเริ่มต้นจากการแตกของเรซินตามทิศทางขนานกับเส้นใยแล้วบริเวณที่บากเป็นรูปตัววี (v-notched) จากนั้นรอยแตกจะเคลื่อนเข้าใกล้กับบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเลื่อนออกจากกัน ในแนวตั้งตามแนวบากรูปตัววี



รูปที่ ก.38 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.39 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.18 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและ โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าโมดูลัสยึดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มี

ความสำคัญต่อการรับแรงเฉือน โดยวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ (27.8%) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion

ตารางที่ ก.18 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion (Full section)
หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	37.27 MPa	-
โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	2.18 GPa	2.9 GPa



ภาคผนวก ข

การทดสอบตัวอย่างแกน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำภายใต้แรงดัด



ข.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด การศึกษาประกอบด้วย (1) การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปร่าง (2) การทดสอบการรับแรงดัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด

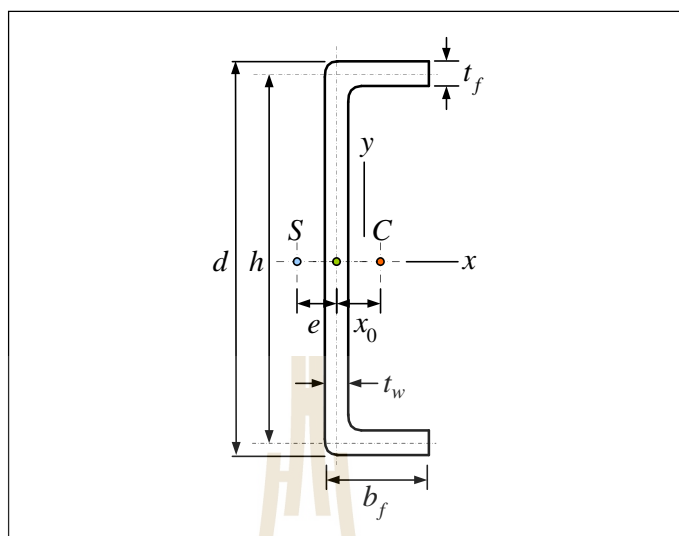
การศึกษาประกอบด้วย การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัสดุ CFRP และเหล็กรูปพรรณ ขั้นตอนต่อมาทำการเลือกวัสดุที่ผลิตเป็นวัสดุ CFRP และเลือกขนาดของหน้าตัดที่ทำการศึกษา จากนั้นจัดหาวัสดุ CFRP และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เริ่มทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และกำลังรับแรงดัดของคานที่ทำจากวัสดุ CFRP ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างจำนวน 90 ตัวอย่าง ถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported) จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ที่ทดสอบได้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณความสามารถในการรับแรงดัดโดยสมการออกแบบของ LRFD

สุดท้ายเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุดังกล่าวได้อ้างอิงจากรายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การวิเคราะห์และทดสอบลักษณะเฉพาะของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพอลิพรอสเทติกหน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด” (จักขดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2554)

ข.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่าง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดรูปร่างโดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm รูปที่ ข.1 และตารางที่ ข.1 แสดงรายละเอียดหน้าตัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างที่ใช้ในงานวิจัย จากรูปพบว่าจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (จุด S) ของหน้าตัดรูปร่างอยู่ภายนอกหน้าตัดที่ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางแนวตั้งของหน้าตัดเป็นระยะเยื้อง e โดยระยะดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (ข.1) (Cook and Young, 1999)

$$e = \frac{3b^2t_f}{6bt_f + ht_w} \quad (\text{ข.1})$$



รูปที่ ข.1 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างนำของคาน PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ข.1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างนำของคาน PFRP

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

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปร่างนำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 10-53 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ตารางที่ ข.2 ถึงตารางที่ ข.4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-S-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้

หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm S หมายถึงลักษณะของจุดรองรับแบบง่าย สดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C76-S-2.0 หมายถึงคานที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่มีจุดรองรับแบบง่าย ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm และยาว 2.0 m

ตารางที่ ข.2 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

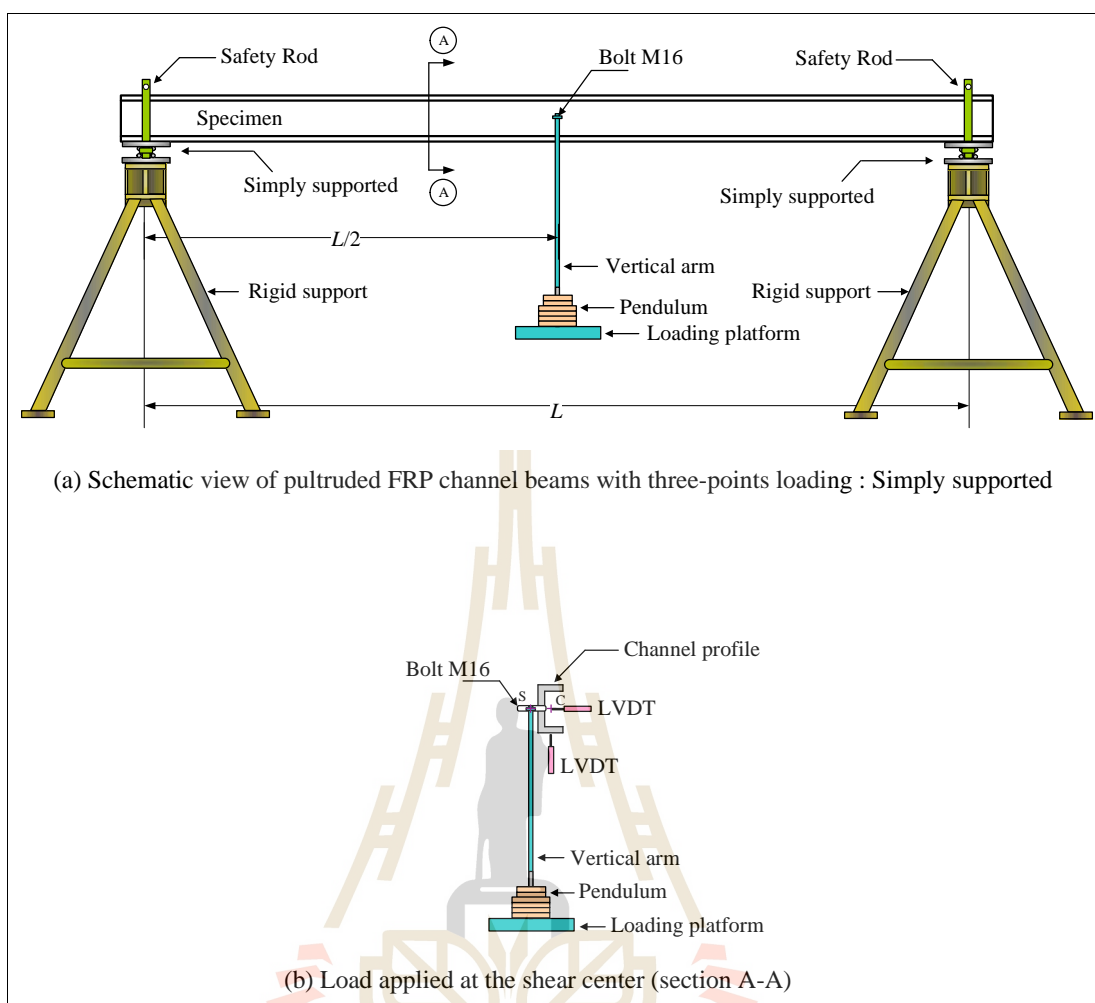
Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C76-S-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	13.2	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	15.8	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.5	$76 \times 22 \times 6$	1.5	19.7	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.7	$76 \times 22 \times 6$	1.7	22.4	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.0	$76 \times 22 \times 6$	2.0	26.3	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.2	$76 \times 22 \times 6$	2.2	28.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.5	$76 \times 22 \times 6$	2.5	32.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.7	$76 \times 22 \times 6$	2.7	35.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.0	$76 \times 22 \times 6$	3.0	39.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.2	$76 \times 22 \times 6$	3.2	42.1	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.5	$76 \times 22 \times 6$	3.5	46.1	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.7	$76 \times 22 \times 6$	3.7	48.7	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-4.0	$76 \times 22 \times 6$	4.0	52.6	21812	8208	2.660×10^7	2

ตารางที่ ข.3 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C102-S-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	9.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.2	$102 \times 29 \times 6$	1.2	11.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	14.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.7	$102 \times 29 \times 6$	1.7	16.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	19.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.2	$102 \times 29 \times 6$	2.2	21.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	24.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.7	$102 \times 29 \times 6$	2.7	26.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	29.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.2	$102 \times 29 \times 6$	3.2	31.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	34.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.7	$102 \times 29 \times 6$	3.7	36.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	39.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.2	$102 \times 29 \times 6$	4.2	41.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.5	$102 \times 29 \times 6$	4.5	44.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.7	$102 \times 29 \times 6$	4.7	46.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-5.0	$102 \times 29 \times 6$	5.0	49.0	53996	11088	1.161×10^8	2

ตารางที่ ข.4 รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C152-S-1.5	$152 \times 43 \times 10$	1.5	9.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-1.7	$152 \times 43 \times 10$	1.7	11.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.0	$152 \times 43 \times 10$	2.0	13.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.2	$152 \times 43 \times 10$	2.2	14.5	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.5	$152 \times 43 \times 10$	2.5	16.4	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.7	$152 \times 43 \times 10$	2.7	17.8	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	19.7	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.2	$152 \times 43 \times 10$	3.2	21.1	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.5	$152 \times 43 \times 10$	3.5	23.0	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.7	$152 \times 43 \times 10$	3.7	24.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	26.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.2	$152 \times 43 \times 10$	4.2	27.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.5	$152 \times 43 \times 10$	4.5	29.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.7	$152 \times 43 \times 10$	4.7	30.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-5.0	$152 \times 43 \times 10$	5.0	32.9	285281	76000	1.379×10^9	2



รูปที่ ข.2 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ ข.3 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย



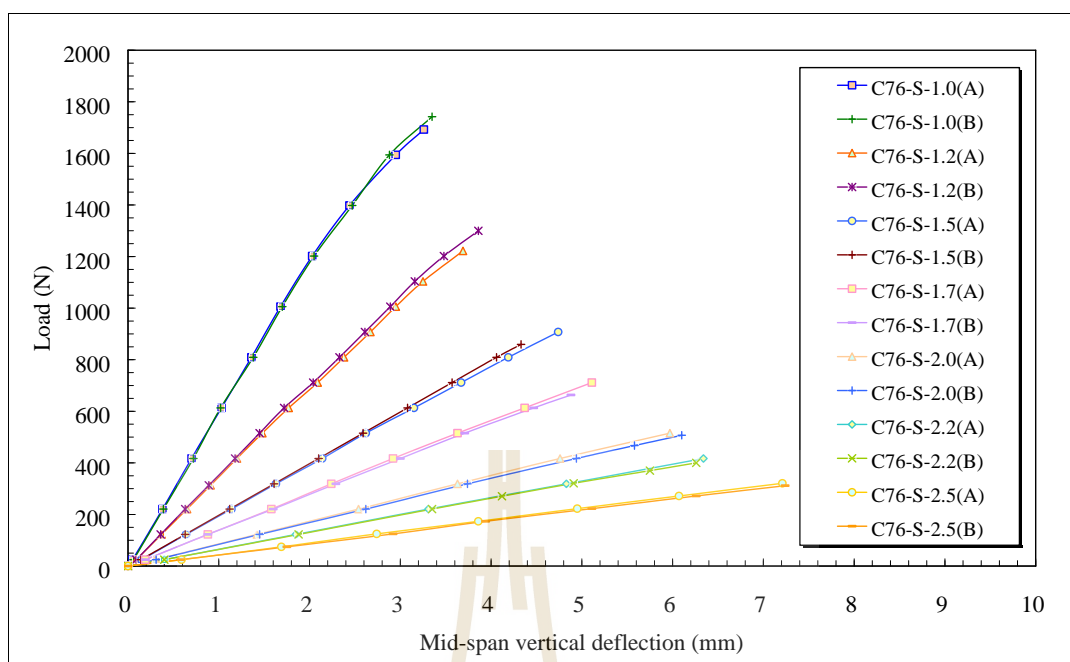
รูปที่ ข.4 จุดรองรับแบบง่าย

ข.3 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย

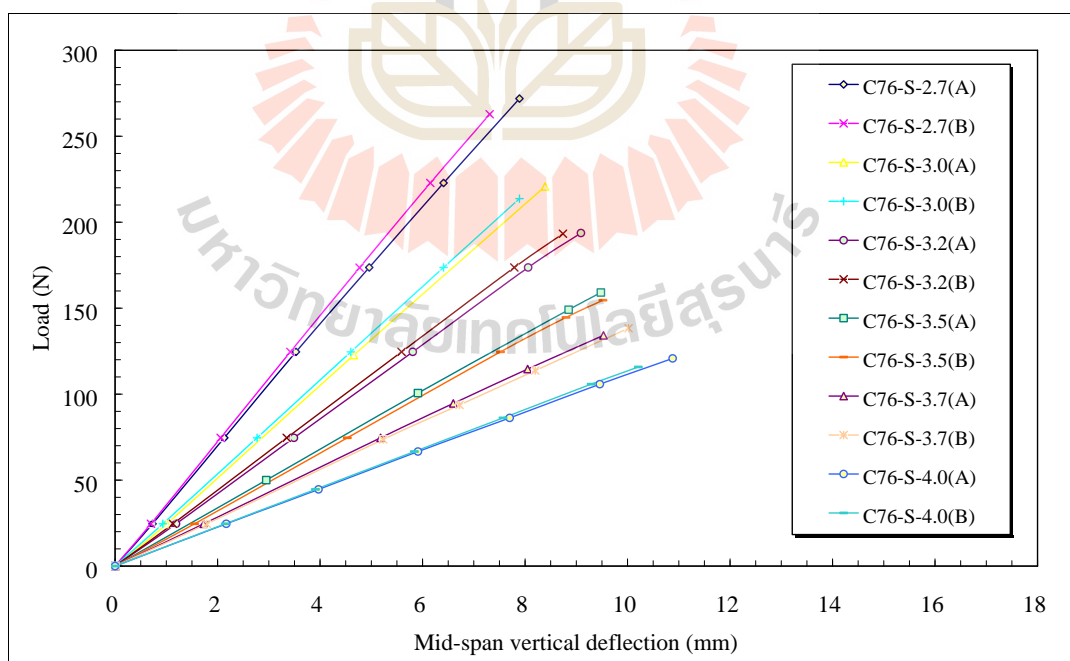
รูปที่ ข.5 ถึงรูปที่ ข.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

ในทางตรงกันข้าม พฤติกรรมรับแรงดัดทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมการรับแรงแนวตั้ง รูปที่ ข.11 ถึงรูปที่ ข.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าพฤติกรรมการรับแรงดัดทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

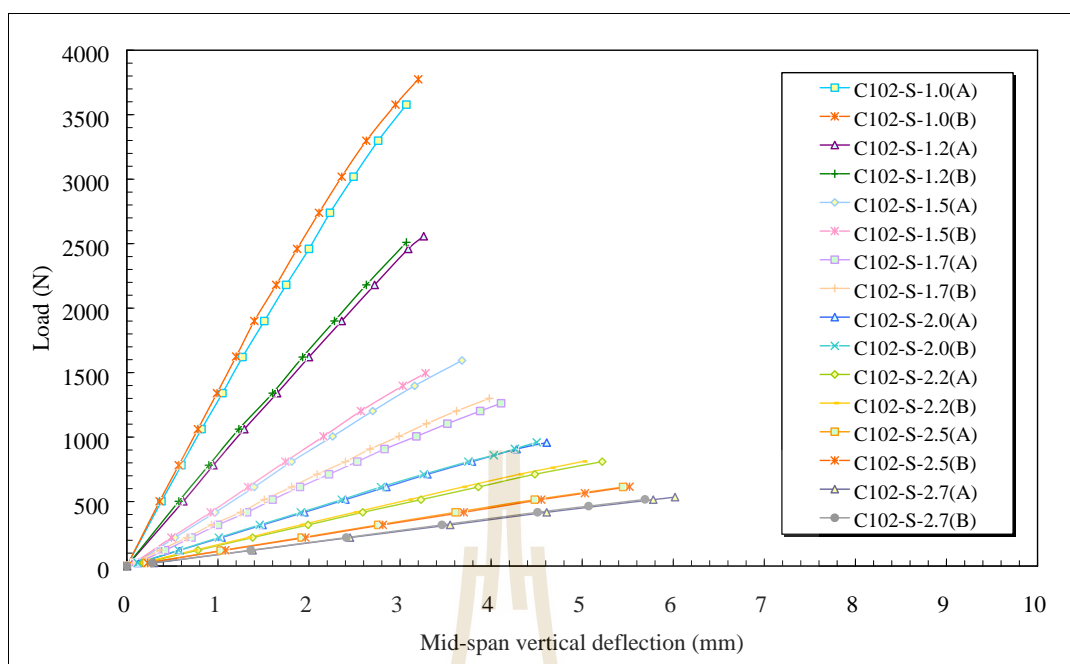
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานที่มีจูดรองรับแบบง่ายมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ข.14 ถึงรูปที่ ข.16 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน FRFP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



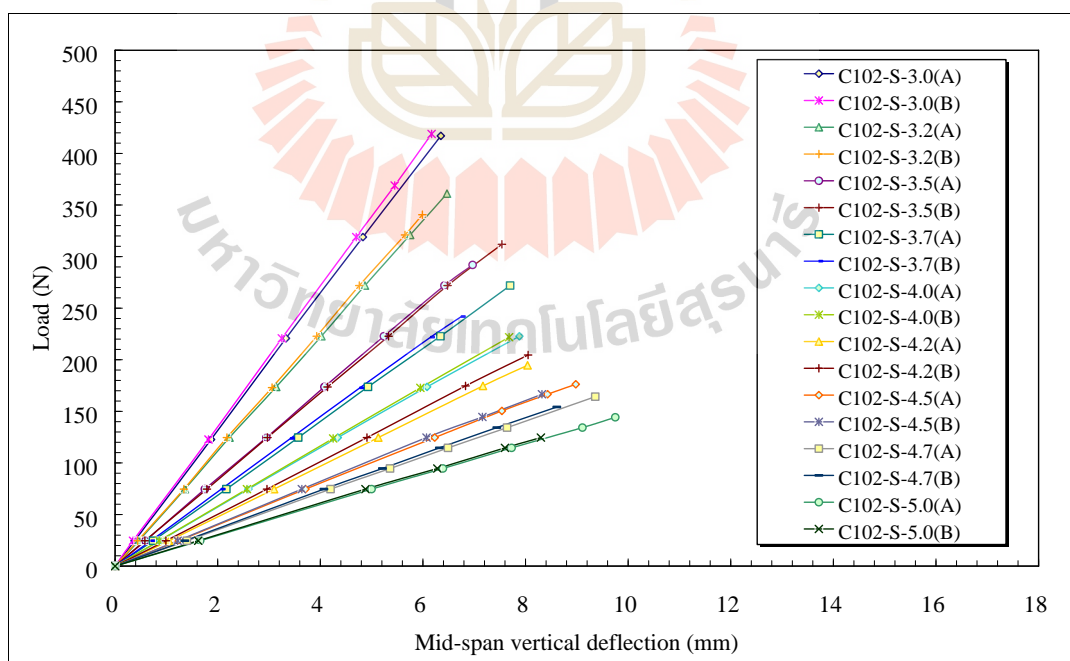
รูปที่ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



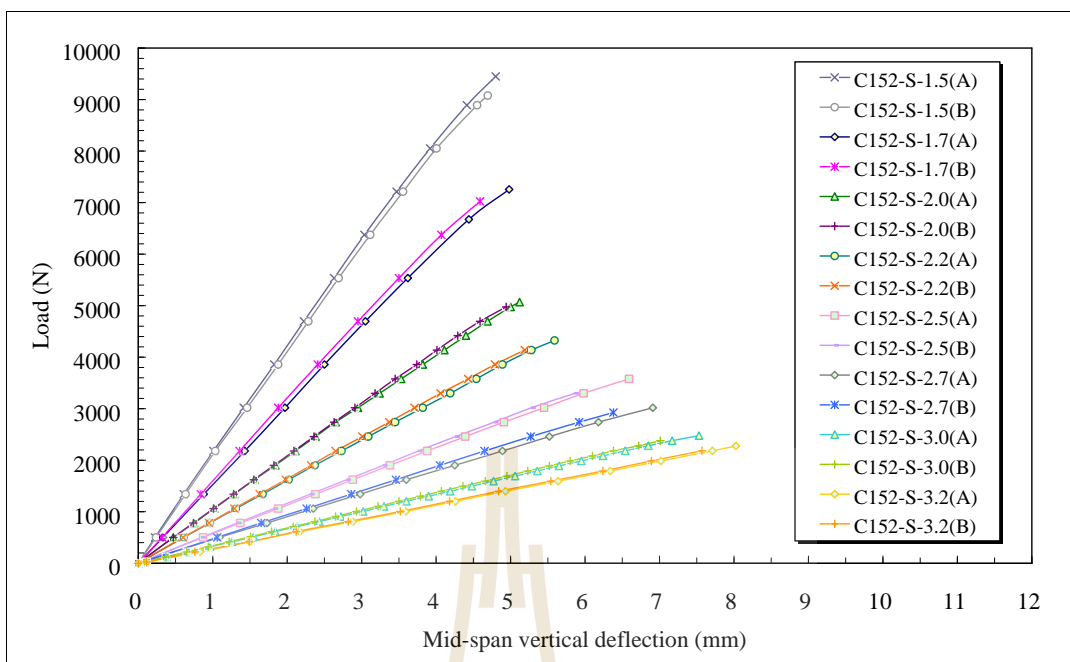
รูปที่ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



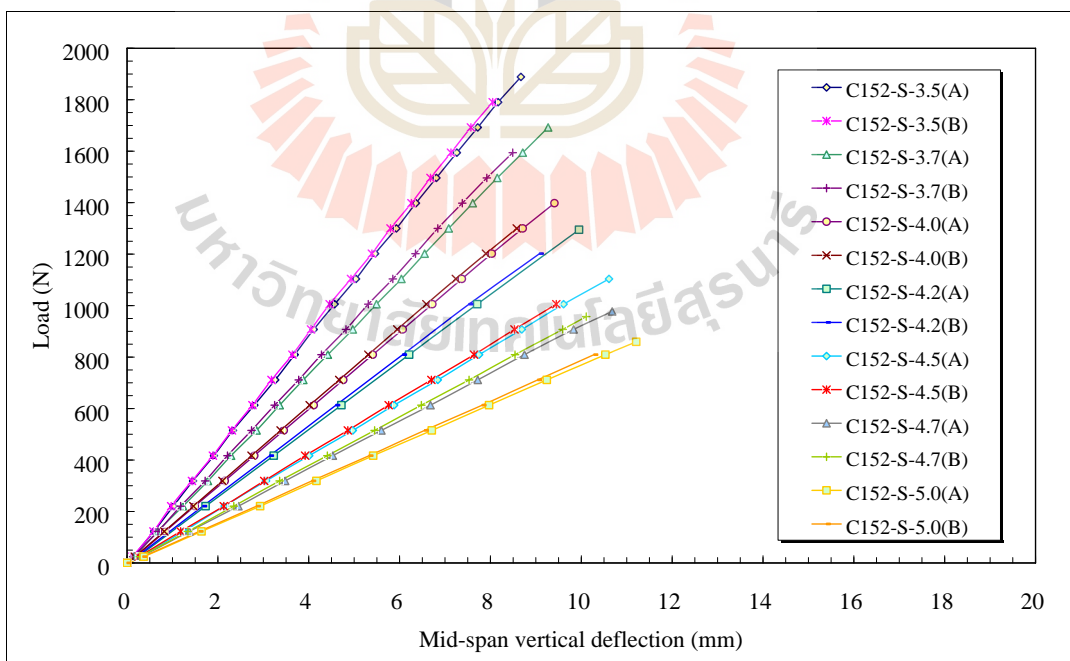
รูปที่ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุกตรองรับแบบง่าย



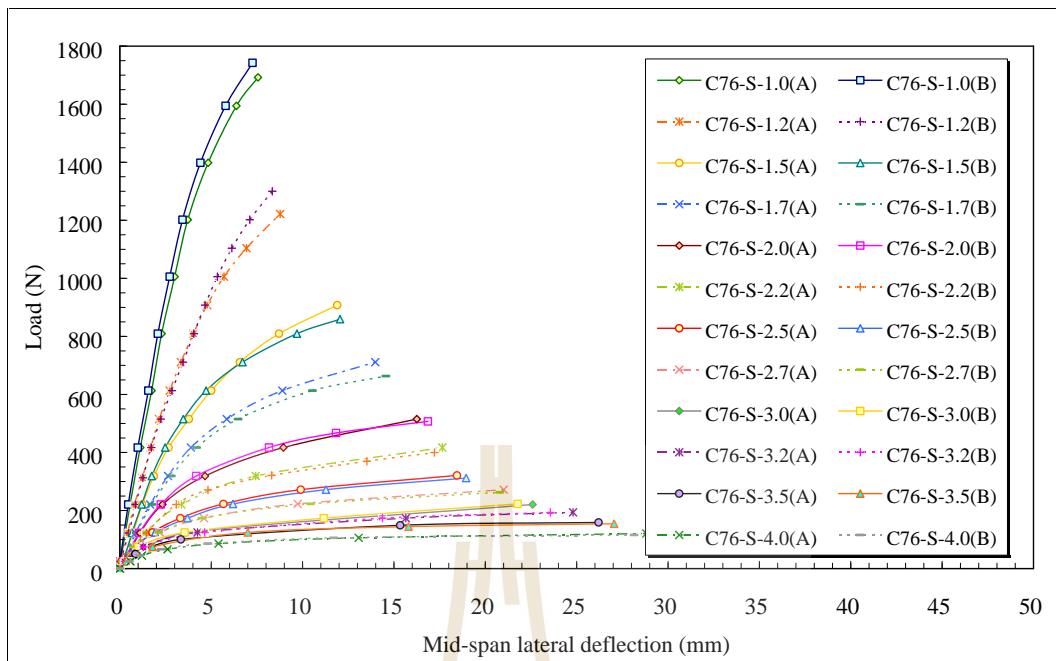
รูปที่ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุกตรองรับแบบง่าย



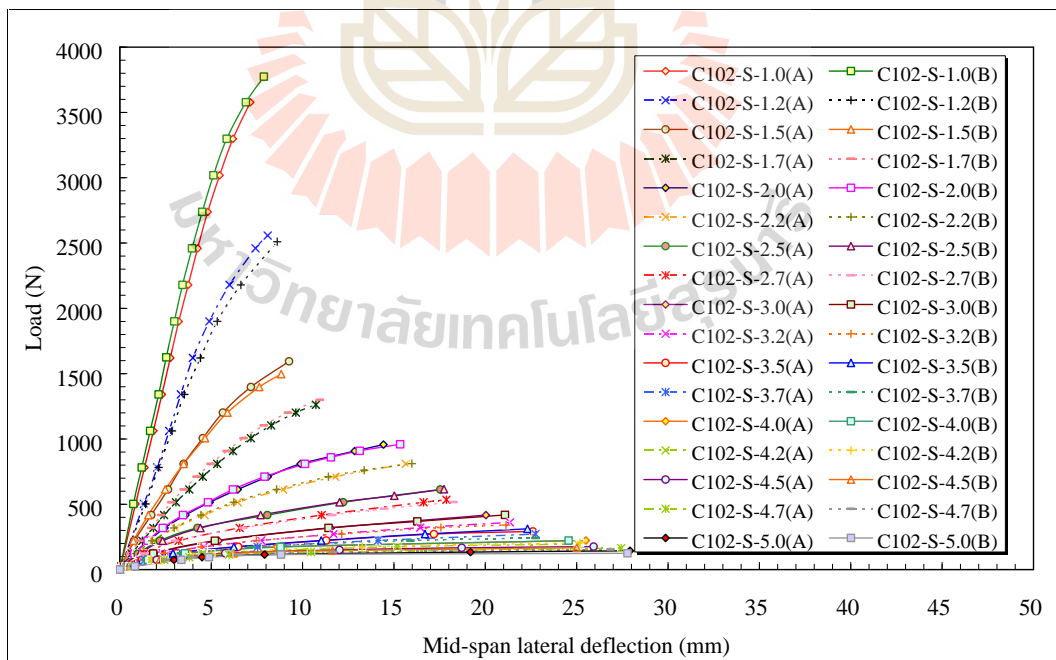
รูปที่ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



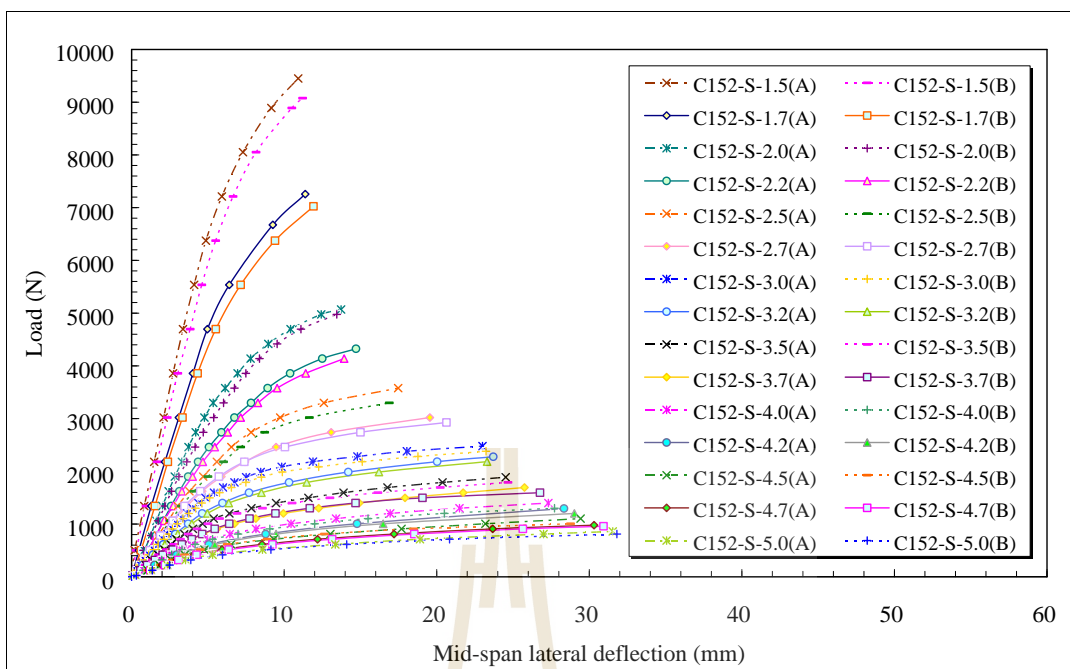
รูปที่ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



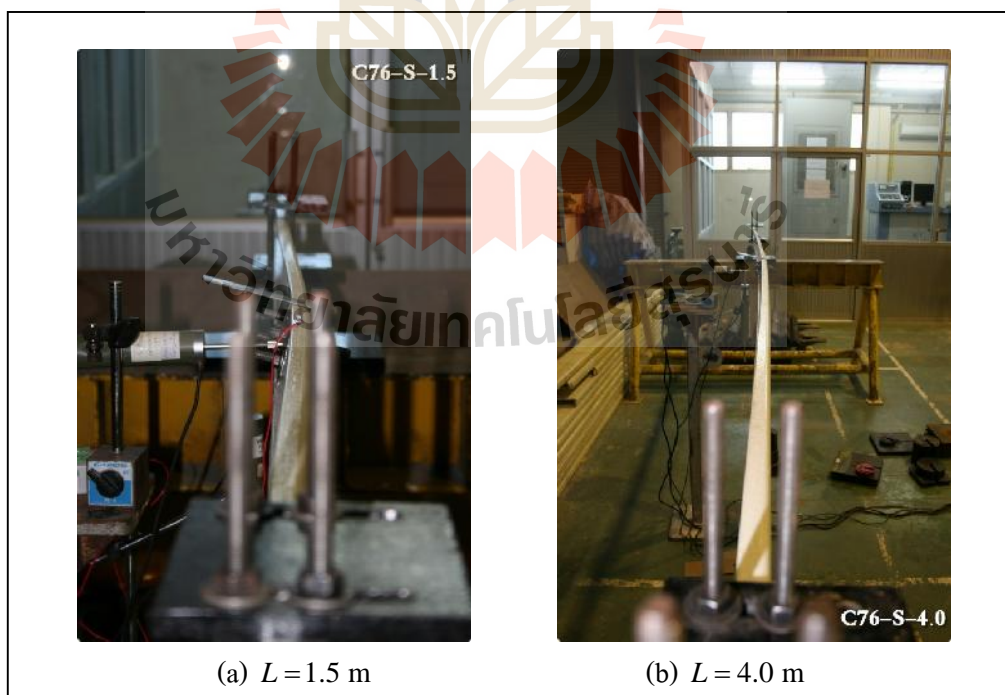
รูปที่ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



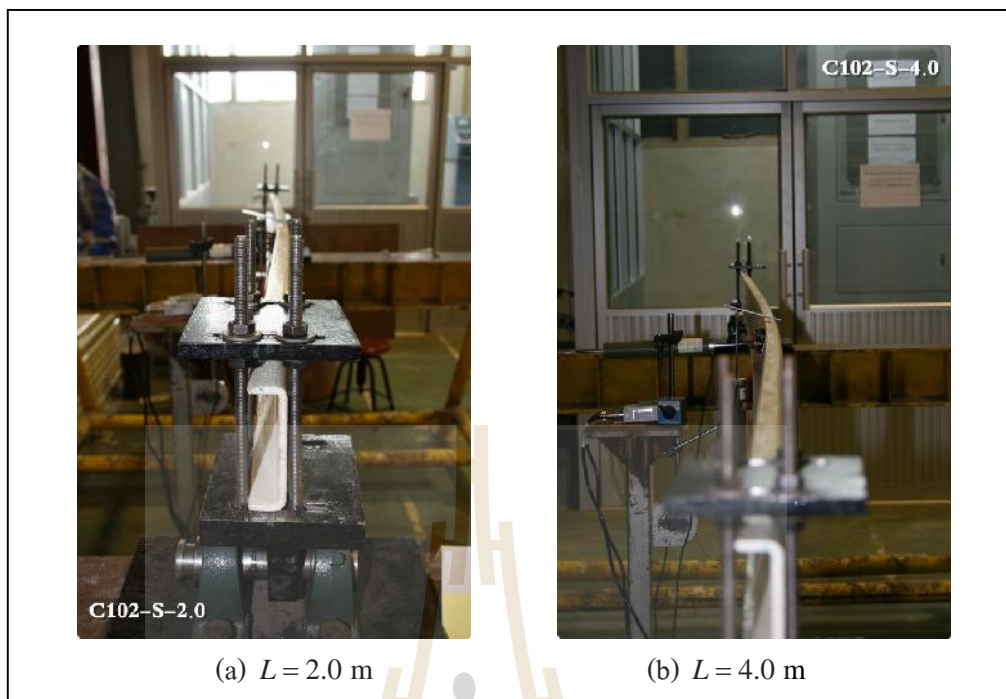
รูปที่ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



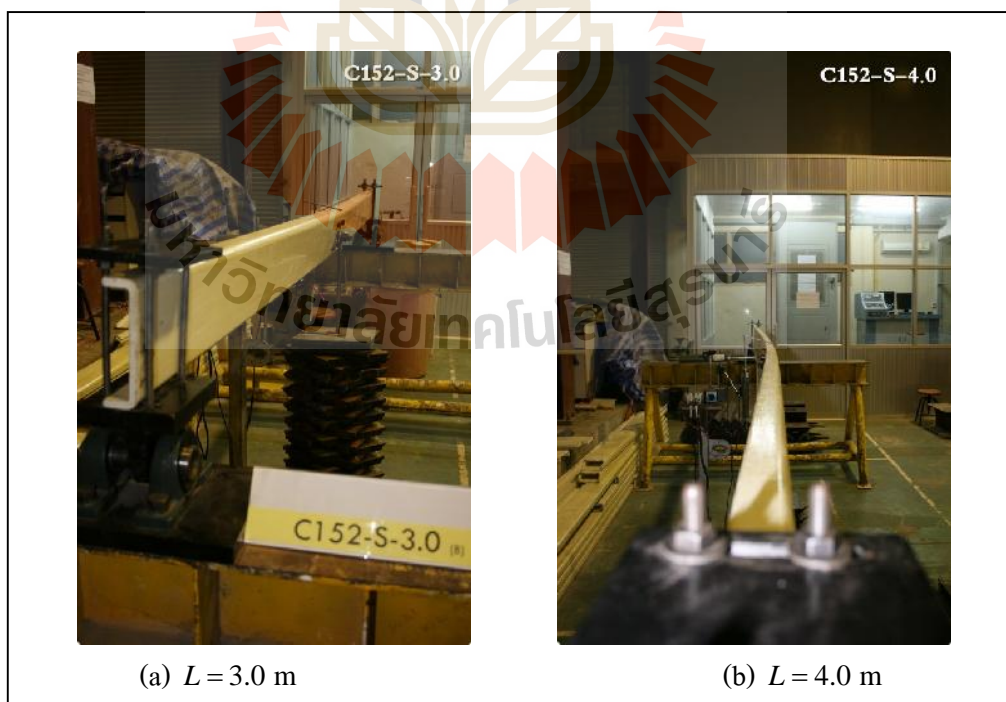
รูปที่ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.14 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.15 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.16 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ข.4 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ตารางที่ ข.5 ถึงตารางที่ ข.7 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย สำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ ข.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ

ตารางที่ ข.5 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

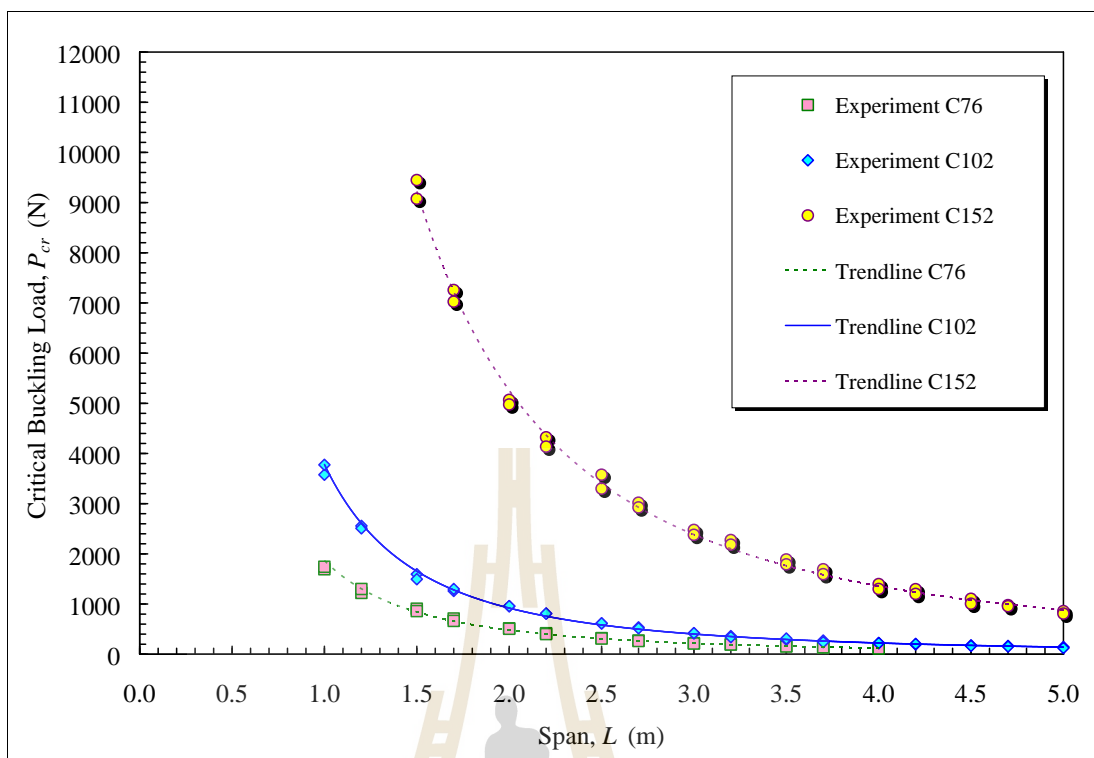
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-S-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	1692.3	1742.3	1717.3
C76-S-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	1221.8	1299.9	1260.9
C76-S-1.5	$76 \times 22 \times 6$	1.5	907.5	859.4	883.5
C76-S-1.7	$76 \times 22 \times 6$	1.7	711.3	663.2	687.3
C76-S-2.0	$76 \times 22 \times 6$	2.0	515.1	507.0	511.1
C76-S-2.2	$76 \times 22 \times 6$	2.2	417.0	399.9	408.5
C76-S-2.5	$76 \times 22 \times 6$	2.5	320.9	311.8	316.4
C76-S-2.7	$76 \times 22 \times 6$	2.7	271.9	262.8	267.4
C76-S-3.0	$76 \times 22 \times 6$	3.0	220.8	213.7	217.3
C76-S-3.2	$76 \times 22 \times 6$	3.2	193.7	193.3	193.5
C76-S-3.5	$76 \times 22 \times 6$	3.5	159.1	154.6	156.9
C76-S-3.7	$76 \times 22 \times 6$	3.7	134.2	138.3	136.3
C76-S-4.0	$76 \times 22 \times 6$	4.0	120.8	115.8	118.3

ตารางที่ ข.6 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C102-S-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	3577.9	3774.1	3676.0
C102-S-1.2	$102 \times 29 \times 6$	1.2	2557.6	2510.0	2533.8
C102-S-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	1594.2	1496.1	1545.2
C102-S-1.7	$102 \times 29 \times 6$	1.7	1262.0	1299.9	1281.0
C102-S-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	957.5	959.4	958.5
C102-S-2.2	$102 \times 29 \times 6$	2.2	809.4	811.3	810.4
C102-S-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	613.2	615.1	614.2
C102-S-2.7	$102 \times 29 \times 6$	2.7	534.7	517.0	525.9
C102-S-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	417.0	418.9	418.0
C102-S-3.2	$102 \times 29 \times 6$	3.2	361.0	340.6	350.8
C102-S-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	291.9	311.9	301.9
C102-S-3.7	$102 \times 29 \times 6$	3.7	271.9	241.9	256.9
C102-S-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	222.8	221.9	222.4
C102-S-4.2	$102 \times 29 \times 6$	4.2	194.6	204.6	199.6
C102-S-4.5	$102 \times 29 \times 6$	4.5	176.2	166.6	171.4
C102-S-4.7	$102 \times 29 \times 6$	4.7	164.2	154.2	159.2
C102-S-5.0	$102 \times 29 \times 6$	5.0	144.2	124.6	134.4

ตารางที่ ข.7 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

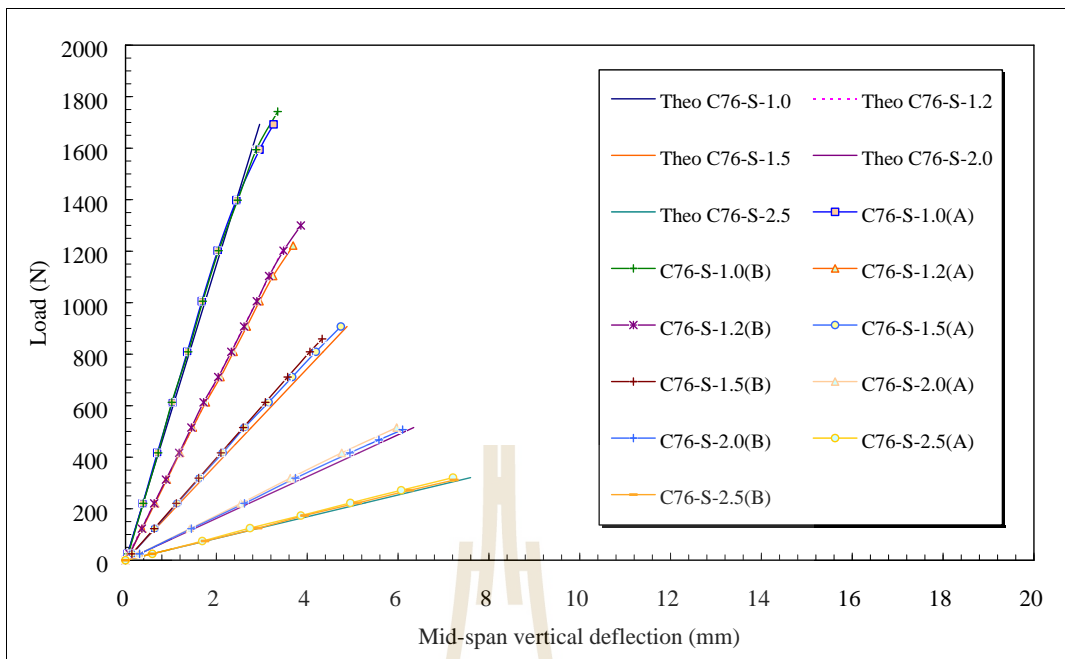
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C152-S-1.5	$152 \times 43 \times 10$	1.5	9449.5	9076.7	9263.1
C152-S-1.7	$152 \times 43 \times 10$	1.7	7256.8	7026.3	7141.6
C152-S-2.0	$152 \times 43 \times 10$	2.0	5069.1	4975.9	5022.5
C152-S-2.2	$152 \times 43 \times 10$	2.2	4323.5	4137.1	4230.3
C152-S-2.5	$152 \times 43 \times 10$	2.5	3577.7	3298.3	3438.0
C152-S-2.7	$152 \times 43 \times 10$	2.7	3018.7	2925.5	2972.1
C152-S-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	2477.1	2379.0	2428.1
C152-S-3.2	$152 \times 43 \times 10$	3.2	2276.0	2182.8	2229.4
C152-S-3.5	$152 \times 43 \times 10$	3.5	1888.5	1790.4	1839.5
C152-S-3.7	$152 \times 43 \times 10$	3.7	1692.3	1594.2	1643.3
C152-S-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	1398.0	1299.9	1349.0
C152-S-4.2	$152 \times 43 \times 10$	4.2	1295.0	1201.8	1248.4
C152-S-4.5	$152 \times 43 \times 10$	4.5	1103.7	1005.6	1054.7
C152-S-4.7	$152 \times 43 \times 10$	4.7	977.5	957.5	967.5
C152-S-5.0	$152 \times 43 \times 10$	5.0	859.4	809.4	834.4



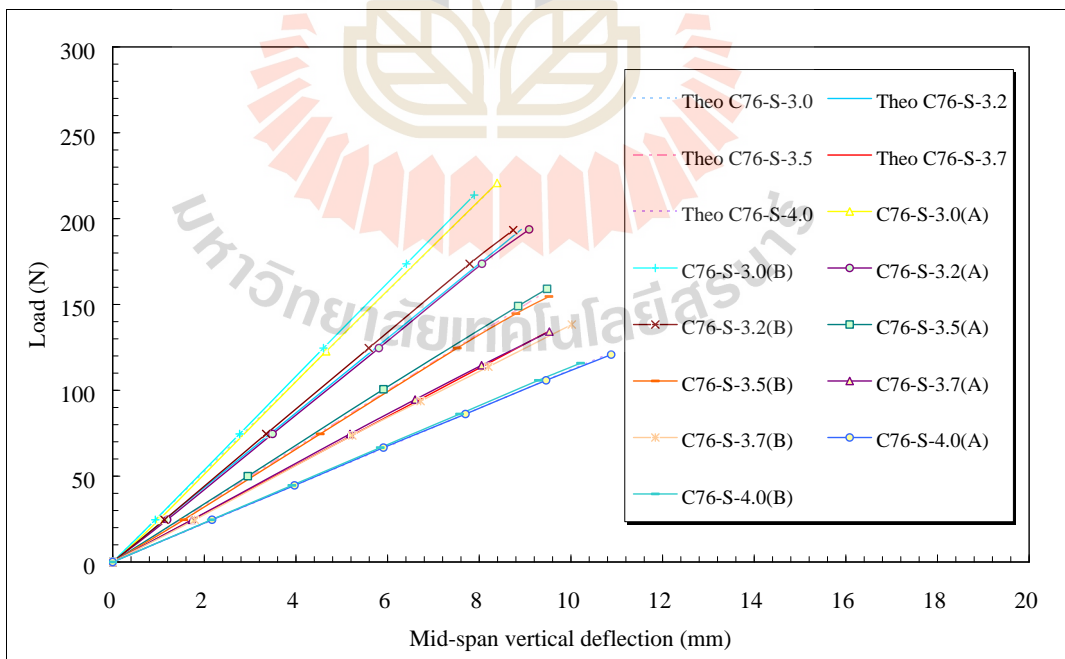
รูปที่ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก โกงเตาะและความยาว
ของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ข.5 การเปรียบเทียบระยะแอนตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

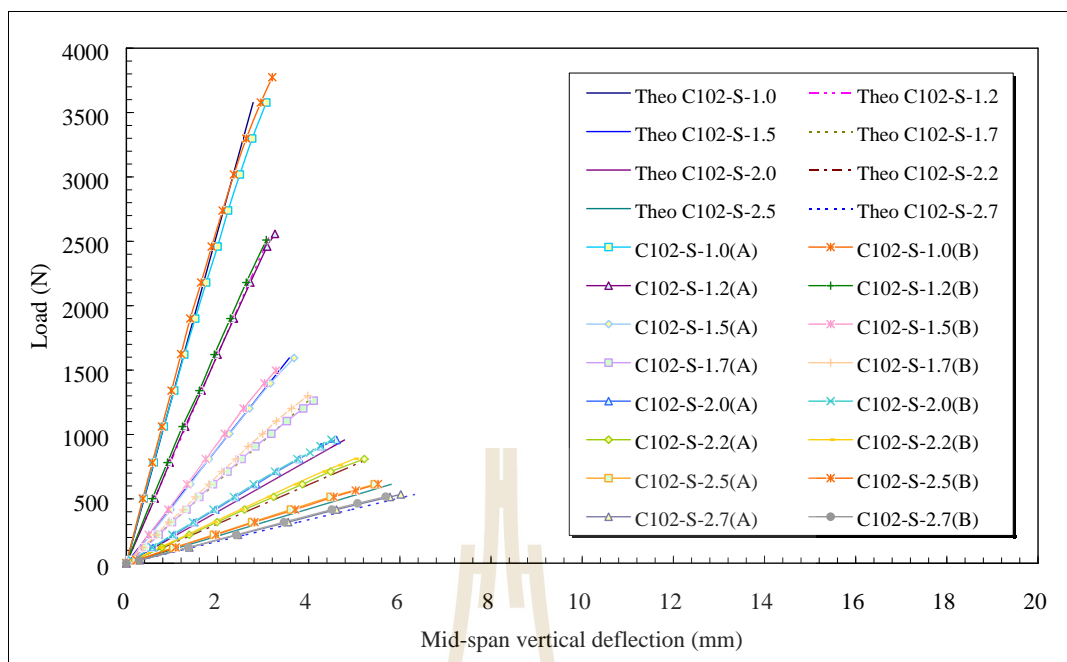
รูปที่ ข.18 ถึงรูปที่ ข.23 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอนตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางคาน โดยระยะการแอนตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (3.5) จากรูปพบว่าระยะการแอนตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko สามารถทำนายพฤติกรรมกรรมการแอนตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้และที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko อยู่ในช่วงระหว่าง 2-8%



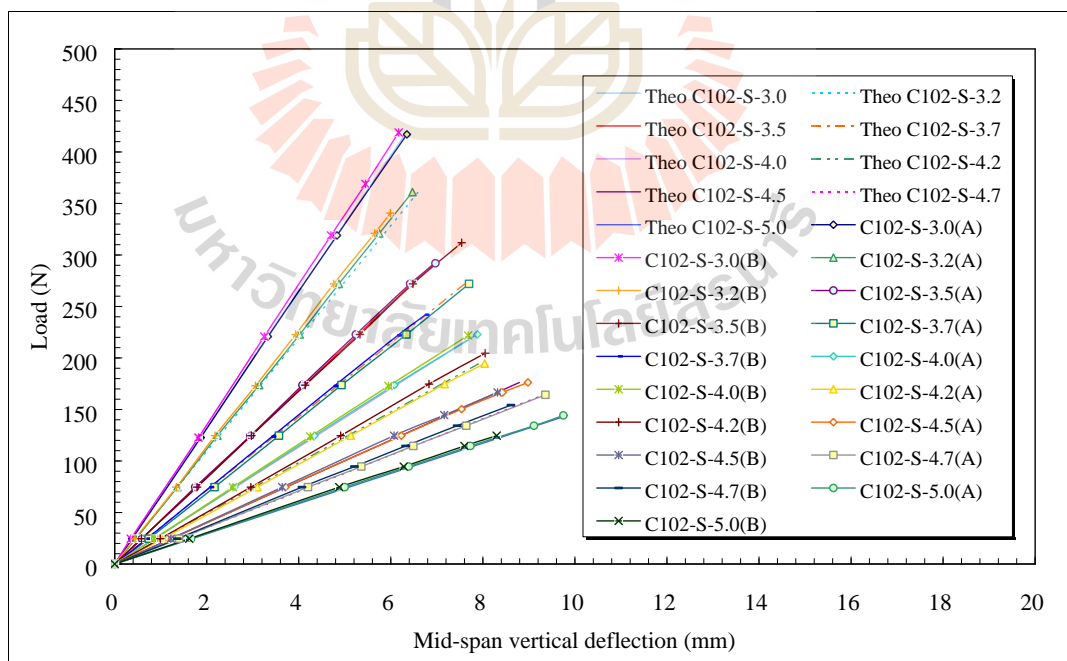
รูปที่ ข.18 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



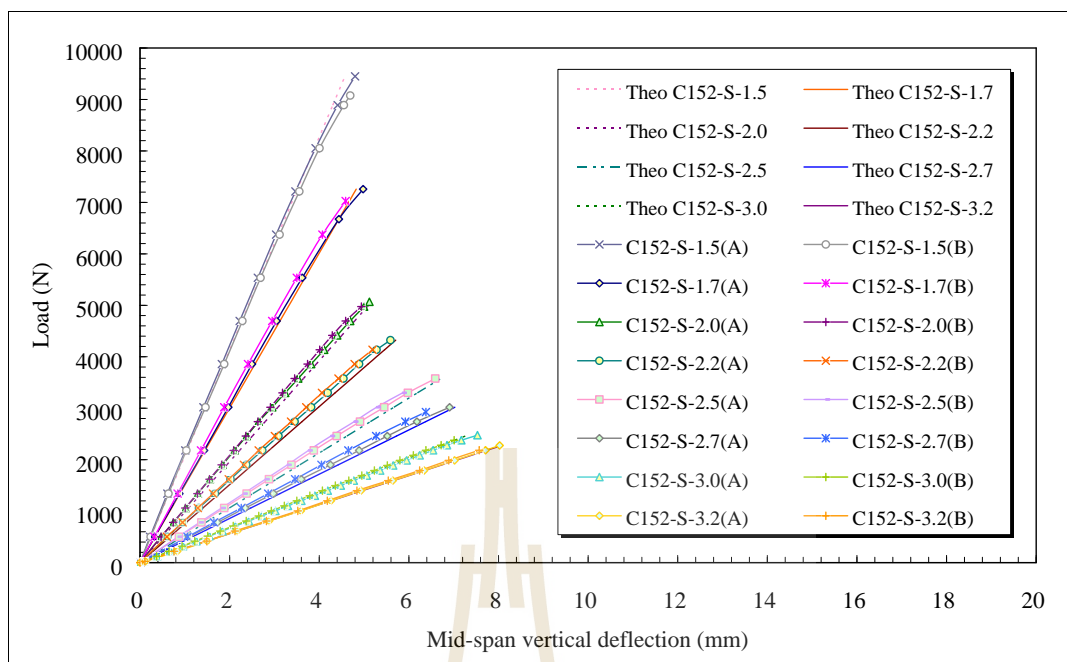
รูปที่ ข.19 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



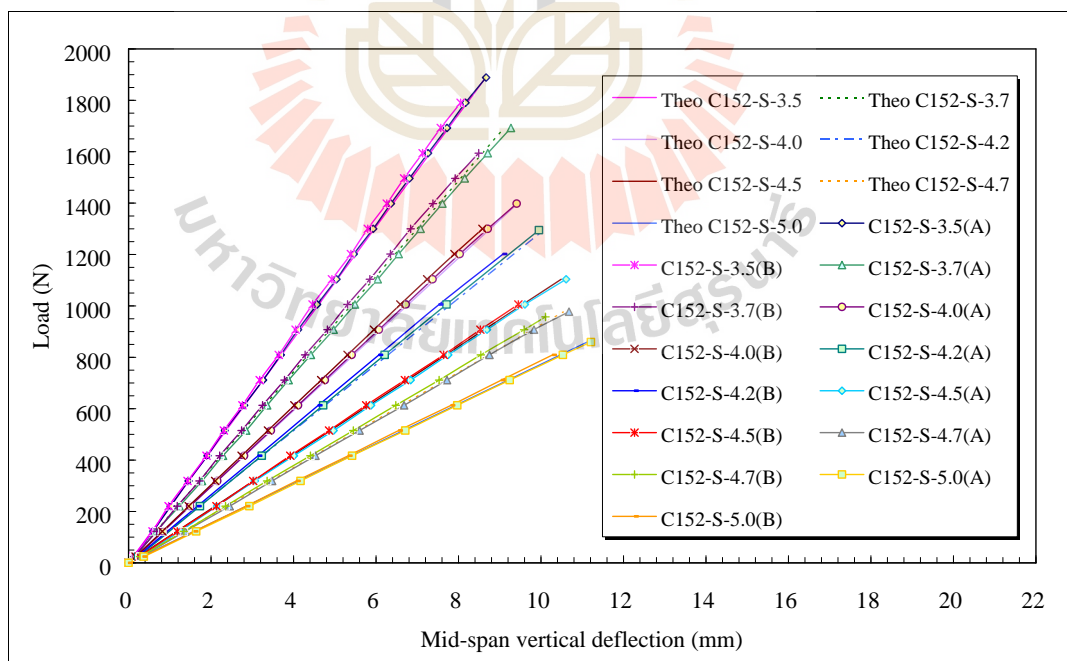
รูปที่ ข.20 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.21 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.22 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ ข.23 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ข.6 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเคาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักโก่งเคาะที่ทดสอบได้ ($P_{cr,EXP}$) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โก่งเคาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) ดังแสดงในสมการที่ (ข.1)

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L / 4 \quad (\text{ข.1})$$

ตารางที่ ข.8 ถึงตารางที่ ข.10 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.3) จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเคาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ จากตารางที่ ข.8 ถึงตารางที่ ข.10 พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.88-1.05 สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.01-1.05 แสดงให้เห็นว่า โมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม คานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.88-0.99 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเคาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเคาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเคาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ ข.8 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C76-S-1.0	13.2	423.1	435.6	429.3	484.4	0.89
C76-S-1.2	15.8	366.5	390.0	378.3	419.1	0.90
C76-S-1.5	19.7	340.3	322.3	331.3	335.2	0.99
C76-S-1.7	22.4	302.3	281.9	292.1	289.5	1.01
C76-S-2.0	26.3	257.6	253.5	255.5	240.7	1.06
C76-S-2.2	28.9	229.4	219.9	224.6	216.6	1.04
C76-S-2.5	32.9	200.6	194.9	197.7	188.5	1.05
C76-S-2.7	35.5	183.5	177.4	180.5	173.6	1.04
C76-S-3.0	39.5	165.6	160.3	162.9	155.2	1.05
C76-S-3.2	42.1	155.0	154.6	154.8	145.0	1.07
C76-S-3.5	46.1	139.2	135.3	137.2	132.1	1.04
C76-S-3.7	48.7	124.1	127.9	126.0	124.7	1.01
C76-S-4.0	52.6	120.8	115.8	118.3	115.0	1.03

ตารางที่ ข.9 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C102-S-1.0	9.8	894.5	943.5	919.0	1035.8	0.89
C102-S-1.2	11.8	767.3	753.0	760.1	869.1	0.87
C102-S-1.5	14.7	597.8	561.0	579.4	686.0	0.88
C102-S-1.7	16.7	536.4	552.5	544.4	600.5	0.91
C102-S-2.0	19.6	478.8	479.7	479.2	494.1	0.97
C102-S-2.2	21.6	445.2	446.2	445.7	437.4	1.02
C102-S-2.5	24.5	383.3	384.4	383.8	373.4	1.03
C102-S-2.7	26.5	360.9	349.0	354.9	340.4	1.04
C102-S-3.0	29.4	312.8	314.2	313.5	300.8	1.04
C102-S-3.2	31.4	288.8	272.5	280.6	279.3	1.00
C102-S-3.5	34.3	255.4	272.9	264.2	252.4	1.05
C102-S-3.7	36.3	251.5	223.8	237.6	237.2	1.00
C102-S-4.0	39.2	222.8	221.9	222.4	217.6	1.02
C102-S-4.2	41.2	204.3	214.8	209.6	206.3	1.02
C102-S-4.5	44.1	198.2	187.4	192.8	191.5	1.01
C102-S-4.7	46.1	192.9	181.2	187.1	182.8	1.02
C102-S-5.0	49.0	180.3	155.8	168.0	171.1	0.98

ตารางที่ ข.10 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C152-S-1.5	9.9	3543.6	3403.8	3473.7	3941.9	0.88
C152-S-1.7	11.2	3084.1	2986.2	3035.2	3382.1	0.90
C152-S-2.0	13.2	2534.6	2488.0	2511.3	2829.8	0.89
C152-S-2.2	14.5	2377.9	2275.4	2326.7	2601.5	0.89
C152-S-2.5	16.4	2236.1	2061.4	2148.8	2309.6	0.93
C152-S-2.7	17.8	2037.6	1974.7	2006.2	2146.3	0.93
C152-S-3.0	19.7	1857.8	1784.3	1821.0	1913.0	0.95
C152-S-3.2	21.1	1820.8	1746.2	1783.5	1766.4	1.01
C152-S-3.5	23.0	1652.4	1566.6	1609.5	1585.1	1.02
C152-S-3.7	24.3	1565.4	1474.6	1520.0	1484.1	1.02
C152-S-4.0	26.3	1398.0	1299.9	1349.0	1355.1	1.00
C152-S-4.2	27.6	1359.8	1261.9	1310.8	1281.2	1.02
C152-S-4.5	29.6	1241.7	1131.3	1186.5	1184.7	1.00
C152-S-4.7	30.9	1148.6	1125.1	1136.8	1128.2	1.01
C152-S-5.0	32.9	1074.3	1011.8	1043.0	1053.2	0.99

ภาคผนวก ค

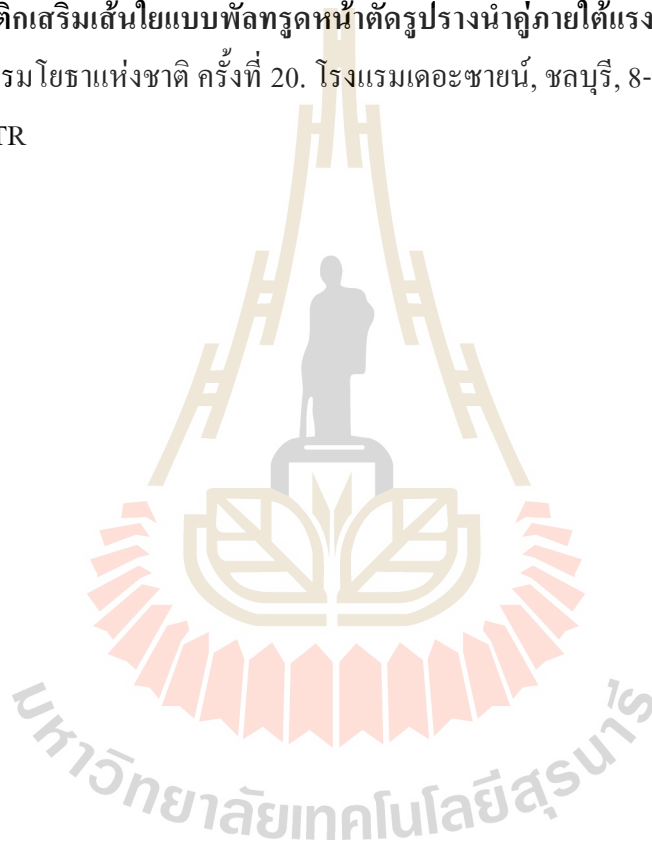
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ปรัชญา ก้านบัว สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกานต์ ชำรงวุฒิ (2557). การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด. การประชุมวิชาการและนำเสนอผลงานวิจัย ครั้งที่ 5. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, นครราชสีมา, 11-12 กันยายน 2557, หน้า 9-13.

ปรัชญา ก้านบัว สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักรกานต์ ชำรงวุฒิ (2558). การศึกษาโดยการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีดหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20. โรงแรมเดอะชาयน์, ชลบุรี, 8-10 กรกฎาคม 2558, หน้า 071-STR



การทดสอบคานพลาสติคเสริมเส้นใยแบบพัลทรูคหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัด Tests on PFRP Beams with Double Channel Sections under Flexure

ปรัชญา ก้านบัว^{1,*}, สิทธิชัย แสงอาทิตย์² และ จักรกานธ์ อารังวุฒิ³

^{1,2}สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: ¹prachya_m@hotmail.com, ²stichai@sut.ac.th, ³jaksada@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาโดยการทดสอบของคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (pinned – pinned supports) ภายใต้แรงดัด โดยการศึกษาที่มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคานเมื่อถูกกระทำโดยแรงดัด ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ประกอบขึ้นจากวัสดุพลาสติคเสริมเส้นใยแก้วแบบพัลทรูคหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ มีขนาดหน้าตัด 76x22x6 mm จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 18 ตัวอย่าง โดยมีอัตราส่วน L/d ตั้งแต่ 6.6 ถึง 52.6 จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนประมาณ 80% ถึง 95% ของแรงที่จุดวิบัติ โดยลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 6.6 ถึง 9.2 จะมีลักษณะการวิบัติที่เนื้อวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนตามขวาง (transverse shear) และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 13.1 ถึง 52.6 จะมีลักษณะการวิบัติโดยเกิดการโก่งคดทางด้านข้าง (lateral buckling)

คำหลัก: คาน, พัลทรูค, วัสดุพลาสติคเสริมเส้นใย, หน้าตัดรูปรางน้ำคู่, แรงดัด

Abstract

This paper presents the experimental study on the PFRP beams with pinned-pinned supports under flexure. The objectives of this study are to examine the structural behaviors and the modes of failure for the beams under flexure with three-point loading test. The beam specimens were made of Pultruded glass fiber reinforced plastic (PFRP) with the cross-sectional dimensions of 76 × 22 × 6 mm. A total of 18 specimens were tested with the L/d ratios ranging from 6.6 to 52.6. The experiment results showed that the beam specimens have a linear elastic behavior response up to the range of 80% to 95% of the failure load. The modes of failure can be classified into 2 groups. The specimens have the L/d ratios between 6.6 and 9.2 were failed by the material failure mode caused by the transverse shear forces, and the specimens have L/d ratios between 13.1 and 52.6 were failed by lateral buckling failure mode.

Keywords: Beam, Pultrusion, Pultruded fiber-reinforced plastic, Double C-section, Flexure

1. บทนำ

งานก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการนำเหล็กรูปพรรณหรือเหล็กโครงสร้าง (structural steel) มาใช้กันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนของโครงสร้างหลัก (primary structural member) และชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural member) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหนือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ หลายประการ ได้แก่ อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) ความเหนียว (ductility) และความแกร่ง (toughness) ที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตามโครงสร้างเหล็กยังมีจุดด้อยอยู่บางประการ อย่างเช่น โครงสร้างเหล็กที่ตั้งอยู่แถบชายฝั่งทะเลหรือพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งมีประสบการณ์อย่างมากเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องมาจากการเกิดสนิม ทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น จึงก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม (repair and maintenance) ตามมาอีกมาก

ในที่ผ่านมา นักวิจัยได้มีการค้นคว้าวัสดุก่อสร้างที่นำมาทดแทนเหล็กรูปพรรณ สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างใหม่ รวมถึงการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างเดิมที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน ซึ่งได้แก่วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic; GFRP) ซึ่งมีผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) โดยในปัจจุบัน วิศวกรได้นำวัสดุ PFRP นี้ไปใช้ในโครงสร้างหลายประเภท เช่น โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น (cooling tower) และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการกัดกร่อนสูง หรือโครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่ถูกการกัดกร่อนจากสนิม รวมทั้งโครงสร้างในบริเวณพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ไม่อำนวย เช่น พื้นที่ ๆ เป็นภูเขา ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา อาทิเช่น หอสูง ราวสะพาน ราวระเบียง และรั้วกันตึกต่าง ๆ [1] อย่างไรก็ตาม ความรู้ความเข้าใจในชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุ PFRP ยังไม่มีความสมบูรณ์ในทุกกรณีของการใช้งาน โดยเฉพาะคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ดังนั้น วัตถุประสงค์

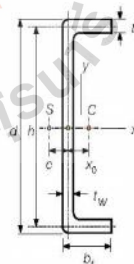
ของการวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษา พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด โดยมีสภาวะของจตุรรองรับแบบ pinned-pinned supported และการทดสอบแบบ three-point loading test

2. การทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษา เป็นคานหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ ซึ่งถูกผลิตโดยกระบวนการ pultrusion จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยบริษัท หิรัญ เอส เสวี จำกัด จังหวัดนครปฐม โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้โดยใช้เหล็กกล่องเป็นตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็กกล่อง คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากงานวิจัยของ หวังแก้ว บุญสวน และคณะ [2-3] ดังตารางที่ 1 และ 2 โดยมีรูปหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้เดี่ยวและรูปร่างน้ำคู้คู่ ดังที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้เดี่ยว

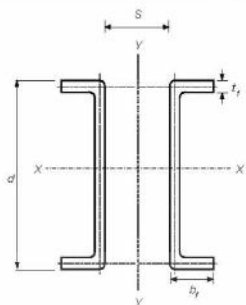
ขนาดหน้าตัด	d (mm)	b _y (mm)	t _f (mm)	t _w (mm)	h (mm)	e (mm)	x ₀ (mm)
76×22×6	76	22	6	6	70	7.19	3.2593
102×29×6	102	29	6	6	96	9.34	4.5068
152×43×10	152	43	10	10	142	13.87	6.5092



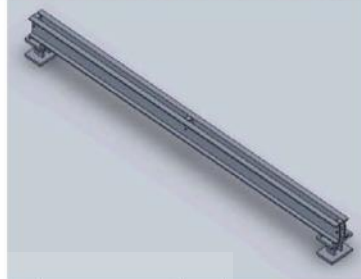
รูปที่ 1 หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้เดี่ยว

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของคานประกอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ที่ใช้ในการศึกษา [4]

ขนาดหน้าตัด	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	E _c (MPa)	I _c (mm ⁴)	J _c (mm ⁴)	E _c (GPa)	G _{cT} (GPa)	v _{cT}	s (mm)
2×76×22×6	1296	121.86	910328	937280	10.51	2.9	0.15	40
2×102×29×6	1776	121.86	2334672	2347048	10.51	2.9	0.15	56
2×152×43×10	4360	121.86	12518133	12138493	10.51	2.9	0.15	80



รูปที่ 2 หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ (connector)

ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีจำนวนรวม 18 ตัวอย่าง โดยมีความยาวอยู่ในช่วง 0.50 m ถึง 4.00 m และมีอัตราส่วนระยะระหว่างจุดรองรับและความลึกของหน้าตัด (L/d) อยู่ระหว่าง 6.6 ถึง 52.6 ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Specimens	L (m)	L/d
2C76-0.5-0.25	0.5	6.58
2C76-0.7-0.35	0.7	9.21
2C76-1.0-0.50	1.0	13.16
2C76-1.5-0.75	1.5	19.74
2C76-2.0-1.00	2.0	26.32
2C76-2.5-1.25	2.5	32.89
2C76-3.0-1.50	3.0	39.47
2C76-3.5-1.75	3.5	46.05
2C76-4.0-2.00	4.0	52.63

ตัวอย่างทดสอบ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้จะมีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ (connector) ทั้งหมด 3 จุดคือที่ปลายทั้ง 2 ด้าน และที่กึ่งกลางของความยาวดังรูปที่ 3

ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า e หรือ initial out-of straightness โดยเปรียบเทียบตามมาตรฐาน ASTM D3917 [4] พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่า e ต่ำกว่า $L/240$ ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังนั้นจึงไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) จากนั้น คานตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งบนจุดรองรับแบบ pinned-pinned ดังรูปที่ 4 พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการโก่งตัวในแนวตั้ง (vertical) (และแนวทางด้านข้าง (lateral) และดำเนินการทดสอบโดยการใส่น้ำหนักที่กึ่งกลางคานและบันทึกค่าการโก่งตัวอย่างเป็นลำดับ พร้อมบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จนกระทั่ง ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

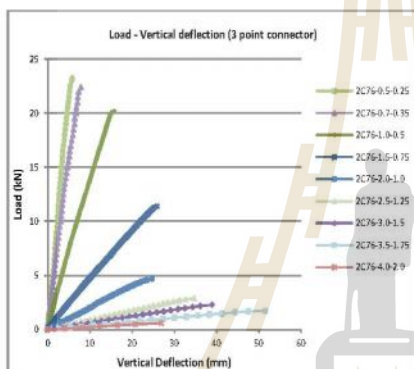


รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกระทำของคาน

สำหรับพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง (linear elastic) จนประมาณ 80-95 % ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติดังรูปที่ 5



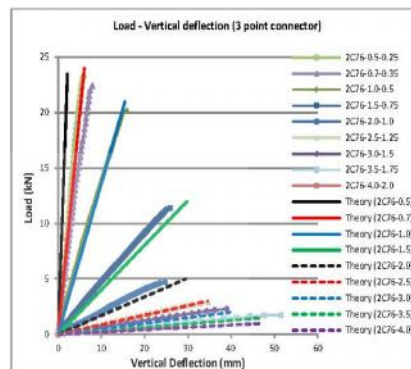
รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน

เมื่อเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานที่ได้จากการทดสอบกับค่าตามทฤษฎีพบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าการโก่งตัวมากกว่าค่าตามทฤษฎีในช่วงอัตราส่วน L/d น้อยกว่า 10 เนื่องจากผลของแรงเฉือน ส่วนช่วงที่อัตราส่วน L/d มากกว่า 10 จะได้ค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งหมายความว่า เมื่อคานมีความยาวเพิ่มขึ้น ผลของแรงเฉือนที่มีต่อพฤติกรรมการโก่งตัวในแนวตั้งจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6

3.2 ลักษณะการวิบัติของคาน

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรก L/d ระหว่าง 6.6-9.2 จะวิบัติโดยการแตกที่เนื้อวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนตามขวาง (transverse shear) ดังรูปที่ 7 โดยการวิบัติลักษณะนี้จะเกิดรอยแตกเป็นแนว

ยาวบริเวณกึ่งกลางของหน้าตัดเนื่องจากบริเวณนั้นจะมีหน่วยแรงเฉือนตามขวางเกิดขึ้นสูงที่สุด



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานระหว่างผลการทดสอบกับทฤษฎี



รูปที่ 7 การวิบัติของตัวอย่างจากแรงเฉือนตามขวาง

สำหรับกลุ่มที่สอง L/d ระหว่าง 13.2-52.6 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติโดยการโก่งเตาทางด้านข้าง (lateral buckling) ดังรูปที่ 8 โดยการวิบัติลักษณะนี้จะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด กล่าวคือเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นการโก่งตัวในแนวตั้งก็จะเพิ่มขึ้นตามในลักษณะที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแต่การโก่งตัวทางด้านข้างจะไม่เกิดขึ้นหรือมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการโก่งตัวในแนวตั้ง จนกระทั่งถึงจุดที่มีแรงกระทำ

สูงสุดการโก่งตัวทางด้านข้างจะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด ทำให้ตัวอย่างทดสอบไม่สามารถที่จะรับแรงกระทำเพิ่มได้อีก



รูปที่ 8 การวิบัติของตัวอย่างแบบโค้งเดาะทางด้านข้าง

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบคานหน้าตัดประกอบรูปร่างน้ำคูลภายใต้แรงค้ำโดยมีจุดรองรับเป็นแบบ pinned-pinned ได้ผลสรุปที่สำคัญดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง (linear elastic) จนกระทั่งถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

2. ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 แบบโดยมีอัตราส่วน L/d เท่ากับ 10 เป็นตัวแบ่งพฤติกรรม ถ้าคานมีอัตราส่วน L/d น้อยกว่า 10 จะมีลักษณะการวิบัติแบบวิบัติที่เนื้อวัสดุ (material failure) แต่หากคานมีอัตราส่วน L/d มากกว่า 10 จะมีลักษณะการวิบัติโดยเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้าง (lateral buckling)

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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*, Vol. 6(2), pp. 73-87.

- [2] หวังแก้ว บุญสวน, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์สวัสดิกุล .(2552). พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเค้น และการตัด, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [3] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. (2552). รายงานการวิจัยเรื่องการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างน้ำ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] Chatwivat C., Seangathit S. and Thumrongvut J. (2012). An experimental study on PFRP built-up columns with double C-sections under axial compression, *17th National Convention on Civil Engineering*, pp. STR-20.
- [5] American Society for Testing and Materials (2011). *Annual Book of ASTM Standard: Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes*. ASTM Standard No. D3917. PA.



การศึกษาโดยการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด
หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ภายใต้แรงดัด
Experimental Study on Pultruded Fiber-Reinforced Plastic
Built-up Beams with Double Channel Sections under Flexure

ปรัชญา ก้านบัว^{1*} สิทธิชัย แสงอาทิตย์² และ จักรกาน อารังวุฒิ³

^{1,2} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

³ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

E-mail: ¹prochya_m@hotmail.com, ²sittichai@sut.ac.th, ³jaksoda@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาโดยการทดสอบของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ที่มีจุดรองรับอย่างง่าย (pinned - pinned supports) ภายใต้แรงดัด โดยการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคานเมื่อถูกกระทำโดยแรงดัด ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ประกอบขึ้นจากรัสตูลพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วแบบพัลทรีดขึ้นหน้าตัดรูปร่างน้ำคู่ มีขนาดหน้าตัด 76x22x6 mm จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 52 ตัวอย่าง โดยมีอัตราส่วน L/d ตั้งแต่ 6.6 ถึง 52.6 และมีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 2 ถึง 9 จุด จากการทดสอบพบว่า ตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงประมาณ 80% ถึง 95% ของแรงที่จุดวิบัติ โดยลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 6.6 ถึง 9.2 จะมีลักษณะการวิบัติที่เนื้อวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนตามขวาง (transverse shear) และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน L/d อยู่ระหว่าง 13.1 ถึง 52.6 จะมีลักษณะการวิบัติโดยเกิดการโก่งคดทางด้านข้าง (lateral buckling)

คำสำคัญ: คาน, วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย, หน้าตัดรูปร่างน้ำคู่, แรงดัด

Abstract

This paper presents the experimental study on the PFRP beams with pinned-pinned supports under flexure. The objectives of this study are to examine the structural behavior and the modes of failure for the beams under flexure with three-point loading test. The beam specimens were made of Pultruded glass fiber-reinforced plastic (PFRP) with the cross-sectional dimensions of 76x22x6 mm. A total of 52 specimens were tested

with the L/d ratios ranging from 6.6 to 52.6 and had 2 to 9 connections. The experiment results showed that the beam specimens have a linear elastic behavior response up to the range of 80% to 95% of the failure load. The modes of failure can be classified into 2 groups. The specimens had the L/d ratios between 6.6 and 9.2 were failed by the material failure mode caused by the transverse shear forces, and the specimens had L/d ratios between 13.1 and 52.6 were failed by lateral buckling failure mode.

Keywords: Beam, Pultruded fiber-reinforced plastic, Double C-section, Flexure

1. คำนำ

งานก่อสร้างในปัจจุบันได้มีการนำเหล็กรูปพรรณหรือเหล็กโครงสร้าง (structural steel) มาใช้กันอย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนของโครงสร้างหลัก (primary structural member) และชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural member) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหนือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ หลายประการ ได้แก่ อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) ความเหนียว (ductility) และความแกร่ง (toughness) ที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตามโครงสร้างเหล็กยังมีจุดด้อยอยู่บางประการ อย่างเช่น โครงสร้างเหล็กที่ตั้งอยู่แนวชายฝั่งทะเลหรือพื้นที่ที่มีการกัดกร่อนสูง ซึ่งมีก่ปัญหาอย่างหนักเรื่องการกัดกร่อนของเหล็กเนื่องมาจากการเกิดสนิม ทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้น จึงก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และซ่อมแซม (repair and maintenance) ตามมาอีกมาก

ในที่สุดนักวิจัยได้มีการค้นคว้าวัสดุก่อสร้างที่นำมาทดแทนเหล็ก รูปพรรณ สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างใหม่ รวมถึงการซ่อมแซมและ บำรุงรักษาโครงสร้างเดิมที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน ซึ่งได้แก่ วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic, GFRP) ซึ่งมีผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFPR) โดยในปัจจุบัน วิศวกรได้นำวัสดุ PFPR นี้ไปใช้ในโครงสร้าง หลายประเภท เช่น โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น (cooling tower) และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการกัดกร่อนสูง หรือ โครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่ถูกการกัดกร่อนจากคลื่น รวมทั้ง โครงสร้างในบริเวณพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความ สลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ไม่อำนวย เช่น พื้นที่ ๆ เป็นภูเขาสูงชัน ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา อาทิเช่น หอ สูง รวบรวมฝน รวบรวมเสียงและรั้วกันตึกต่าง ๆ [1] อย่างไรก็ตาม ความรู้ ความเข้าใจในชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำด้วยวัสดุ PFPR ยังไม่มีความสมบูรณ์ใน ทุกกรณีของการใช้งาน โดยเฉพาะคน PFPR หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษา พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน PFPR หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัด โดยมีสภาวะของจตุรรองรับแบบ pinned-pinned supported และการทดสอบแรงดัดแบบ three-point loading test

เนื่องจากคู่มือออกแบบของ ASCE อยู่บนพื้นฐานของ Working Stress Design (WSD) ซึ่งค่อนข้างล้าสมัยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นฐานการออกแบบ Load Resistant Factor Design (LRFD) ที่ใช้การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยมาตรฐานการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดมาตามฐานหนึ่งสำหรับเหล็กรางน้ำคู่คือ AISI-LRFD [2] ซึ่งกำหนดให้สมการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคู่ภายใต้แรงดัดอยู่ในรูป

$$M_u \leq \phi M_n \tag{1}$$

โดยที่

M_u คือ โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มแล้ว (factored service moment)

ϕ คือ ตัวคูณความต้านทาน (สำหรับข้ออาคารรับแรงดัด)

M_n คือ กำลังโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength)

นอกจากนี้ สมการทำนายการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานหาได้จาก Euler - Bernoulli Beam Theory ที่อยู่ในรูปของสมการ

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \tag{2}$$

โดยที่

Δ คือ ค่าการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน (deflection at mid span)

P คือ แรงกระทำเป็นจุด (central point load)

L คือ ความยาวของคาน (span length)

E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

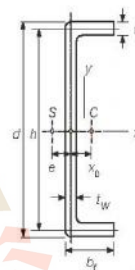
I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัด (moment of inertia)

2. ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้ง

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นส่วนหน้าตัดรูปรางน้ำ ซึ่งถูก ผลิตโดยกระบวนการผลิตพัลตรูชั่น (pultrusion process) จาก E-glass fiber และ polyester resin โดยบริษัท ทีริยู เอส เสวี จำกัด จังหวัด นครปฐม โดยถูกนำมาประกอบเป็นหน้าตัดรูปรางน้ำคู่โดยใช้เหล็กกล่องเป็น ตัวคั่น (spacer) และยึดเข้ากันด้วยสลักเกลียวผ่านจุดศูนย์กลางของเหล็ก กล่อง สมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกศึกษาโดยหวังแก้ว บุญ สาน และคณะ [3-4] ดังตารางที่ 1 และ 2 โดยมีรูปหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว และรางน้ำคู่ ดังที่แสดงในรูปที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

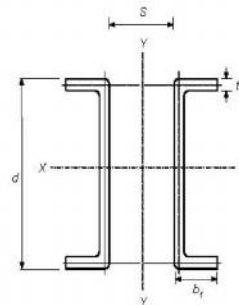
ขนาดหน้าตัด	d_f (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	h (mm)	e (mm)	x_c (mm)
76×22×6	76	22	6	6	70	7.19	3.2593
102×29×6	102	29	6	6	96	9.34	4.5068
152×43×10	152	43	10	10	142	13.87	6.5092



รูปที่ 1 หน้าตัดรูปรางน้ำเดี่ยว

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของคานประกอบ PFPR หน้าตัดรูปรางน้ำคู่ที่ใช้ในการศึกษา [5]

ขนาดหน้าตัด (mm)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)	F_y^c (MPa)	F_u^c (MPa)	J_y (cm ⁴)	E_c (GPa)	G_{LT} (GPa)	v_{LT}	s (mm)
2×76×21×6	1296	121.86	110.523	937280	10.51	2.9	0.15	40
2×102×29×6	1776	121.86	109.4672	2347348	10.51	2.9	0.15	36
2×152×43×10	4360	121.86	125.18133	12138493	10.51	2.9	0.15	80



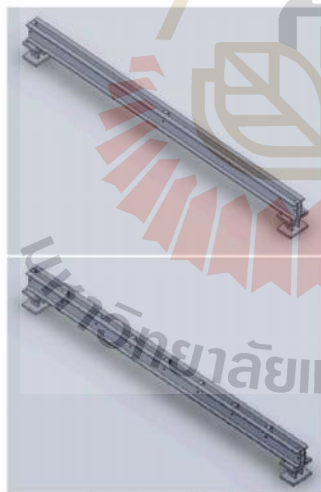
รูปที่ 2 หน้าตัดรูปรางน้ำคู่

ในการศึกษานี้ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้มีจำนวนรวม 52 ตัวอย่าง โดยมี ความยาวอยู่ในช่วง 0.50 m ถึง 4.00 m มีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 2 ถึง 9 จุด และมีอัตราส่วนระหว่างจุดรองรับและความลึกของหน้าตัด (L/d) อยู่ ระหว่าง 6.6 ถึง 52.6 ชื่อของตัวอย่างทดสอบจะอยู่ในรูป 2C76-L-s โดยที่ L และ s คือ ความยาวของตัวอย่างทดสอบและระยะห่างระหว่างจุดเชื่อมต่อ ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดตัวอย่างทดสอบ

Specimens	L (m)	L/d
2C76-0.5-s	0.5	6.58
2C76-0.7-s	0.7	9.21
2C76-1.0-s	1.0	13.16
2C76-1.5-s	1.5	19.74
2C76-2.0-s	2.0	26.32
2C76-2.5-s	2.5	32.89
2C76-3.0-s	3.0	39.47
2C76-3.5-s	3.5	46.05
2C76-4.0-s	4.0	52.63

ตัวอย่างทดสอบ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำจะมีการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ (connector) ตั้งแต่ 2 จุดจนถึง 9 จุด โดยเริ่มจากปลายทั้ง 2 ด้าน หลังจากนั้น จะค่อย ๆ เพิ่มที่กึ่งกลางของจุดเชื่อมต่อจนกระทั่งครบ 9 จุดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งจุดเชื่อมต่อ

ก่อนการทดสอบ ตัวอย่างทดสอบจะถูกวัดค่า e หรือ initial out-of-straightness โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM D3917 [6] พบว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีค่า e ต่ำกว่า $L/240$ ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ดังนั้น จึงไม่พิจารณาผลของการโก่งตัวเริ่มต้น (initial crookedness) จากนั้น คาน ตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งบนจุดรองรับแบบ pinned-pinned ดังรูปที่ 4 พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการโก่งตัวในแนวตั้ง (vertical) และแนวท

ด้านข้าง (lateral) และดำเนินการทดสอบโดยการให้แรงกระทำที่กึ่งกลาง คานและบันทึกค่าการโก่งตัวอย่างเป็นลำดับพร้อมบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้อง จนกระทั่ง ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

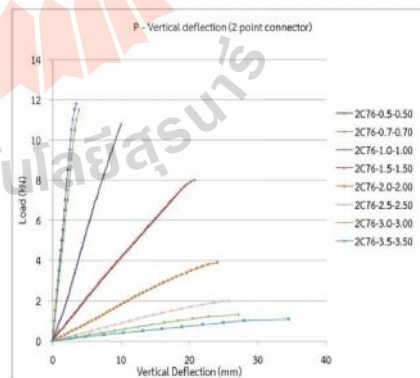


รูปที่ 4 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

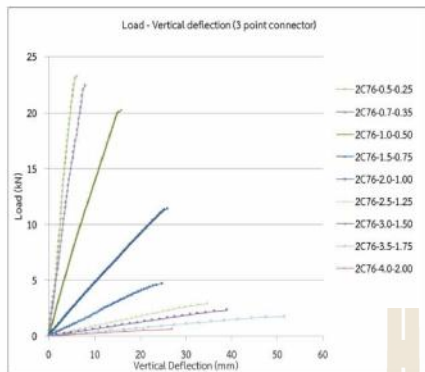
3. ผลการทดสอบ

3.1 พฤติกรรมการรับแรงกระทำของคาน

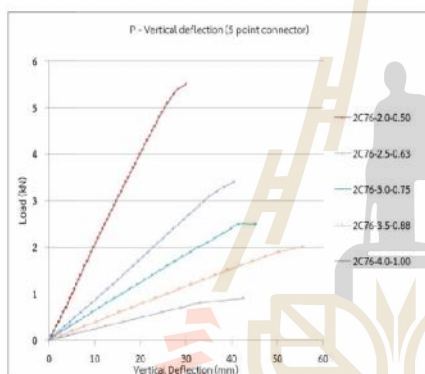
สำหรับพฤติกรรมและลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ จากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคาน ตัวอย่าง ทดสอบมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง (linear elastic) จนประมาณ 80-95 % ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นจะมีพฤติกรรมแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติดังแสดงในรูปที่ 5 ถึง รูปที่ 8



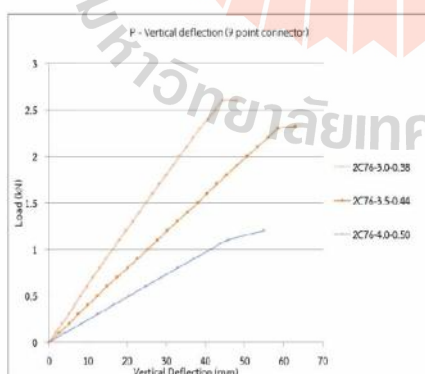
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของ ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 3 จุด

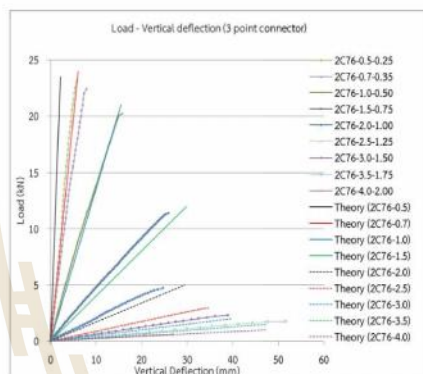


รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 5 จุด



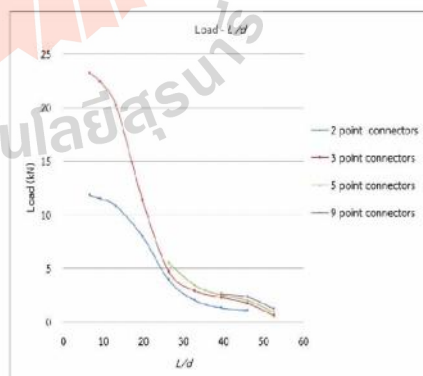
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางคานของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดเชื่อมต่อ 9 จุด

เมื่อเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานที่ได้จากการทดสอบกับค่าตามทฤษฎีของ Euler-Bernoulli พบว่าค่าที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าการโก่งตัวมากกว่าค่าตามทฤษฎีในช่วงอัตราส่วน L/d น้อยกว่า 10 เนื่องจากผลของแรงเฉือน ส่วนช่วงที่อัตราส่วน L/d มากกว่า 10 จะได้ค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งหมายความว่า เมื่อคานมีความยาวเพิ่มขึ้น ผลของแรงเฉือนที่มีต่อพฤติกรรมของการโก่งตัวในแนวตั้งจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบค่าการโก่งตัวในแนวตั้งที่จุดกึ่งกลางคานระหว่างผลการทดสอบกับค่าทฤษฎี

การรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบเมื่อทำการเพิ่มจุดเชื่อมต่อจาก 2 จุดไปจนกระทั่งถึง 9 จุด จะทำให้ตัวอย่างทดสอบสามารถรับแรงกระทำได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนของจุดเชื่อมต่อที่เพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะตัวอย่างทดสอบจะเกิดการโก่งคานทางด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของคาน

3.2 ลักษณะการวิบัติของคาน

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรก L/d ระหว่าง 6.6-9.2 จะวิบัติโดยการแตกที่เนื้อวัสดุ (material failure) ซึ่งเกิดจากแรงเฉือนตามขวาง (transverse shear) ดังรูปที่ 11 โดยการวิบัติลักษณะนี้จะเกิดรอยแตกเป็นแนวยาวบริเวณกึ่งกลางของหน้าตัด เนื่องจากบริเวณนั้นมีหน่วยแรงเฉือนตามขวางเกิดขึ้นสูงสุด



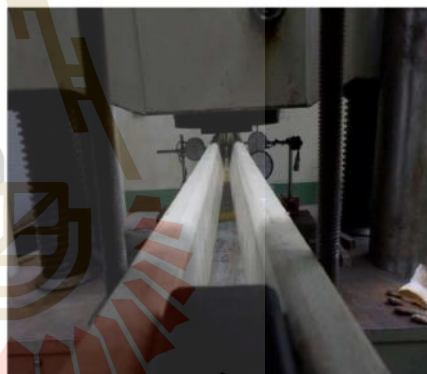
รูปที่ 11 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบเนื่องจากแรงเฉือนตามขวาง

สำหรับกลุ่มที่สองที่มีค่า L/d ระหว่าง 13.2-52.6 ตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติโดยการโก่งคดทางด้านข้าง (lateral buckling) ดังแสดงในรูปที่ 12 โดยการวิบัติลักษณะนี้จะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใด กล่าวคือเมื่อแรงกระทำเพิ่มขึ้นการโก่งตัวในแนวตั้งก็จะเพิ่มขึ้นตามในลักษณะที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแต่การโก่งตัวทางด้านข้างจะไม่เกิดขึ้นหรือมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการโก่งตัวในแนวตั้ง จนกระทั่งถึงจุดที่มีแรงกระทำสูงสุดการโก่งตัวทางด้านข้างจะเกิดขึ้นแบบทันทีทันใดทำให้ตัวอย่างทดสอบไม่สามารถที่จะรับแรงกระทำเพิ่มได้อีก



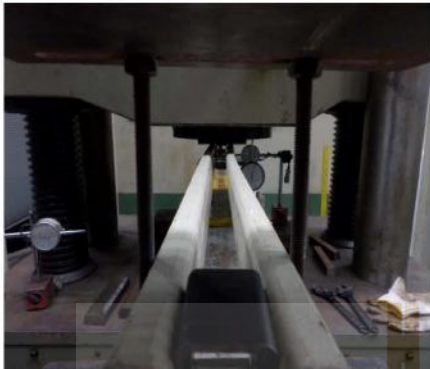
รูปที่ 12 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแบบโก่งคดทางด้านข้าง

ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วน L/d เท่ากันแต่จำนวนจุดเชื่อมต่อไม่เท่ากันจะแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีจุดเชื่อมต่อ 2 จุด จะมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งคดแบบเดี่ยว (individual buckling) ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยการโก่งคดแบบเดี่ยว (individual buckling)

ส่วนกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่มีจุดเชื่อมต่อตั้งแต่ 3 จุดจนกระทั่งถึง 9 จุด จะมีลักษณะการวิบัติโดยการโก่งคดแบบองค์รวม (overall buckling) ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบโดยการโก่งเดาะแบบองค์รวม (overall buckling)

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบคานหน้าตัดประกอบรูปรางน้ำภายใต้แรงดัดโดยมีจุดรองรับเป็นแบบ pinned-pinned ได้ผลสรุปที่สำคัญดังนี้

1. พฤติกรรมการรับแรงของตัวอย่างทดสอบมีพฤติกรรมแบบเส้นตรง (linear elastic) จนกระทั่งถึงประมาณ 80-95% ของแรงที่จุดวิบัติ จากนั้นพฤติกรรมจะเปลี่ยนเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งถึงจุดวิบัติ

2. ลักษณะการวิบัติจะแบ่งออกเป็น 2 แบบโดยมีอัตราส่วน L/d เท่ากับ 10 เป็นตัวแบ่งพฤติกรรม ถ้าคานมีอัตราส่วน L/d น้อยกว่า 10 จะมีลักษณะการวิบัติแบบวิบัติที่เนื้อวัสดุ (material failure) แต่หากคานมีอัตราส่วน L/d มากกว่า 10 จะมีลักษณะการวิบัติโดยเกิดการโก่งเดาะทางด้านข้าง (lateral buckling)

3. การใส่จุดเชื่อมต่อ (connector) จาก 2 จุดมาเป็น 3 จุด จะทำให้ลักษณะการวิบัติของคานเปลี่ยนจากการโก่งเดาะแบบเดี่ยว (individual buckling) มาเป็นการโก่งเดาะแบบองค์รวม (overall buckling)

4. จำนวนของจุดเชื่อมต่อมีผลต่อความสามารถในการรับแรงกระทำของคาน ยิ่งจุดเชื่อมต่อมากส่งผลให้คานมีความแข็งแรงมากกว่าก่อนที่จะเกิดการโก่งเดาะ คานจะมีความสามารถในการรับแรงกระทำสูงขึ้นประมาณ 20 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการใส่จุดเชื่อมต่อเพียง 2 จุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Bakis, C. E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., and Triantafyllou, T.C. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review, *Journal of Composites for Construction*, 6(2): 73-87, 2002
- [2] American Institute of Steel Construction, *AISC. Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design*, 2005.

[3] หวังแก้ว บุญสวน, สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสรวน วงษ์ชาลิตกุล. "พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเฉือน และการดัด", *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 14*, 4, หน้า 1625-1632, พ.ศ.2552

[4] สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. รายงานการวิจัยเรื่อง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ.2552

[5] C. Chatwivat, S. Seangalith, J. Thumrongvut, "An experimental study on PFRP built-up columns with double C-sections under axial compression", *17th National Convention on Civil Engineering*, pp. STR-20, 2012

[6] American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standard: *Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes*. ASTM Standard No. D3917. PA, 2011

ประวัติผู้เขียน

นายปรัชญา ก้านบัว เกิดเมื่อวันที่ 11 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดนครราชสีมา จบการศึกษาระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษา จากโรงเรียนสัจจลักษณ์วิทยาและโรงเรียนปิยะชาติพัฒนา ตามลำดับ จากนั้น เริ่มศึกษาระดับปริญญาตรี ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2550 ต่อมาได้เข้า ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2554 ขณะที่ยังศึกษาอยู่ได้มีโอกาสเป็น ผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้นำ ประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยได้เป็นอย่างดี และมีบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา โดยมีรายละเอียดดังปรากฏใน ภาคผนวก ก



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี