



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดซ์
หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

**(Development of Design Equations for Pultruded-Fiber
Reinforced Plastic Having C-Section under Flexure
with Simple and Fixed Supports)**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดซ์
หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

(Development of Design Equations for Pultruded-Fiber
Reinforced Plastic Having C-Section under Flexure
with Simple and Fixed Supports)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

สิทธิชัย แสงอาทิตย์

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549-50

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูดชันหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น (The Development of Design Equations for Pultruded-Fiber Reinforced Plastic Having C-Section under Flexure with Simple and Fixed Supports) ได้รับการสนับสนุนงบประมาณโดยทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549-2550 ซึ่งได้รับการจัดสรรมาจากงบประมาณแผ่นดินโดยผ่านการประเมินข้อเสนอโครงการจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเป็นอย่างสูง นอกจากนั้นแล้ว ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณนายจักษดา ช่างวุฒิ และนายหวังแก้ว บุญสวน นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา และนายจิโรจ เกตุเจริญผล นายไววุธ ลักขณะ และนายวัฒนากร ฉิมอ่อง นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาที่ได้ช่วยเหลือในการจัดทำตัวอย่างทดสอบและทดสอบอย่างขยันขันแข็งและอดทน สุดท้าย ขอขอบคุณในความอนุเคราะห์ของสถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนา และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



สิทธิชัย แสงอาทิตย์

หัวหน้าโครงการวิจัย

เมษายน 2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี ภายใต้แรงคด โดยมีสถานะของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จตุรรองรับแบบง่าย และจตุรรองรับแบบยึดแน่น คาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในศึกษาประกอบด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์และผลิตโดยวิธี Pultrusion ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm โดยมีอัตราส่วนของระยะระหว่างจตุรรองรับต่อความลึกของหน้าตัด (L/d) อยู่ในช่วงระหว่าง 10-53 คาน FRP จำนวน 172 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อศึกษาผลของความยาวต่อการตอบสนองทางโครงสร้างและโมเมนต์โก่งเดาะของคาน จากนั้น โมเมนต์โก่งเดาะของตัวอย่างคานที่ทดสอบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LFRD

จากผลการทดสอบโดยรวมพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมการรับแรงด้านข้าง โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรงจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนมีค่าลดลง นอกจากนี้สมการออกแบบของ LFRD สามารถทำนายโมเมนต์โก่งเดาะของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอโดยความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

Abstract

The objectives of this research are to study the structural behaviors of the pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) channel beams under flexure with different support conditions; simply supported, and fixed-end supported. The PFRP channel beams used in this study were made of E-glass fiber reinforcement and polyester resin and manufactured by a pultrusion process. Three different geometries of the beams are $76 \times 22 \times 6$, $102 \times 29 \times 6$ and $152 \times 43 \times 10$ mm. The span-to-depth ratios of the specimens are in the range of 10 to 53. A total of 244 specimens were tested to investigate the effects of span of the beam on the structural responses and buckling moment. Then, the obtained buckling moments were compared to the buckling moments calculated by using the LRFD steel design equation.

Based on the test results, it was found that the load versus mid-span vertical deflection relationships of the beam specimens are linear up to the failure, but the load versus mid-span lateral deflection relationships are geometric nonlinearity, and the response curves exhibit gradually increasing nonlinearity toward the buckling load. At the buckling load, all of specimens were failed in the form of twisting and large lateral displacement occurred simultaneously in the form of the lateral-torsional buckling mode of failure. No external material damage was observed. The critical buckling moment increases as the span-to-depth ratios of beam decreases. In addition, the LRFD steel design equation can be used to satisfactorily predict the critical buckling moment of the PFRP specimens within acceptable engineering error.

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|-----------|
| กิตติกรรมประกาศ..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ข |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ค |
| สารบัญ | ง |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 10 |
| 1.3 สมมุติฐานการวิจัย | 10 |
| 1.4 ขอบเขตการวิจัย | 11 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 11 |
| 2 ปรัชษฐ์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 13 |
| 2.1 บทนำ..... | 13 |
| 2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion | 13 |
| 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุ FRP | 13 |
| 2.2.2 วัสดุดิบและส่วนประกอบของวัสดุ FRP..... | 16 |
| 2.2.2.1 เส้นใยแก้ว..... | 16 |
| 2.2.2.2 เรซิน | 19 |
| 2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ FRP | 20 |
| 2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ FRP..... | 22 |
| 2.3 พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด..... | 26 |
| 2.3.1 การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ | |
| โดยวิธี LRFD..... | 28 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|----------|--|
| 2.3.1.1 | คานหน้าตัดอัดแน่น 30 |
| 2.3.1.2 | คานหน้าตัดไม่อัดแน่น 35 |
| 2.3.2 | สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงค้ำ ของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน 36 |
| 2.3.3 | สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงค้ำ ของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน PFRP 36 |
| 2.4 | การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ PFRP ภายใต้แรงค้ำ 39 |
| 2.5 | สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 50 |
| 3 | วิธีการดำเนินการวิจัย 51 |
| 3.1 | บทนำ 51 |
| 3.2 | การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ PFRP 53 |
| 3.2.1 | การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ PFRP 53 |
| 3.2.2 | การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP 56 |
| 3.2.2.1 | การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 56 |
| 3.2.2.2 | การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 58 |
| 3.2.2.3 | การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 61 |
| 3.2.2.4 | การทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย 64 |
| 3.2.2.5 | การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 66 |
| 3.3 | การทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซี 68 |
| 3.3.1 | การทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 70 |
| 3.3.2 | การทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 78 |
| 3.4 | การวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ำของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซี โดยสมการออกแบบ 85 |
| 4 | ผลการศึกษาและอภิปรายผล 87 |
| 4.1 | บทนำ 87 |
| 4.2 | ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ PFRP 87 |

สารบัญ (ต่อ)

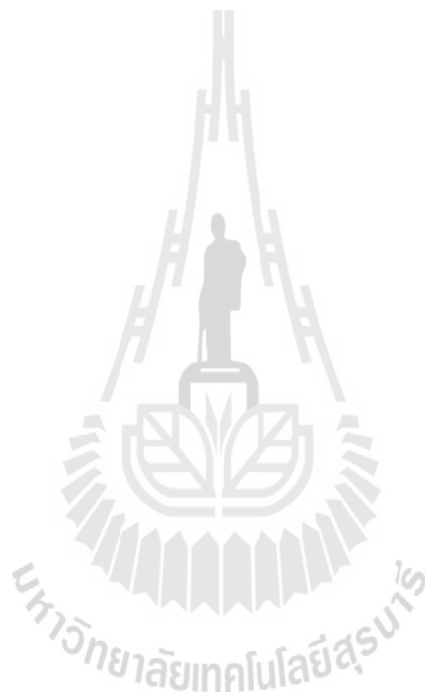
หน้า

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.2.1 | ผลการทดสอบปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ FRP..... | 87 |
| 4.2.2 | ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP | 89 |
| 4.2.2.1 | ผลการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย..... | 89 |
| 4.2.2.2 | ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย | 91 |
| 4.2.2.3 | ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... | 92 |
| 4.2.2.4 | ผลการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย | 94 |
| 4.2.2.5 | ผลการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย | 96 |
| 4.3 | คาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 98 |
| 4.3.1 | พฤติกรรมการรับแรงคัตของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย | 98 |
| 4.3.2 | น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 105 |
| 4.3.3 | ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย | 109 |
| 4.3.4 | การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบ ของ LRFD สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 112 |
| 4.4 | คาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 116 |
| 4.4.1 | พฤติกรรมการรับแรงคัตของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... | 116 |
| 4.4.2 | น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 123 |
| 4.4.3 | ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... | 127 |
| 4.4.4 | การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบ ของ LRFD สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 130 |
| 5 | สรุปผลงานวิจัย..... | 135 |
| 5.1 | บทนำ..... | 135 |
| 5.2 | สรุปผลทดสอบ..... | 135 |
| 5.2.1 | พฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบ Pultrusion | 135 |
| 5.2.2 | พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคัต . | 136 |
| 5.2.3 | เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD..... | 136 |
| 5.3 | ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน | 137 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|-----|
| 5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป..... | 137 |
| รายการอ้างอิง | 139 |
| ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์..... | 145 |
| ประวัติผู้วิจัย | 147 |



สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | คุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ 17 |
| 2.2 | คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ 20 |
| 2.3 | คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล ของเหล็กรูปพรรณ ตามมาตรฐาน ASTM A36 25 |
| 2.4 | ขีดจำกัดของอัตราส่วน b/t 29 |
| 3.1 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ 54 |
| 3.2 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 57 |
| 3.3 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 59 |
| 3.4 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 62 |
| 3.5 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย 65 |
| 3.6 | รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 67 |
| 3.7 | รายละเอียดของหน้าตัดรูปตัวซีของคาน FRP 70 |
| 3.8 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 71 |
| 3.9 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 72 |
| 3.10 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 73 |
| 3.11 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 79 |
| 3.12 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 80 |
| 3.13 | รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 81 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.1 ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด | 88 |
| 4.2 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP | 90 |
| 4.3 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP | 92 |
| 4.4 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย | 94 |
| 4.5 ผลทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย | 96 |
| 4.6 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย | 98 |
| 4.7 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย | 105 |
| 4.8 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย | 106 |
| 4.9 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย | 107 |
| 4.10 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 113 |
| 4.11 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 114 |
| 4.12 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 115 |
| 4.13 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 123 |
| 4.14 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 124 |
| 4.15 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 125 |
| 4.16 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 131 |
| 4.17 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 132 |
| 4.18 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน CFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 133 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 1.1 | สภาวะกักร่อนเนื่องจากสนิมใน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ 1 |
| 1.2 | โครงสร้างแปและชิ้นส่วน โครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวซี 2 |
| 1.3 | การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในโรงงานบำบัดน้ำเสีย 4 |
| 1.4 | การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับ โครงสร้างในทะเล 4 |
| 1.5 | การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในบริเวณพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก 5 |
| 1.6 | การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในส่วนของอาคารที่ต้องการ โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา 5 |
| 1.7 | ตัวอย่างหน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุ FRP 7 |
| 2.1 | ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ 14 |
| 2.2 | ส่วนประกอบภายในหน้าตัดของวัสดุ FRP 15 |
| 2.3 | เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP 18 |
| 2.4 | เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP 19 |
| 2.5 | ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion 21 |
| 2.6 | หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion 21 |
| 2.7 | การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน FRP 22 |
| 2.8 | การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน FRP 23 |
| 2.9 | การทดสอบแรงคดของชิ้นส่วน FRP 23 |
| 2.10 | การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน FRP 24 |
| 2.11 | หน่วยแรงคดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน 27 |
| 2.12 | ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาว ไร้การยึดครั้งด้านข้างของคาน 30 |
| 2.13 | พิกัดของหน้าตัดรูปตัวซี 34 |
| 2.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคาน 40 |
| 2.15 | การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซี ภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด 41 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 2.16 | ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ 41 |
| 2.17 | การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด 43 |
| 2.18 | ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด 44 |
| 2.19 | การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป Wide-flange และรูปตัว I 45 |
| 2.20 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด และความยาวของตัวอย่างทดสอบ 46 |
| 2.21 | ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป Wide-flange และรูปตัว I ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำที่ปลายคาน 46 |
| 2.22 | แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด 47 |
| 2.23 | การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกทดสอบ โดยแรงกระทำที่ปลายคาน 48 |
| 2.24 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด และความยาวของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัว I 49 |
| 2.25 | ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I 50 |
| 3.1 | แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย 52 |
| 3.2 | ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ 54 |
| 3.3 | ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C 55 |
| 3.4 | ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C 55 |
| 3.5 | ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 57 |
| 3.6 | การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 58 |
| 3.7 | ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 59 |
| 3.8 | รายละเอียดของ Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 60 |
| 3.9 | Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 61 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 3.10 | การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 61 |
| 3.11 | อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... 63 |
| 3.12 | การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... 63 |
| 3.13 | ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงคัดตามแนวแกนของเส้นใย 64 |
| 3.14 | ลักษณะจุกรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงคัดตามแนวแกนของเส้นใย..... 65 |
| 3.15 | การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคัดตามแนวแกนของเส้นใย 66 |
| 3.16 | รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย..... 67 |
| 3.17 | การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 68 |
| 3.18 | ลักษณะหน้าตัดรูปตัวซีของคาน PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย..... 69 |
| 3.19 | การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจุกรองรับแบบง่าย..... 74 |
| 3.20 | การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุกรองรับแบบง่าย 75 |
| 3.21 | แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 75 |
| 3.22 | การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบง่าย..... 76 |
| 3.23 | การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 76 |
| 3.24 | การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 77 |
| 3.25 | การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย..... 77 |
| 3.26 | แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 82 |
| 3.27 | การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบยึดแน่น 83 |
| 3.28 | จุกรองรับแบบยึดแน่น 83 |
| 3.29 | การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งและด้านข้างและการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 84 |
| 3.30 | การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 84 |
| 4.1 | ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ PFRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก..... 88 |
| 4.2 | ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน PFRP..... 89 |
| 4.3 | ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคิ่งตามแนวแกนของเส้นใย 89 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 4.4 | การวัดของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย90 |
| 4.5 | ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย91 |
| 4.6 | การวัดของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย91 |
| 4.7 | ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย93 |
| 4.8 | การวัดของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย93 |
| 4.9 | ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย95 |
| 4.10 | การวัดของตัวอย่างทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย95 |
| 4.11 | ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย97 |
| 4.12 | การวัดของตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย97 |
| 4.13 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 99 |
| 4.14 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 99 |
| 4.15 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 100 |
| 4.16 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 100 |
| 4.17 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 101 |
| 4.18 | ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 101 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 102 |
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 102 |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 103 |
| 4.22 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 103 |
| 4.23 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 104 |
| 4.24 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 104 |
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก โคงเคาะและความยาวของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 108 |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 109 |
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 110 |
| 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 110 |
| 4.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... | 111 |
| 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... | 117 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 117 |
| 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 118 |
| 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 118 |
| 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 119 |
| 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 119 |
| 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 120 |
| 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 120 |
| 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 121 |
| 4.39 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 121 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.40 | |
| ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 122 |
| 4.41 | |
| ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 122 |
| 4.42 | |
| ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของคาน ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 126 |
| 4.43 | |
| ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 127 |
| 4.44 | |
| ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 128 |
| 4.45 | |
| ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 128 |
| 4.46 | |
| ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น | 129 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานก่อสร้างด้านวิศวกรรมโยธา เหล็กรูปพรรณหรือเหล็กโครงสร้าง (structural steel) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชิ้นส่วนของโครงสร้างหลัก (primary structural member) และชิ้นส่วนของโครงสร้างรอง (secondary structural member) เนื่องจากมีข้อได้เปรียบเหนือวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ หลายประการ ได้แก่ อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก (strength-to-weight ratio) ความเหนียว (ductility) และความแกร่ง (stiffness) ที่มีค่าสูง อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักของการใช้เหล็กรูปพรรณเป็นวัสดุก่อสร้าง คือ หากไม่มีการป้องกันและบำรุงรักษาที่ดี โครงสร้างเหล็กจะเกิดการกัดกร่อน (corrosion) เนื่องจากสภาวะอากาศและสารเคมี ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.1 ทำให้โครงสร้างไม่สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าว โครงสร้างเหล็กจึงควรมีการเคลือบสีกันสนิมด้วย (anti-corrosion paint) และสังกะสี (zinc coating) อย่างสม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งาน จึงส่งผลให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและซ่อมแซม (repair and maintenance cost)



รูปที่ 1.1 สภาวะกัดกร่อนเนื่องจากสนิมในโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ

สำหรับงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ หน้าตัดเหล็กประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในการรับแรงดัดของโครงสร้าง คือ หน้าตัดรูปตัวซี (C-section) โดยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โครงสร้างแป (purlin) โครงผนังค้ำยัน (wall stud) และชิ้นส่วนในระบบโครงข้อหมุน (truss system) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.2 และจากข้อมูลล่าสุดของกระทรวงพาณิชย์ (www.moc.go.th, 2553) พบว่าในปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยได้นำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็ก (iron and steel products) มากเป็นลำดับที่ 5 ของสินค้านำเข้าทั้งหมด โดยพิจารณาเฉพาะผลิตภัณฑ์เหล็กที่ใช้ในงานก่อสร้างด้านต่าง ๆ คิดเป็นมูลค่าประมาณ 375,000 ล้านบาทและสำหรับปริมาณการใช้งานโดยประมาณของเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวซีคิดเป็นร้อยละ 0.5 ของปริมาณเหล็กที่นำเข้าทั้งหมด คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,875 ล้านบาท สาเหตุหลักของการนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็ก เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่เหล็ก (iron ore) โดยวัสดุดิบดังกล่าวต้องนำเข้าจากประเทศออสเตรเลียและบราซิล จากนั้นจึงนำมาผ่านการถลุงและผลิตเป็นสินค้าเหล็กรูปพรรณ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว ภาครัฐและเอกชนจึงควรส่งเสริมการใช้วัสดุก่อสร้างที่ผลิตในประเทศ โดยใช้วัตถุดิบภายในประเทศหรือใช้วัตถุดิบซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศในปริมาณน้อยที่สุดเพื่อทดแทนการนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กและลดการขาดดุลการค้าระหว่างประเทศ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างแปและชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวซี

ที่ผ่านมา นักวิจัยในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกาได้พยายามวิจัยค้นคว้าวัสดุก่อสร้างที่นำมาทดแทนเหล็กรูปพรรณ สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างใหม่ รวมถึงการซ่อมแซมและบำรุงรักษาโครงสร้างเดิมที่เกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อน จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1940 ได้มีการค้นพบวัสดุประกอบ (composite material) ประเภทหนึ่งเรียกว่า พลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic: FRP) โดยวัสดุดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการต้านทานการกัดกร่อนและมีน้ำหนักเบาเมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ (Bank, 2006)

ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาพลาสติกเสริมเส้นใยชนิดใหม่ขึ้นมาเรื่อยๆ ในแวดวงวิศวกรรม โดยเฉพาะงานทางด้านวิศวกรรมโยธา อาทิเช่น พลาสติกเสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon fiber-reinforced plastic: CFRP) หรือวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งมักผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) วัสดุประกอบประเภทนี้เป็นที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากวิศวกรโยธาในหลายประเทศ โดยเฉพาะในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา (Vo and Lee, 2008) วัสดุ PFRP นี้ได้ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างบางประเภทแล้ว อาทิเช่น ในบริเวณพื้นที่ ๆ มีการกัดกร่อนรุนแรง ได้แก่ โรงงานบำบัดน้ำเสีย หอทำความเย็น (cooling tower) หอทดสอบนิวเคลียร์ และโรงงานอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.3 หรือโครงสร้างในทะเลและแถบชายฝั่งที่ถูกการกัดกร่อนอย่างรุนแรง โดยคลอไรด์จากน้ำทะเล ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.4 รวมทั้งโครงสร้างในบริเวณพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก (hard-to-access area) และมีความลำบากในการก่อสร้างเนื่องจากพื้นที่ไม่อำนวย อาทิเช่น สะพานและเสาไฟฟ้าในพื้นที่ ๆ เป็นภูเขา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.5 ตลอดจนชิ้นส่วนของอาคารที่ต้องการ โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา อาทิเช่น หอสูง ราวสะพาน ราวระเบียงและรั้วกันตกต่าง ๆ เป็นต้น (Creative Pultrusion, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ในโรงงานบำบัดน้ำเสีย (Bedford, 2005)



รูปที่ 1.4 การประยุกต์ใช้วัสดุ FRP สำหรับโครงสร้างในทะเล (Strongwell, 2002)



รูปที่ 1.5 การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในบริเวณพื้นที่ ๓ เข้าถึงยาก
(Powertrusion International, 2007)



รูปที่ 1.6 การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในส่วนของอาคารที่ต้องการ โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา
(Strongwell, 2002)

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือ PFRP เป็นวัสดุประกอบที่ประกอบด้วยเส้นใยแก้ว (glass fiber) ที่มีความสามารถรับแรงดึงสูง เส้นใยแก้วจะถูกผสมผสานเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานจำพวกเรซิน (resin) อาทิเช่น พลาสติกที่ถูกทำให้แข็งตัวได้ด้วยความร้อน (thermosetting plastic) ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (polyesters) และ ไวนิลเอสเตอร์ (vinylesters) เป็นต้น โดยวัสดุทั้งสองชนิดยังคงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีเหมือนเดิม แต่คุณสมบัติของวัสดุผสมแตกต่างจากวัสดุพื้นฐานทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน (Jones, 1975) อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีความแตกต่างจากเหล็ก รูปพรรณ และอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุออร์ทोटโรปิก (orthotropic material) และไม่เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) จึงต้องพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Creative Pultrusion, 2004) นอกจากนี้วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยยังมีความเปราะ (brittle material) ที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) โดยมีค่าโมดูลัสต่าง ๆ ก่อนขั้วต่ำและมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูง ดังนั้นการเลือกรูปของโครงสร้าง จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่ควบคุมการออกแบบ (Roberts and Al-Ubaidi, 2002)

นอกจากนี้ วัสดุ PFRP มีคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่นหลายประการเชิงวิศวกรรมโยธา ได้แก่ อัตราส่วนกำลังของวัสดุต่อน้ำหนักก่อนขั้วสูง น้ำหนักเบา มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสถานะแวดล้อมและสารเคมีได้ดี ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานสามารถออกแบบและผลิตให้เหมาะสมตามวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละงานได้ โดยการเลือกชนิดของเรซิน เส้นใยและกำหนดทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Davalos, Qiao, and Salim, 1997; Keller, 2003; Promis et al., 2010) และหนึ่งในวัสดุ PFRP ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง ได้แก่ Structural profile (รูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ) ที่มีลักษณะคล้ายกับหน้าตัดเหล็ก รูปพรรณ อาทิเช่น หน้าตัด wide-flange (WF) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) หน้าตัดฉาก (L) หน้าตัดรูปตัวซี (c-section) และ หน้าตัดรูปกล่อง (box) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 ตัวอย่างหน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุ FRP (Creative Pultrusions, 2004)

ชิ้นส่วน โครงสร้าง (structural member) ที่ทำมาจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุก่อสร้างใหม่สำหรับประเทศไทย แต่ได้มีการนำมาใช้ในงานก่อสร้างในต่างประเทศมาแล้วไม่ต่ำกว่า 20 ปี โดยเฉพาะในประเทศแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา (Bakis et al., 2002) อย่างไรก็ตาม สาเหตุที่วิศวกรผู้ออกแบบยังไม่นำวัสดุ FRP มาใช้งานเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างมากนัก เนื่องจากเหตุผลหลายประการ เช่น

- 1) ขาดแคลนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ของวัสดุ FRP
- 2) ขาดแคลนความรู้ความเข้าใจในพฤติกรรมทางกล (mechanical properties) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP
- 3) ขาดแคลนวิธีการออกแบบ กฎเกณฑ์และสมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่ได้มาตรฐานภายใต้การกระทำของน้ำหนักบรรทุกและจุดรองรับในลักษณะต่าง ๆ

ที่ผ่านมา วิศวกรผู้ออกแบบโดยส่วนมากได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยโดยใช้มาตรฐานการออกแบบ (design code) และข้อกำหนดการออกแบบ (design specifications) โครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ American Institute of Steel Construction (AISC) โดยวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ (allowable stress design: ASD) (AISC 316-89, 1989) และวิธีตัวคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design: LRFD) (AISC 350-99, 1999) เนื่องจากลักษณะหน้าตัดและรูปร่างของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยมีความคล้ายคลึงกับชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (Razzaq, Prabhakaran, and Sirijani, 1996)

ในปัจจุบัน การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยในต่างประเทศได้อ้างอิงมาตรฐานการออกแบบ 2 เล่ม โดยคู่มือการออกแบบดังกล่าวมีพื้นฐานจากมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ โดยวิธี LRFD 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 PFRP หากแต่กล่าวถึง ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ข้อควรปฏิบัติ และข้อกำหนดด้านการใช้งานสำหรับโครงสร้างพลาสติกและวัสดุประกอบโพลีเมอร์โดยรวมเท่านั้น (Bank, 2006) นอกจากนี้มาตรฐานการออกแบบที่กล่าวมา ยังมีคู่มือการออกแบบ (design manual) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP ที่ทางบริษัทผู้ผลิต (manufacturer) ในต่างประเทศได้พัฒนาขึ้น อาทิเช่น บริษัท Creative Pultrusion (2004); Strongwell Corporation (2002); Fiberline Composites (2003); Bedford (2005) เป็นต้น โดยสมการและตารางออกแบบ (load design table) ต่าง ๆ ภายในคู่มือออกแบบแต่ละเล่ม ได้จากการค้นคว้าและพัฒนาของแต่ละบริษัท หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สมการและตารางออกแบบดังกล่าวเหมาะสมสำหรับวัสดุ PFRP ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทผู้ผลิตนั้น ๆ และเน้นที่หน้าตัด wide-flange (WF) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) เป็นหลัก

จากเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้การดัด (flexure) ดังตัวอย่างของงานวิจัยที่ถูกเสนอ โดย Razzaq, Prabhakaran, and Sirijani (1996); Kabir and Sherbourne (1998); Tosh and Kelly (2001); Shan and Qiao (2005) จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้นสรุปได้ว่า ยังไม่พบการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้การดัดที่มีสภาวะเงื่อนไข

ของจตุรรองรับ (support condition) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported) และ จตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังไม่พบสมการที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคัต จาก คุณสมบัติและข้อดีที่ได้เปรียบของวัสดุ CFRP ที่มีต่อวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อีกทั้งการขาดคู่มือในการออกแบบโครงสร้างที่ได้มาตรฐาน จึงมีความคิดที่จะศึกษาพฤติกรรมทาง กลของชิ้นส่วน โครงสร้างวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion โดยเน้นพฤติกรรม หลัก ได้แก่ การรับแรงคัตภายใต้สภาวะเงื่อนไขของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน และมุ่งเน้นที่หน้าตัด รูปตัวซีที่ยัง ไม่มีผู้ศึกษา มากนัก เพื่อให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ (strategy) ด้านการปรับโครงสร้าง ทางอุตสาหกรรม และส่งเสริมการใช้วัสดุชนิดนี้ให้แพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างประเทศไทย มากขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับแนวคิดด้านการวิจัยและพัฒนา (research and development) และเป็นการส่งเสริมขบวนการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์อย่างมีระบบและ ถูกต้องตามหลักวิชาการ อีกทั้งยังลดปริมาณการใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างเนื่องจากปัญหาการลดลง ของป่าไม้และปัญหาจากภัยธรรมชาติต่าง ๆ ที่เป็นผลมาจากการตัดไม้ทำลายป่า และยังลดการ นำเข้าวัสดุก่อสร้างจากต่างประเทศ เช่น เหล็กและอลูมิเนียม เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพลาสติกเสริม เส้นใยดังกล่าวสามารถผลิตได้เองในประเทศไทยโดยใช้วัตถุดิบภายในประเทศบางส่วน สุดท้าย เป็นการลดปัญหาขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากวัสดุชนิดนี้ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ เป็นอย่างดี

ภายใต้กรอบแนวความคิด (conceptual framework) และสมมติฐานในงานวิจัยนี้ เนื่องจาก ยังไม่มีผลการทดสอบและการตีพิมพ์เผยแพร่ผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับคานประกอบพลาสติก เสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้การคัตที่ได้มาตรฐาน ในการวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐาน เบื้องต้น โดยให้ลักษณะของการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ นอกจากนี้ Barbero and Raftoyiannis (1994); Davalos, Qiao, and Salim (1997) ได้ศึกษาลักษณะการวิบัติของ ชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัด wide-flange (WF) ภายใต้แรงคัต พบว่าการวิบัติ แบบโค้งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) หรือเรียกอีกชื่อว่าการโค้งเดาะ เนื่องจากการคักร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) เป็นลักษณะการวิบัติซึ่งมักเกิดขึ้นก่อน การวิบัติเนื่องจากกำลังของวัสดุ (material failure) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุ CFRP มีคุณสมบัติและพฤติกรรมเป็นแบบ Orthotropic material ซึ่งแตกต่างจากเหล็กรูปพรรณซึ่งมี พฤติกรรมแบบ Isotropic material ตลอดจนวัสดุ CFRP มีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัส แรงเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่น ต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 2.6 (Omidvar, 1998) ส่งผลให้การออกแบบต้องคำนึงถึง

ผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) (Bank, 1987; Mallick, 1988; Kim, N.I., Shin, D.K., and Kim, M.Y., 2007) ดังนั้นจากความแตกต่างดังกล่าวข้างต้น จึงควรมีการศึกษาและทดสอบเพื่อการยืนยันสมมติฐานของงานวิจัยครั้งนี้

โดยสรุปแล้ว จากกรอบแนวคิดวิธีการศึกษาและพัฒนาสมการดังกล่าว สุดท้ายคาดว่า จะได้สมการเพื่อใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบ pultrusion และลักษณะการวิบัติของวัสดุ
- 1.2.2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นส่วน โครงสร้างหน้าตัดรูปตัวซีที่ทำด้วยพลาสติกเสริมเส้นใยและผลิตโดยขบวนการ pultrusion ที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น
- 1.2.3) เพื่อพัฒนาสมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างดังกล่าวภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1) ในงานวิจัยนี้ วัสดุ CFRP ถูกพิจารณาเป็นวัสดุเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (homogenous) และเป็นวัสดุออร์ทोटโรพิก (orthotropic material) ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานตามทิศทางที่พิจารณา
- 1.3.2) พฤติกรรมของวัสดุ CFRP พิจารณานบนพื้นฐานแบบกลศาสตร์มหภาค (macro-mechanics)
- 1.3.3) พฤติกรรมของวัสดุ CFRP ในช่วงการโก่งเดาะ (buckling) อยู่ในช่วงเชิงเส้น โดยความเครียดภายในเนื้อวัสดุมีค่าน้อยมาก (infinitesimal strain)
- 1.3.4) กฎของฮุก (Hooke's law) สามารถใช้ได้ โดยพิจารณาทิศทางของแนวแรงที่กระทำต่อวัสดุ เนื่องจากวัสดุ CFRP เป็นวัสดุออร์ทोटโรพิก

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1) วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เป็นวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปตัวซี
- 1.4.2) วัสดุ PFRP ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย ใยแก้ว (fiber) ชนิด E-glass และเรซิน (resin) ชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyesters)
- 1.4.3) ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ขนาดของหน้าตัด (dimensions) ความยาวของคาน (span) และชนิดของจุกรองรับ (support condition) โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ เช่น เฟอร์เซ้นของเส้นใยแก้ว ชนิดเรซิน สารผสมเพิ่ม (additives) และกรรมวิธีการผลิตของตัวอย่างทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเท่าที่สามารถทำได้
- 1.4.4) วัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm
- 1.4.5) ชนิดของจุกรองรับมี 2 แบบ ได้แก่ จุกรองรับแบบง่าย และจุกรองรับแบบยึดแน่น
- 1.4.6) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM
- 1.4.7) การทดสอบแบบ 3 จุด (three-points loading test)
- 1.4.8) การให้แรงกระทำจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัดตัวซี

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1) เข้าใจพฤติกรรมการรับแรงดัดของชิ้นส่วน โครงสร้างหน้าตัดรูปตัวซีที่ทำด้วยพลาสติกเสริมเส้นใย ภายใต้สภาวะของจุกรองรับชนิดต่าง ๆ
- 1.5.2) ได้รับสมการออกแบบมาตรฐาน (standard design equations) ชิ้นส่วนดังกล่าว ภายใต้แรงดัดที่ถูกต้อง เหมาะสม และปลอดภัย
- 1.5.3) ส่งเสริมการใช้งานวัสดุ PFRP สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อตอบสนองความต้องการต่อการใช้งานที่มากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการออกแบบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ
- 1.5.4) สามารถนำผลงานวิจัยนี้ เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุ PFRP ภายใต้หน้าตัดและแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ต่อไป



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

โดยทั่วไปลักษณะเฉพาะของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย (fiber-reinforced plastic: FRP) ที่ใช้ในโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา จะแตกต่างจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ใช้ในงานวิศวกรรมอากาศยาน (aerospace engineering) อาทิเช่น ลักษณะของน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ขนาดและรูปร่างของชิ้นส่วน กระบวนการผลิต และชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบ (constituent materials) สำหรับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ได้รับความนิยมสำหรับงานโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา คือ พลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GRFP) ซึ่งถูกผลิตขึ้นโดยวิธี Pultrusion หรือ Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) คุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบ (raw materials) ที่นำมาใช้ผลิต ดังนั้นก่อนเข้าใจคุณสมบัติโดยรวมของวัสดุ PFRP จำเป็นต้องทราบและเข้าใจถึงลักษณะและคุณสมบัติพื้นฐานของวัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต รวมถึงขั้นตอนกระบวนการผลิตวัสดุ PFRP

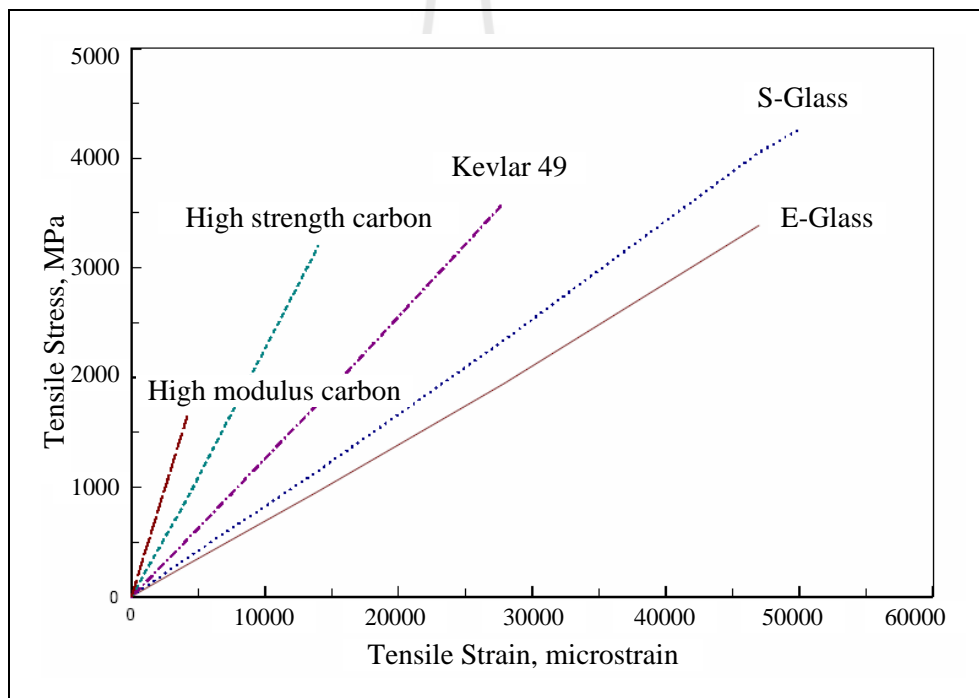
ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP ส่วนประกอบของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตวัสดุ โดยวิธี Pultrusion โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อทำความรู้จักและเข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึง การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็ก รูปพรรณและวัสดุ PFRP ภายใต้แรงค้ำรวมทั้งบททวนงานวิจัยที่ผ่านมาและมีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ศึกษา ตลอดจนการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงค้ำของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการคำนวณทางทฤษฎี

2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุ PFRP

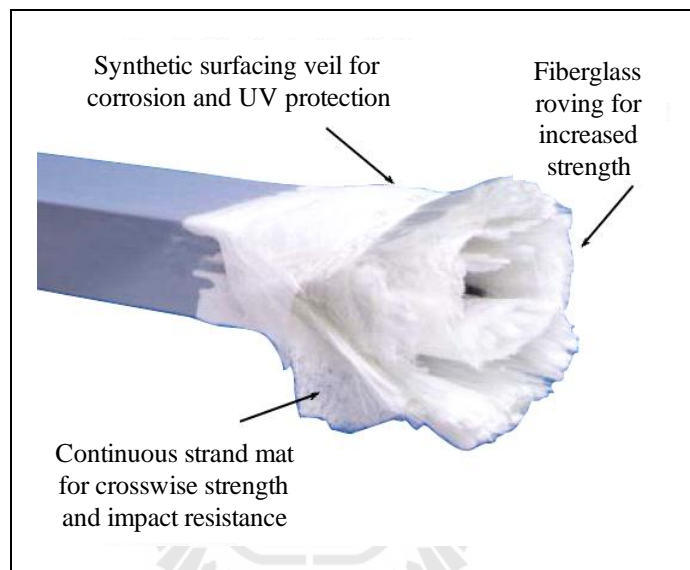
วัสดุ PFRP เป็นวัสดุประกอบ (composite material) ที่ผลิตขึ้นจากวัสดุสองชนิดขึ้นไป โดยคุณสมบัติของวัสดุใหม่มีความแตกต่างจากวัสดุเดิมที่นำมาผลิต ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุทั้งสองชนิดยังเหมือนเดิม (Jones, 1975) โดยทั่วไปวัสดุประกอบนิยมใช้เส้นใย (fiber) ที่มีกำลังรับแรงดึงและโมดูลัสสูงเป็นวัสดุหลักในการรับแรง (reinforcement) ตัวอย่างเช่น เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) หรือกราไฟต์ (graphite fiber)

เส้นใยอาราไมด์ (aramid fiber) หรือเคฟลาร์ (Kevlar) และเส้นใยโบรอน (boron fiber) เป็นต้น (Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006) รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ภายใต้งแรงดึง จากรูปเห็นได้ว่า เส้นใยมีกำลังรับแรงดึงที่สูงมาก (มากกว่า 1,500 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ ซึ่งมีค่าหน่วยแรงประลัย (ultimate stress) ประมาณ 400-550 MPa นอกจากนี้ เส้นใยแก้ว และเส้นใยเคฟลาร์ มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงก่อนการวิบัติ (ประมาณ 45,000 $\mu\epsilon$) ซึ่งแสดงว่า เส้นใยมีความเหนียว (ductility) ที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการผลิต วัสดุ FRP จึงนิยมใช้เส้นใยแก้วเป็นวัสดุรับแรง เนื่องจากเหมาะสมสำหรับการใช้งานหลายประเภท รวมทั้งมีราคาต่ำกว่าเส้นใยประเภทอื่น (Fibreforce, 2002) โดยส่วนใหญ่เส้นใยแก้วถูกนำมาใช้มากกว่า 90% ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (Creative Pultrusion, 2004)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ (Daniel and Isahi, 1994)

ในกระบวนการผลิต เส้นใยแก้วจะถูกผสมผสานเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานจำพวกเรซิน (resin) เช่น Thermosetting plastics ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (polyesters) ไวนิลเอสเตอร์ (vinylesters) อีพ็อกซี (epoxy) โพลียูรีเทน (polyurethane) และฟีนอลิก (phenolic) เป็นต้น ส่วนเรซินอีกชนิดหนึ่งที่น่ามาใช้คือ Thermoplastics ได้แก่ โพลีโพรพิลีน (polypropylene: PP) โพลีไวนิลคลอไรด์ (polyvinyl chloride: PVC) โพลีสไตรีน (polystyrene) และโพลีเอทิลีน (polyethylene: PE) เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบภายในหน้าตัดของวัสดุ FRP



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบภายในหน้าตัดของวัสดุ FRP (Strongwell, 2002)

Barbero, Fu, and Raftoyiannis (1991); Starr (2000); Keller (2003) กล่าวว่าข้อดีและคุณสมบัติเด่นของวัสดุ FRP ที่น่าสนใจสำหรับใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธา ได้แก่

- 1) มีอัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักค่อนข้างสูง
- 2) มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนและสารเคมีสูง
- 3) ไม่นำความร้อน และกระแสไฟฟ้า (ฉนวนทางไฟฟ้า)
- 4) โปร่งใสต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transparency)
- 5) ต้องการการบำรุงรักษาน้อยและความทนทานสูง
- 6) มีน้ำหนักเบา และสะดวกในขั้นตอนการติดตั้งชิ้นงาน
- 7) มีการต้านทานการล้า (fatigue) และความคืบ (creep) ที่ดี

พฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ของวัสดุ FRP จะแตกต่างไปจากเหล็กโครงสร้าง และอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) และวัสดุแบบอโธโทรปิก (orthotropic) (Creative Pultrusion, 2004) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ FRP เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีพฤติกรรมการวิบัติใกล้เคียงกับวัสดุเปราะ (Harte and Fleck, 2000) อย่างไรก็ตาม Kollar and Springer (2003) กล่าวว่าเมื่อพิจารณาขนาดหน้าตัดของวัสดุ FRP เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (fiber diameter) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะสามารถพิจารณาวัสดุประกอบนี้เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยสมมติฐานดังกล่าวถูกนำมาเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์วัสดุ FRP แบบกลศาสตร์มหภาค (macro-mechanics)

2.2.2 วัสดุคิบบและส่วนประกอบของวัสดุ FRP

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของวัสดุคิบบที่นำมาผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ในงานวิศวกรรมโยธา วัสดุคิบบที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุ FRP ได้แก่ เส้นใยแก้วและเรซิน วัสดุคิบบทั้งสองชนิดมีหลายประเภท สามารถเลือกและออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน รูปแบบของโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

2.2.2.1 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้รับแรงและเสริมความแกร่ง (stiffness) ตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย โดยทั่วไปวัสดุ FRP มีส่วนประกอบของเส้นใยแก้วประมาณ 45-75% โดยน้ำหนัก (Creative Pultrusion, 2004) เส้นใยแก้วผลิตจากการหลอมส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสัดส่วนประมาณ 50-70% โดยน้ำหนักของเส้นใย (Kelly and Zweben, 2000) นอกจากนี้ยังประกอบด้วย หินปูน (limestone) กรดบอริก (boric acid) ดินเหนียว (clay) ถ่านหิน (coal) และฟลูสปาร์ (fluorspar) ออกไซด์ของอลูมิเนียม และแคลเซียม เป็นต้น โดยส่วนผสมทั้งหมดถูกหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ $1,300^\circ\text{C}$ และถูกดันผ่านช่องเล็ก ๆ แล้วทำให้เย็นตัวโดยฝอยน้ำ

เส้นใยแก้วมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูง ทนทานต่อสารเคมี ไม่ดูดความชื้น และมีราคาต่ำกว่าเส้นใยประเภทอื่น (เส้นใยคาร์บอน และเส้นใยอาราไมด์) (Bank, Barkatt, and Gentry, 1995) โดยทั่วไป ชนิดของเส้นใยแก้วที่ผลิตขึ้นมีหลายชั้นคุณภาพ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม ตัวอย่างเช่น E-glass S-glass C-glass A-glass D-glass R-glass และ M-glass เป็นต้น โดยเส้นใยแก้วที่นิยมใช้ทางการค้ามีอยู่ 4 ประเภท (Bank, 2006) ได้แก่

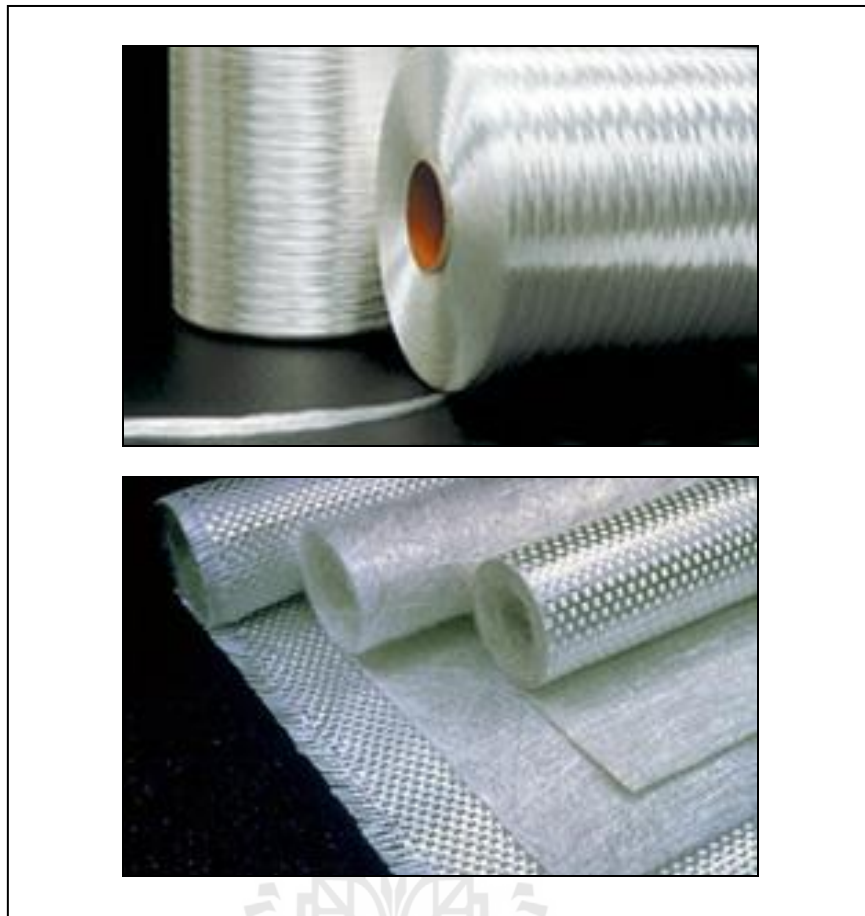
- 1) E-glass (electrical glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulation) เนื่องจากมีอัตราค่าไดอิเล็กตริกหรือเรียกอีกชื่อว่า Borosilicate glass
- 2) S-glass (high-strength glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีกำลังและโมดูลัสสูง
- 3) C-glass (corrosion glass) คือ เส้นใยแก้วที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี (corrosion resistance)
- 4) A-glass (window glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ C-glass ส่วนมากนิยมใช้ทำวัสดุผิวนอก (surface veil) โดยผสมกับเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตามเส้นใยแก้วที่มีการนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างมากที่สุด คือ E-glass (Creative Pultrusion, 2004)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ (Bank, 2006)

| ชนิดเส้นใยแก้ว | ความหนาแน่น (g/cm ³) | กำลังรับแรงดึง (MPa) | โมดูลัสแรงดึง (GPa) | ความยืดตัว (%) |
|----------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------|
| E | 2.57 | 3400 | 72.5 | 2.5 |
| S | 2.47 | 4600 | 88 | 3.0 |
| C | 2.46 | 2350 | 74 | 2.5 |
| A | 2.46 | 2760 | 73 | 2.5 |

Starr (2000) กล่าวว่าลักษณะของใยแก้วที่นำมาใช้ในการผลิตชิ้นส่วนวัสดุ CFRP มีทั้งแบบเป็นเส้นต่อเนื่อง (continuous strand rovings) และแบบเป็นแผ่นต่อเนื่อง (continuous stand mat) โดยแบบแผ่นมีทั้งที่มีการสาน (woven roving mat) และแบบไม่สาน (non-woven roving mat) รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ CFRP



รูปที่ 2.3 เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ PFRP (Owens Corning, 2008)

การเลือกชนิด รูปแบบ ลักษณะ และปริมาณของใยแก้วที่นำมาใช้งานเป็นสิ่งสำคัญและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุ PFRP (Seangatith, 1997) ได้แก่

- 1) กำลังรับแรงดึง (tensile strength) และ โมดูลัสแรงดึง (tensile modulus)
- 2) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และ โมดูลัสแรงอัด (compressive modulus)
- 3) กำลังต้านทานการด้า (fatigue) และการคืบ (creep)
- 4) กำลังรับแรงกระแทก (impact strength) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy absorption)
- 5) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)
- 6) การนำไฟฟ้าและการนำความร้อน (electric and thermal conductivity)

2.2.2.2 เรซิน

เรซินเป็นวัสดุโพลีเมอร์พลาสติกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสาน (binder) ส่งถ่ายแรงระหว่างเส้นใย ป้องกันเส้นใยจากการกัดกร่อนทางเคมีและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ดังนั้น เรซินต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เข้ากันได้กับเส้นใยแก้ว รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างเรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP โดยทั่วไป เรซินที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุ FRP มี 2 ประเภท คือ Thermoplastics และ Thermosetting plastics (Kelly and Zweben, 2000) โดยความแตกต่างของเรซินทั้ง 2 ประเภทนี้ ขึ้นอยู่กับพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของเรซิน (Seymour, 1987)

Thermoplastics คือ พลาสติกที่โครงสร้างภายในปราศจากจุดเชื่อมต่อระหว่างเส้นโมเลกุล (non-cross linked) โมเลกุลของพลาสติกยึดติดกันโดยพันธะ van der Waals (Schwartz, 1997) ทำให้พลาสติกชนิดนี้สามารถอ่อนตัวได้เมื่อโดนความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ตลอดจนเรซินชนิดนี้มีกำลังรับแรงต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งไม่นิยมมาใช้งานในด้านการรับแรง เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ไม่เสถียร (unstable) Thermoplastics ที่ใช้ในการผลิตวัสดุ FRP ได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีสไตรีน และ โพลีเอทิลีน เป็นต้น

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



รูปที่ 2.4 เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์
(Daniel and Isahi, 1994)

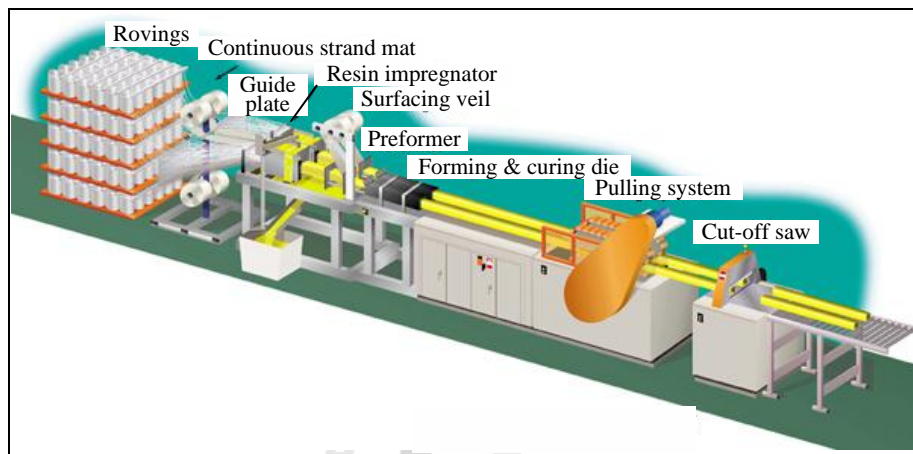
| คุณสมบัติ | โพลีเอสเตอร์ (Polyesters) | ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylesters) |
|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| ความหนาแน่น (kg/m ³) | 1130 | 1120 |
| กำลังรับแรงดึง (MPa) | 77.28 | 81.42 |
| โมดูลัสแรงดึง (GPa) | 3.24 | 3.38 |
| กำลังรับแรงคด (MPa) | 122.82 | 133.86 |
| โมดูลัสแรงคด (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 เนื่องจากการผลิต โดยวิธีนี้ได้ชิ้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอตรงยาว และต่อเนื่อง ในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง (Bakis et al., 2002) รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

ขั้นตอนการผลิตโดยวิธี Pultrusion เริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น (continuous strand rovings) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่อ่างอาบเรซิน (resin impregnator) เพื่อทำให้เส้นใยแก้วอุ่มตัวด้วยเรซิน (wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วแบบต่อเนื่องแบบสาน (continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงในแนวขวาง (transverse properties) ให้กับวัสดุ FRP จากนั้น ใส่แผ่นวัสดุผิวนอกรวมเข้ากับเส้นใยแก้วที่อุ่มตัวด้วยพลาสติกเพื่อความเรียบของผิววัสดุ รวมทั้งเพิ่มความสามารถในการต้านทานต่อการกัดกร่อน และเพิ่มความทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation resistance) ก่อนเข้าสู่เครื่องรีด

(preformer) เพื่อรีดตัวประสานส่วนเกินออก จากนั้นระบบจะดึงวัสดุ (pulling system) เข้าสู่แม่พิมพ์และบ่มด้วยเครื่องบ่ม (forming and curing die) ด้วยแรงดันและความร้อนสูง โดยอุณหภูมิของเครื่องบ่มเริ่มจากต่ำในช่วงแรก จากนั้นอุณหภูมิจะค่อย ๆ สูงขึ้น และลดต่ำลงในช่วงปลายของเครื่องบ่ม สุดท้ายวัสดุที่ได้จะถูกทำให้เย็นแล้วถูกตัดตามความยาวที่ต้องการ (Creative Pultrusion, 2004; Fiberline, 2003)



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion (Strongwell, 2002)

ชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion สามารถผลิตตามขนาดและรูปร่างที่ต้องการได้ ตั้งแต่หน้าตัดที่ใช้โดยทั่วไป เช่น WF (wide flange) L (angle) C (c-section) และ box section เป็นต้น รวมทั้งหน้าตัดที่ซับซ้อน (complex geometry) ขึ้นอยู่กับแบบของแม่พิมพ์ในกระบวนการผลิต (Strongwell, 2002) รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างหน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

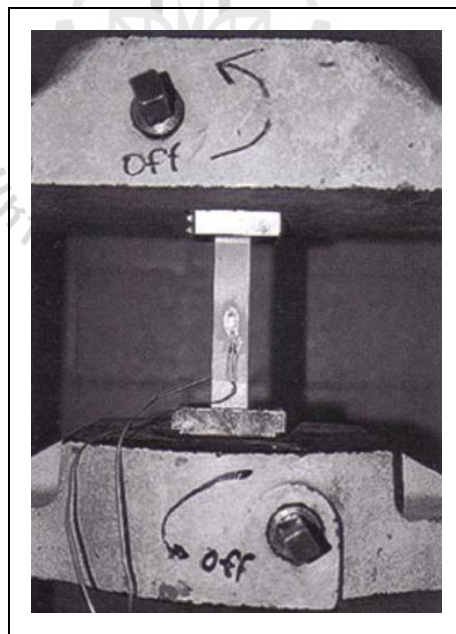


รูปที่ 2.6 หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion (Bedford, 2005)

2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ FRP

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2542) กล่าวว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ อาทิเช่น ชนิดและปริมาณของใยแก้ว ชนิดและส่วนผสมของเรซิน เป็นต้น โดยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลางหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion เพื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กโครงสร้าง (structural steel) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดทั้งในแนวนานกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (lengthwise: LW) และในแนวขวางกับทิศทางการวางตัวของใยแก้ว (crosswise: CW) การตัดใช้เครื่องตัดหัวเพชรเพื่อลดผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลและพฤติกรรมของวัสดุ

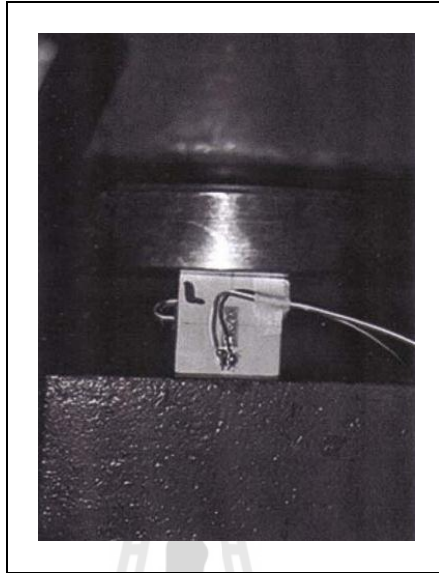
การทดสอบแรงดึง (tensile test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039-95 กับตัวอย่างที่ตัดทั้งในแนวนานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย เพื่อทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus of elasticity) หน่วยแรงดึงประลัย (tensile ultimate stress) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และทดสอบตัวอย่างที่ตัดในทิศทางทำมุม 10° กับทิศทางการวางตัวของเส้นใย เพื่อหาโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเฉือนในระนาบ (in-plane shearing modulus of elasticity)



รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

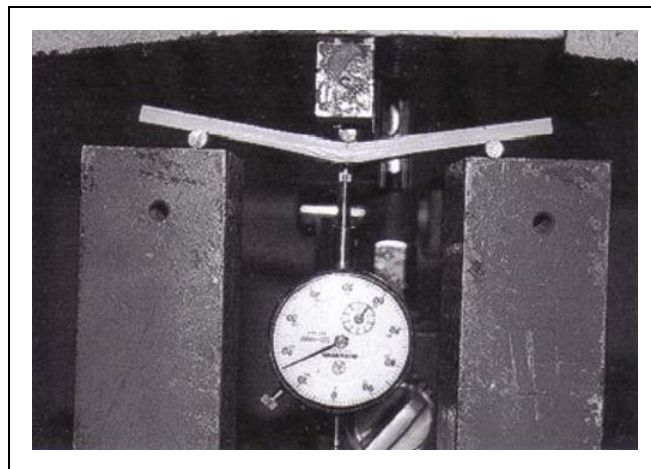
การทดสอบแรงอัด (compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695-95 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus of elasticity) และหน่วยแรงอัดประลัย

(compressive ultimate stress) ทดสอบตัวอย่างถูกตัดในแนวนานานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย และในแนวตั้งฉากกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย ลักษณะการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.8



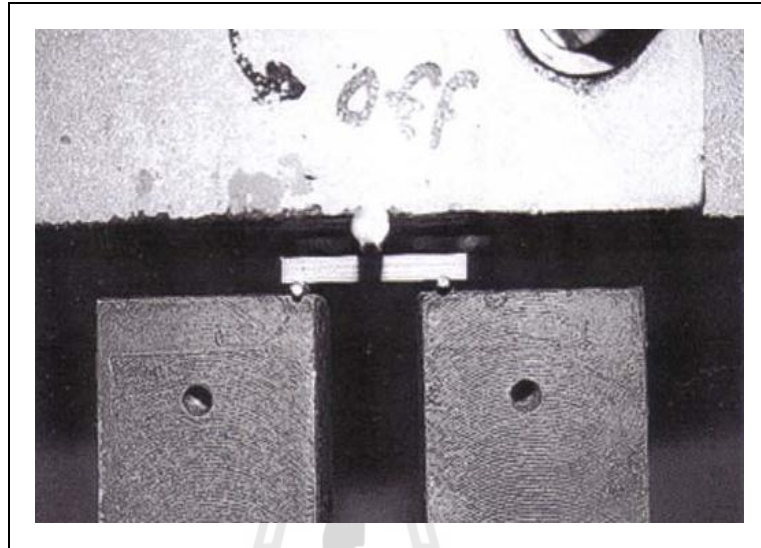
รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน CFRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบแรงดัด (flexural test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-92 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus of elasticity) และหน่วยแรงดัดประลัย (flexural ultimate stress) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวนานานกับทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใย เพียงทิศทางเดียว ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วน CFRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบ (interlaminar shear strength test) ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2344-95 ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวนอนกับทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใยเพียงทิศทางเดียว ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน FRP
(สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

ผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP กับคุณสมบัติทางกลของเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

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

| คุณสมบัติทางกล | วัสดุ CFRP | เหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 |
|-------------------------------|--------------------------|---|
| หน่วยแรงดึงประลัย/ LW | 445.2 MPa | $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ($\sigma_u = 400 \text{ MPa}$) |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง/ LW | 26.26 GPa | 200 GPa |
| หน่วยแรงอัดประลัย/ LW | 308.46 MPa | $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ($\sigma_u = 400 \text{ MPa}$) |
| หน่วยแรงอัดประลัย/ CW | 143.33 MPa | $\sigma_y = 250 \text{ MPa}$ ($\sigma_u = 400 \text{ MPa}$) |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด/ LW | 32.60 GPa | 200 GPa |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด/ CW | 7.69 GPa | 200 GPa |
| หน่วยแรงคัตประลัย/ LW | 422.57 MPa | 250 MPa |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัต/ LW | 13.15 GPa | 200 GPa |
| โมดูลัสแรงเฉือน/ LW | 3.25 GPa | 75 GPa |
| Inter lamina shear stress/ LW | 23.64 MPa | 125 MPa |
| อัตราส่วนปัวซอง/ LW | 0.263 | 0.32 |
| ความหนาแน่น | 1849.5 kg/m ³ | 7852 kg/m ³ |

จากตารางที่ 2.3 พบว่าหน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ CFRP มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ และมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็กรูปพรรณ 40.8% แต่หน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ CFRP มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กรูปพรรณ 22.9% ในทิศทาง LW และ 64.2% ในทิศทาง CW นอกจากนี้ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ CFRP ในทิศทาง LW และ CW มีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 7 เท่า และ 26 เท่า ตามลำดับ ยกเว้นโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตในทิศทาง LW ของวัสดุ CFRP จะมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณประมาณ 15 เท่า ในทางตรงกันข้าม วัสดุดังกล่าวมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การเสียรูปร่างเนื่องจากการแอ่นตัว (deflection) ของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP

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

นอกจากนั้น อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (E) ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือน (G) ของวัสดุ FRP และเหล็กมีค่าเท่ากับ 4.05 และ 2.67 ตามลำดับ ดังนั้นการแอ่นตัวของโครงสร้าง FRP จะตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือนมากกว่าการแอ่นตัวของโครงสร้างเหล็ก และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของวัสดุ FRP ไม่สามารถคำนวณได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นกับอัตราส่วนปัวซอง (ν) ในรูปของสมการ $G = E/2(1+\nu)$ ดังเช่นที่ใช้ในกรณีเหล็ก สำหรับการเปรียบเทียบความหนาแน่นของวัสดุทั้งสอง พบว่าวัสดุ FRP เบากว่าเหล็กประมาณ 4.2 เท่า ทำให้การก่อสร้างโครงสร้าง FRP มีความสะดวกกว่าโครงสร้างเหล็กเป็นอย่างมาก นอกจากนี้อัตราส่วนของกำลังต่อน้ำหนักของวัสดุ FRP มีค่ามากกว่าของโครงสร้างเหล็กถึง 4.5 เท่า

2.3 พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด

คาน (beams) เป็นองค์อาคาร (members) ของโครงสร้างที่วางอยู่ในแนวนอน และรับน้ำหนักบรรทุก (loads) ซึ่งมีทิศทางในแนวตั้งไปตามทิศทางตามยาวขององค์อาคาร ทั้งนี้รวมถึงโมเมนต์ที่กระทำที่ปลายขององค์อาคารด้วย ตัวอย่างองค์อาคารในโครงสร้างที่จัดอยู่ในจำพวกคาน ได้แก่ ตง (joists) แป (purlins) คานขอบ (spandrel beams) คานชอย (stringers) คานรับพื้น (floor beams) คานขนาดใหญ่ (girders) และโครงสร้างอื่น ๆ ที่มีลักษณะดังกล่าว (Salmon and Johnson, 1996) คานภายใต้น้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง หากปราศจากการยึดรั้งทางด้านข้างที่เพียงพอ อาจเกิดการโก่งเคาะด้านข้าง (lateral buckling) ได้ง่าย มีผลทำให้ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกลดลง

โดยทั่วไป คานมักมีหน้าตัด wide-flange (WF) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) หน้าตัดรูปตัวซี (c-section) และ หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (box section) เป็นต้น คานหน้าตัด wide-flange เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดที่สุด เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวมีพื้นที่ในส่วนของปีก (flange) มากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่งผลให้หน้าตัด wide-flange มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment of inertia) ต่อพื้นที่หน้าตัดมากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่วนคานหน้าตัดรูปตัวซี มักถูกใช้เป็นคานเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าไม่มากนัก เช่น โครงสร้างแป เป็นต้น เนื่องจากหน้าตัดมีความต้านทานต่อการแอ่นตัวทางด้านข้างต่ำ นอกจากนี้ คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งหน้าตัดดังกล่าวมีความสามารถต้านทานต่อแรงดัดและแรงบิดได้ดี (Gaylord et al., 1992)

พิจารณาคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งถูกกระทำโดยโมเมนต์ดัด M รอบแกนสะเทิน (neutral axis) ของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อคานมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก (small displacement) หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้น

จะมีการกระจายแบบเส้นตรงจากศูนย์ที่แกนสะเทินจนมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(a) หน่วยแรงคด (flexural stress, f_b) สูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานหาได้จากสมการการคด (flexural formula)

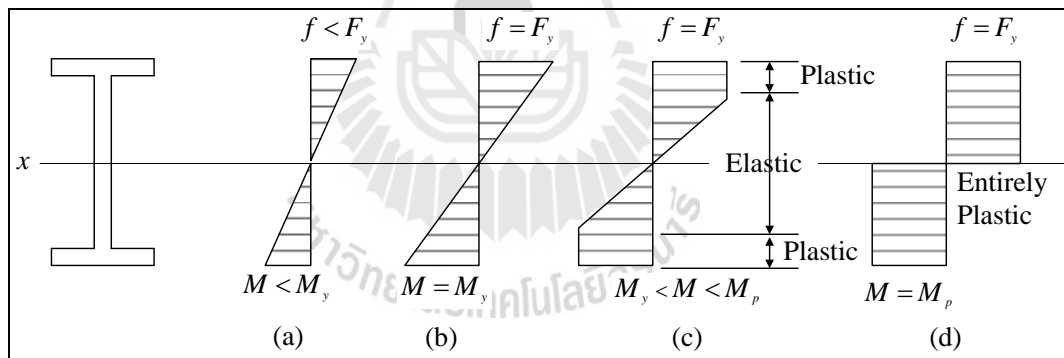
$$f_b = \frac{Mc}{I} \quad (2.1)$$

โดยที่ c คือ ระยะที่วัดจากแกนสะเทินถึงผิวด้านบนหรือผิวด้านล่างของคาน

I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน

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

$$f_b = \frac{M}{S} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.11 หน่วยแรงคดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน (Salmon and Johnson, 1996)

เมื่อโมเมนต์คดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงคดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคานจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากของวัสดุ และการกระจายของหน่วยแรงคดยังคงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.11(b) ค่าโมเมนต์คดที่จุดนี้เรียกว่า โมเมนต์คดที่จุดคราก (yield moment, M_y) และถ้าให้โมเมนต์คดมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าโมเมนต์คดที่จุดคราก ผิวด้านบนสุดและล่างสุดที่มีหน่วยแรงคดเท่ากับโมเมนต์คดที่จุดคราก ยังคงรับหน่วยแรงเท่าเดิม โดยที่หน่วยแรงคดที่เพิ่มขึ้นจะถูกต้านทานโดยส่วนของหน้าตัดที่อยู่ใกล้แกนสะเทินมากขึ้น และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดคานมีหน่วยแรงคดเท่ากับหน่วยแรงครากมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11(c) สุดท้ายทุกตำแหน่งบน

หน้าตัดคานจะมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงคราก ซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า Plastic hinge ดังแสดงในรูปที่ 2.11(d) และหน้าตัดของคานดังกล่าวไม่มีความสามารถในการต้านทานต่อโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอีก ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิด Plastic hinge เรียกว่า โมเมนต์พลาสติก (plastic moment, M_p)

2.3.1 การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD

AISC ได้เสนอวิธีคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design: LRFD) เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบโครงสร้างเหล็กนอกเหนือจากวิธี ASD ซึ่งนิยมใช้ในอดีต (AISC 350, 1999) วิธี LRFD มีหลักการและขั้นตอนการออกแบบคล้ายคลึงกับวิธีกำลังประลัย (ultimate strength design: USD) ที่ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย ACI (American Concrete Institute) โดยทั่วไปโครงสร้างเหล็กที่ออกแบบด้วยวิธี LRFD จะประหยัดกว่าที่ออกแบบด้วยวิธี ASD โดยมีค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกัน และในปัจจุบัน AISC แนะนำให้วิศวกรผู้ออกแบบใช้การคำนวณและออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธี LRFD เป็นหลัก

มาตรฐาน LRFD เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สถานะจำกัด (limit state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ภายใต้สถานะจำกัดนี้กำหนดให้ค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานระบุขององค์อาคารกับตัวคูณความต้านทาน (resistance factor) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

สำหรับองค์อาคารรับแรงดัดกำหนดให้ $M_u = \sum \gamma_i Q_i$ และ $M_n = R_n$ จากสมการที่ (2.4) จะได้

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

โดยที่ Q_i คือ แรงต่าง ๆ เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งาน เช่น โมเมนต์ แรงเฉือน เป็นต้น หรือจากน้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจรแรงลม เป็นต้น ค่าแรงต่าง ๆ สามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีอิลาสติกเช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในวิธี AISC/ASD

γ_i คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

ϕ คือ ตัวคูณความต้านทาน (สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด $\phi = 0.90$)

| | | |
|-------|-----|--|
| R_n | คือ | ความต้านทานระบุ (nominal resistance) |
| M_u | คือ | โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว (factored service moment) |
| M_n | คือ | กำลังโมเมนต์ระบุ (nominal moment strength) |

สมการที่ (2.4) กล่าวว่าโมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว ซึ่งได้จากการวิเคราะห์คานภายใต้น้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับตัวคูณน้ำหนักบรรทุก ($M_u = \sum \gamma_i Q_i$) ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังรับโมเมนต์ของคาน ซึ่งคำนวณจากกำลังโมเมนต์ระบุคูณกับตัวคูณลดความต้านทาน

มาตรฐาน LRFD ได้จำแนกประเภทของคานเหล็กรูปพรรณออกเป็นประเภทหน้าตัดอัดแน่น หน้าตัดไม่อัดแน่น และหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด โดยใช้อัตราส่วนความกว้างปีกต่อความหนาปีก (b_f / t_f) และอัตราส่วนความลึกของหน้าตัดต่อความหนาเอว (d / t_w) เป็นเกณฑ์ซึ่งสามารถจำแนกโดยอัตราส่วนดังนี้

ถ้า $\lambda \leq \lambda_p$ และปีกคานเชื่อมต่อกับเอวตลอดความยาวคาน ถือเป็นหน้าตัดอัดแน่น

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

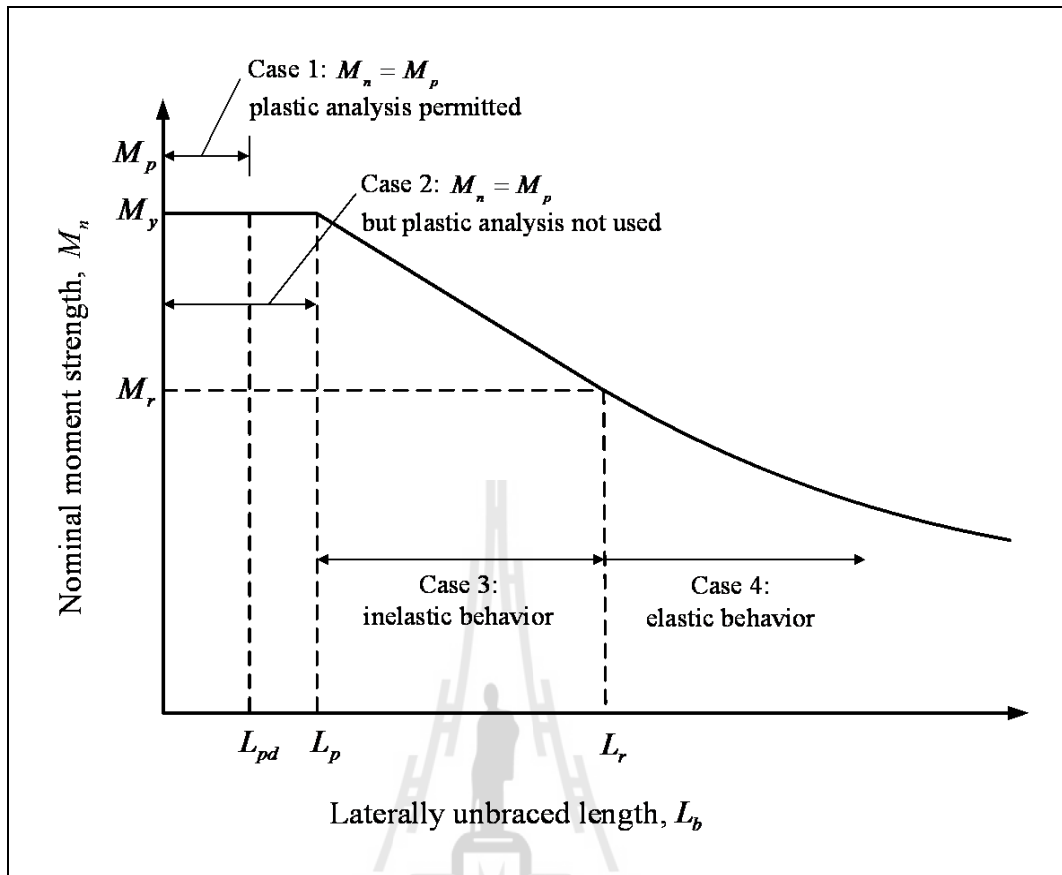
ถ้า $\lambda > \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนระหว่างความกว้างปีกต่อความหนาปีกของหน้าตัดรูปตัวซี สำหรับจำแนกประเภทคานเหล็กรูปพรรณ

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

| ชิ้นส่วน | อัตราส่วน (λ) | b/t (LRFD) | |
|---|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| | | หน้าตัดอัดแน่น (λ_p) | หน้าตัดไม่อัดแน่น (λ_r) |
| ปีกของหน้าตัดปีกกว้าง และ หน้าตัดรูปตัวซีรับแรงดัด | $b_f / 2t_f$ | $0.38\sqrt{E/F_y}$ | $0.83\sqrt{E/F_y}$ |
| เอวคานรับแรงดัด | d / t_w | $3.76\sqrt{E/F_y}$ | $5.70\sqrt{E/F_y}$ |

รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน โดยไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากการ โกงและเฉพะที่ของปีกหรือเอว มาตรฐาน LRFD ได้ใช้รูปที่ 2.12 เป็นเกณฑ์ในการจำแนกพฤติกรรมของคานเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังโมเมนต์ระบุ และส่วนมากคานที่ออกแบบจะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง Inelastic (case 3) และช่วง Elastic (case 4)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน (Salmon and Johnson, 1996)

2.3.1.1 คานหน้าตัดอัดแน่น

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

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

ในกรณีนี้สามารถออกแบบคานด้วยวิธีพลาสติกได้ การวิบัติเกิดจากการครากตลอดหน้าตัด มาตรฐาน LRFD กำหนดให้ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_{pd}$ ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

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

| | | | |
|--------|----------|-----|--|
| โดยที่ | L_b | คือ | ความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้างของคาน |
| | L_{pd} | คือ | ความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก |
| | r_y | คือ | รัศมีไ้เรซันรอบแกนรอง |
| | E | คือ | โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ |
| | F_y | คือ | หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ |

กำลังโมเมนต์ระบุ (M_n) ของคานหน้าตัดอัดแน่น เมื่อความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้าง $L_b \leq L_{pd}$ สามารถหาได้จากสมการ

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

โดยที่ M_p คือ โมเมนต์พลาสติก

2) เมื่อ $L_b \leq L_p$ และเกิดการหมุนได้น้อย

ในกรณีนี้สามารถทำการวิเคราะห์คานด้วยวิธีอีลาสติก การวิบัติเกิดจากการครากตลอดของหน้าตัด LRFD กำหนดไ้ความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปตัวซี ดังนี้

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

โดยที่ L_p คือ ความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$

กำลังโมเมนต์ระบุ (M_n) ของคานหน้าตัดอัดแน่น เมื่อความยาวไ้การยี่ครั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สามารถหาได้จากสมการ

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

เมื่อ $M_p = Z_x F_y$ (2.9)

โดยที่ Z_x คือ โมดูลัสพลาสติก

3) เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$

ในกรณีนี้คานจะมีการยี่ครั้งด้านข้างที่ไม่เพียงพอ เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$ คานจะเกิดการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินอีลาสติก (inelastic lateral-torsional buckling: inelastic LTB) LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุของคานช่วงนี้แปรเปลี่ยนแบบเส้นตรงจาก M_r ถึง M_p ($M_r \leq M_n < M_p$) ดังแสดงในสมการที่ (2.10)

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

มาตรฐาน LRFD ได้กำหนดค่า M_r และ L_r สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปตัวซี ดังแสดงในสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12) ตามลำดับ

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

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

มาตรฐาน LRFD ได้กำหนดค่า X_1 และ X_2 สามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) และสมการที่ (2.14) ตามลำดับ

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} \quad (2.13)$$

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

| | | | |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | C_b | คือ | สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ หาได้จากสมการที่ (2.15) |
| | M_r | คือ | กำลังโมเมนต์สูงสุดในช่วงอีลาสติก |
| | L_r | คือ | ความยาวไร้การยี่ครั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินอีลาสติก |
| | F_L | คือ | ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง $(F_{yf} - F_r)$ กับ F_{yw} |

| | | |
|----------|-----|---|
| F_{yf} | คือ | หน่วยแรงครากของปีก |
| F_{yw} | คือ | หน่วยแรงครากของเอว |
| F_r | คือ | หน่วยแรงค้ำในปีก (สำหรับเหล็กรูปพรรณ $F_r = 69 \text{ MPa}$) |

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

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

ในกรณีที่มีค่าโมเมนต์มีค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน (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 และรูปตัวซี มาตรฐาน LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุ ($M_n < M_r$) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

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

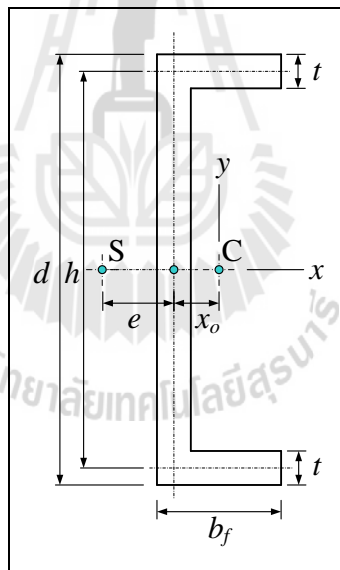
| | | | |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | G | คือ | โมดูลัสแรงเฉือน |
| | I_y | คือ | โมดูลัสอินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง |
| | C_w | คือ | ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping constant) |
| | J | คือ | ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด (torsional constant) |

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

สำหรับคานเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวซี (c-section) ค่าคงที่เนื่องจากการบิด (J) และค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยว (C_w) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19) ตามลำดับ โดยที่พิกัดฉากของหน้าตัดรูปตัวซีอ้างอิงจากรูปที่ 2.13

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

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



รูปที่ 2.13 พิกัดของหน้าตัดรูปตัวซี

2.3.1.2 คานหน้าตัดไม่อัดแน่น

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

1) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีก (flange local buckling: FLB)

ถ้า $\lambda_p \leq \lambda_r \leq \lambda_r$ 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) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเวบ (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 ค่าสัดส่วนความชะลูดของเวบคาน

3) การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling: LTB)

ถ้า $L_p < L_b \leq L_r$ เป็นกรณีที่คานเกิดการวิบัติในช่วงอินอีลาสติก เนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Inelastic lateral-torsional buckling 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 $L_b > L_r$ เป็นกรณีที่คานเกิดการวิบัติในช่วงอีลาสติก เนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Elastic lateral-torsional buckling กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

2.3.2 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน

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

ASCE (1984) ได้นำเสนอสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด สำหรับคานที่วิบัติเนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) กำลังรับโมเมนต์ดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ (2.23) นอกจากนี้ พบว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการเดียวกับสมการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2.23)$$

2.3.3 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน FRP

จากคู่มือการออกแบบ (design manual) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่เผยแพร่ออกมา ในส่วนของสมการออกแบบที่มีลักษณะเกี่ยวข้องกับหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดยังมีจำนวนไม่มากนัก อาจเป็นเพราะเหตุผลด้านกลยุทธ์ทางการค้าของแต่ละบริษัท เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน FRP ส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมที่เน้นด้านเชิงพาณิชย์มากกว่างานด้านวิจัยและตีพิมพ์เผยแพร่ สืบเนื่องจากการที่ยังไม่มีมาตรฐานขององค์กรหรือหน่วยงานใด ๆ นำเสนอข้อกำหนดหรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ของวัสดุ FRP อย่างชัดเจน

1) Creative Pultrusions

Creative Pultrusions (2004) ได้เสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ หรือน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สำหรับคานยื่น (cantilever beam) โดยมีน้ำหนักกระทำที่ด้านปลาย (tip-load) ของคาน ดังแสดงในสมการที่ (2.24)

$$P_{cr} = \gamma \frac{\sqrt{EI_y GJ}}{L^2} \quad (2.24)$$

เมื่อ
$$\gamma = 5.08 \sqrt{1 + \frac{19.3}{\kappa} \left[\frac{(\kappa + 13)(\kappa + 3)}{(\kappa + 10)^2} \right]} \quad (2.25)$$

$$\kappa = \frac{GJL^2}{I_w} \quad (2.26)$$

$$GJ = \frac{2(G_{xy})_f t_f^3 b_f}{3} + \frac{(G_{xy})_w t_w^3 b_w}{3} \quad (2.27)$$

$$I_w = \frac{(E_x)_f t_f b_w^2 b_f^3}{24} + \frac{(E_x)_f t_f^3 b_f^3}{36} + \frac{(E_x)_w t_w^3 b_w^3}{144} \quad (2.28)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|--|
| 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 และใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ของโมเมนต์สำหรับทำนายความสามารถในการต้านทานการโก่งเดาะด้านข้างของหน้าตัดรูปตัวซีสำหรับจุดรองรับในแบบต่าง ๆ

2) Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG)

MMFG (1994) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโก่งเดาะ (F_u) ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี ดังสมการ

$$F_u = \frac{E}{27(b_f / t_f)^{0.95}} \quad (2.29)$$

ดังนั้นหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ (F_b) มีค่าดังสมการ

$$F_b = \frac{F_u}{(F.S.)} = \frac{F_u}{2.5} \quad (2.30)$$

โดย MMFG กำหนดให้คานมีค่าตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2.5

3) Bedford Reinforced Plastics

Bedford Reinforced Plastics (2006) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโก่งเดาะที่ยอมให้ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี ดังสมการ

$$F_b = \frac{G(t_f / b_c)^2}{2.5} \quad (2.31)$$

โดยที่ b_c คือ ความกว้างปีกกลับด้วยความหนาของปีก ($b_f - t_f$)

อย่างไรก็ตาม สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน FRP ตามที่ได้เสนอมานี้ อาจไม่มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประมาณค่าน้ำหนักโก่งเดาะของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี เหตุเนื่องจากสมการที่ (2.24) เป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะสำหรับคานยื่น (cantilever beam) หน้าตัดของรูปตัวซีของ Creative Pultrusions (2004) โดยสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pandey, Kabir, and Sherbourne (1995) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะของคานยื่น (cantilever beam) ที่มีหน้าตัดรูปตัว I

นอกจากนี้ สมการที่ (2.29) และสมการที่ (2.31) เป็นสมการสำหรับประมาณหน่วยแรงโก่งเดาะที่ยอมให้ (F_b) ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีของบริษัท MMFG (1994) และ Bedford Reinforced Plastics (2006) ตามลำดับ โดยทั้งสองสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจาก

สมการสำหรับการคำนวณหน่วยแรงวิกฤต (critical stress) ที่ทำให้คานเกิดการ โกงเดาะเฉพาะที่ของปีกเท่านั้นซึ่งอยู่ในทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ (Gaylord et al., 1992)

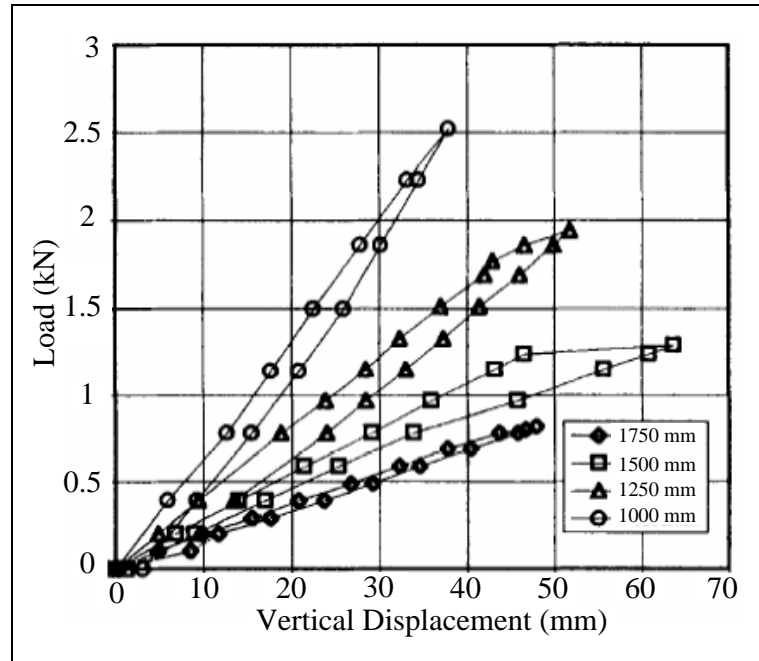
2.4 การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงดัด

Mottram (1992) ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) หรืออาจเรียกว่า การ โกงเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I โดยผลการทดสอบที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองสำหรับการประมาณน้ำหนักบรรทุก โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดโดยใช้วิธี Finite Difference นอกจากนี้ได้เสนอว่า เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน การวิเคราะห์และออกแบบคานหรือชิ้นส่วนรับแรงดัดของพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือนเสมอ เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง

Brooks and Turvey (1995) นำเสนอผลการทดสอบและสมการสำหรับการประมาณน้ำหนัก โกงเดาะ (buckling load) สำหรับการ โกงเดาะด้านข้างของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I ตัวอย่างคานถูกทดสอบ โดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัด ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัว I ที่ใช้ มีขนาดลึก 102 mm กว้าง 51 mm และหนา 6.4 mm รหัส EXTREN™ 500 series ซึ่งผลิตโดยบริษัท Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG) ความยาวของตัวอย่างคานมีค่าเท่ากับ 1000 1250 1500 และ 1750 mm จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I มีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงค่าน้ำหนัก โกงเดาะของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ลักษณะการวิบัติของคานเป็นแบบการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ น้ำหนัก โกงเดาะหรือน้ำหนักบรรทุกวิกฤต (P_{cr}) สำหรับการ โกงเดาะด้านข้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.32) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุก โกงเดาะที่ทดสอบได้

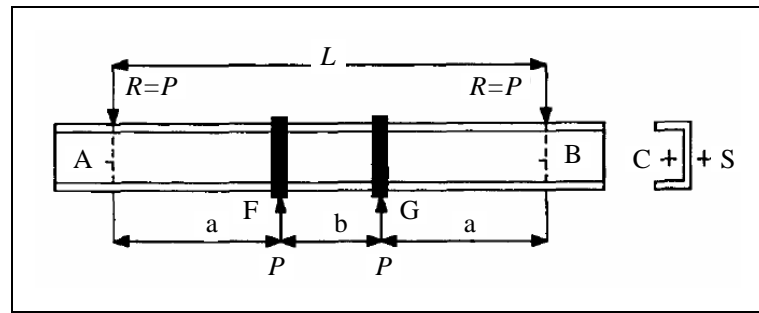
$$P_{cr} = \gamma_2 \frac{\sqrt{E_L I_y G J}}{L^2} \quad (2.32)$$

$$\gamma_2 = \frac{4.013}{\left(1 - \sqrt{\frac{(E_L t_f h^2 b^3 / 24)}{L^2 GJ}}\right)^2} \quad (2.33)$$



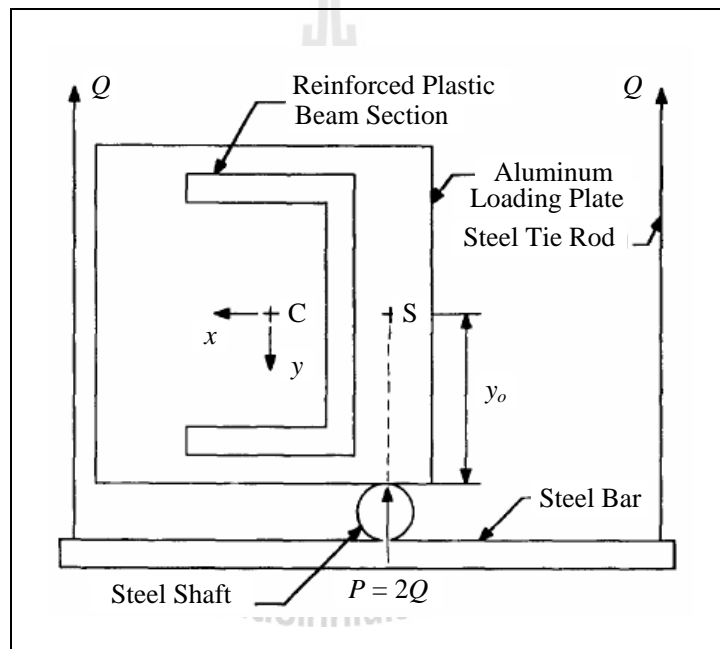
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคาน
(Brooks and Turvey, 1995)

Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani (1996) นำเสนอผลการทดสอบและสมการคำนวณทางทฤษฎีของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี โดยเน้นพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 4 จุด (four-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 แรงกระทำจะกระทำผ่านจุด Shear center โดยผ่านแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยมีจุดรองรับแบบ Simply supported ตัวอย่างคานหน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ทดสอบมีขนาดลึก 152.4 mm กว้าง 41.3 mm และหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion และมีความยาวเท่ากับ 1520 1830 2130 2440 และ 2740 mm



รูปที่ 2.15 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด

(Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)



รูปที่ 2.16 ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ

(Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)

จากผลการทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีมีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงน้ำหนักโก่งเดาะของคาน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดเป็นการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ในงานวิจัยได้นำเสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ (approximate buckling load formula, P_{cr}) ของคาน ซึ่งแรงกระทำที่กระทำผ่านจุด Shear center โดยใช้วิธี Rayleigh-Ritz method ดังแสดงในสมการที่ (2.34) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ค่าของน้ำหนักโก่งเดาะสอดคล้องกับน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้

$$P_{cr} = \frac{0.5[-f_2 + f_2^2 + 4f_1f_3]}{f_1} \quad (2.34)$$

$$\text{เมื่อ } f_1 = \frac{1}{16} \left[f(a) - \frac{\pi^2 a^2}{L^2} - \frac{2\pi a}{L} g(a) \right]^2 \quad (2.35)$$

$$f_2 = \frac{\pi^4 E_{11} I_y}{4L^3} y_0^* \sin^2 \left(\frac{\pi a}{L} \right) \quad (2.36)$$

$$f_3 = \frac{\pi^6 E_{11} I_y}{16L^4} \left[\frac{\pi^2 E_{11} C_w}{L^2} + G_{12} J \right] \quad (2.37)$$

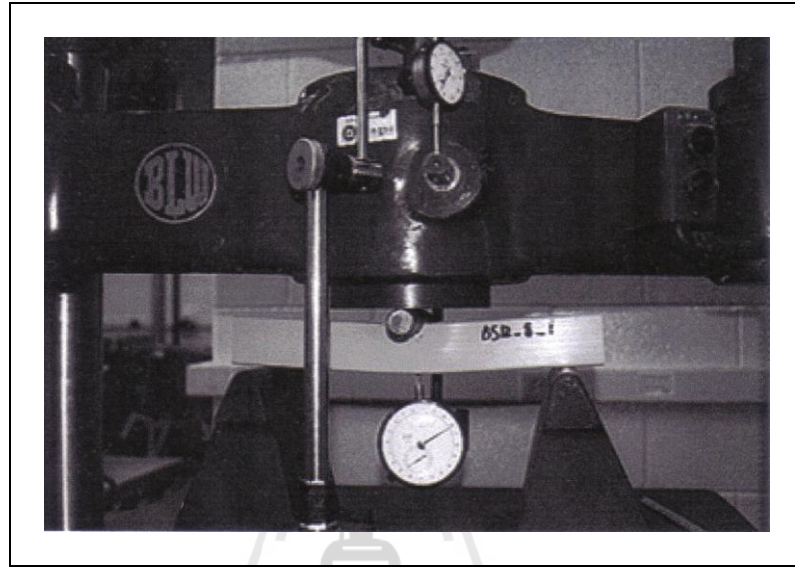
$$f(a) = \frac{\pi a}{L} \sin \left(\frac{2\pi a}{L} \right) - \sin^2 \left(\frac{\pi a}{L} \right) \quad (2.38)$$

$$g(a) = \frac{1}{2} \left[\pi \left(1 - \frac{2a}{L} \right) - \sin \pi \left(1 - \frac{2a}{L} \right) \right] \quad (2.39)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|--|
| โดยที่ | a | คือ | ระยะห่างระหว่างแรงกระทำและจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 |
| | E_{11} | คือ | โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย |
| | G_{12} | คือ | โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย |
| | y_0^* | คือ | ระยะห่างระหว่างแรงกระทำถึงแกนสะเทิน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 |
| | I_y | คือ | โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง |
| | C_w | คือ | ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด |
| | J | คือ | ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด |

Seangatith (2002) ศึกษาพฤติกรรมทางกลและลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกต่ำ (low span-to-depth ratio) ที่มักถูกนำไปใช้ในกรณีของราวกันตก (guard rail) และราวสะพาน (bridge rail) การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D198-99 ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาความสามารถและการตอบสนองของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางภายใต้แรงดัด ได้แก่ กำลังรับแรงดัดปลาย (ultimate flexural

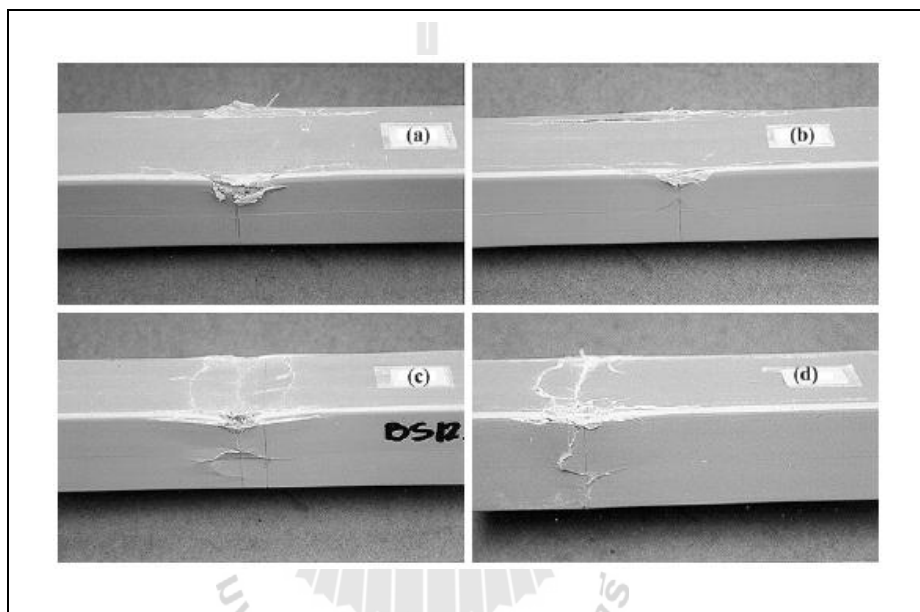
strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคด (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติ ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกว้าง 50 mm ลึก 50 mm และมีความหนา 3.2 และ 6.4 mm ทำมาจากเส้นใยแก้วชนิด E (E-glass fiber) เรซินเป็นชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion



รูปที่ 2.17 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลาง
ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

จากผลการทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกคานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมเชิงเส้นตรง (linear) พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear) และพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้า (progressive failure) ในส่วนของพฤติกรรมเชิงเส้นตรงมีค่าถึง 35-75% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย สำหรับอัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดของหน้าตัดต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าของคานเหล็กรูปพรรณ ดังนั้น อิทธิพลเนื่องจากการแอนตัวเนื่องจากแรงเฉือนจะมีค่าสูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดของหน้าตัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดคานพลาสติกเสริมเส้นใยไม่ได้พิจารณาเป็นคุณสมบัติของตัวเนื้อวัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของหน้าตัด ตลอดจนลักษณะการจัดวางเส้นใย โดยโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าน้อยกว่าเหล็กรูปพรรณอยู่ 7 ถึง 9 เท่า ดังนั้น การแอนตัวของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมหลักในการการออกแบบหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใย

ในช่วงที่พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรง การวิบัติของคานเริ่มจากการบดแตกของส่วนเอว (web crushing) ที่บริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำ ตามด้วยการแตกตามแนวยาวตลอดแนวของรอยต่อระหว่างส่วนปีกตอนบนและส่วนเอวในลักษณะของพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้า ซึ่งแตกต่างจากการวิบัติของวัสดุเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2.18 พฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงที่นำมาทดสอบตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของहनวนแรงเข้มข้น (stress concentration) บริเวณจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ซึ่งควรให้ความสนใจและคำนึงถึงในการออกแบบ อาทิเช่น ราวกันตกและราวสะพาน



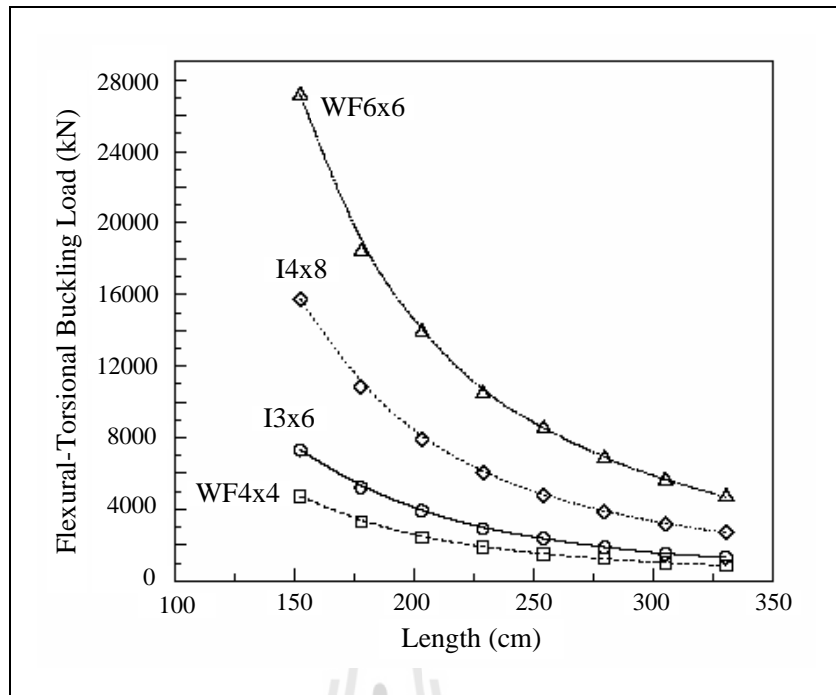
รูปที่ 2.18 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

Qiao, Zou, and Davalos (2003) นำเสนอผลการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I โดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมนกับการบิด ตัวอย่างทดสอบคานหน้าตัด wide-flange และรูปตัว I ที่ใช้ในการทดสอบมี 4 ขนาด ได้แก่ (1) I 101.6×203.2×9.5 mm (2) I 76.2×152.4×9.5 mm (3) W 101.6×101.6×6.35 mm และ (4) W 152.4×152.4×6.35 mm ตัวอย่างทดสอบผลิตจากเส้นใยแก้วชนิด E (E-glass fiber) เรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion ตัวอย่างถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ 2.19

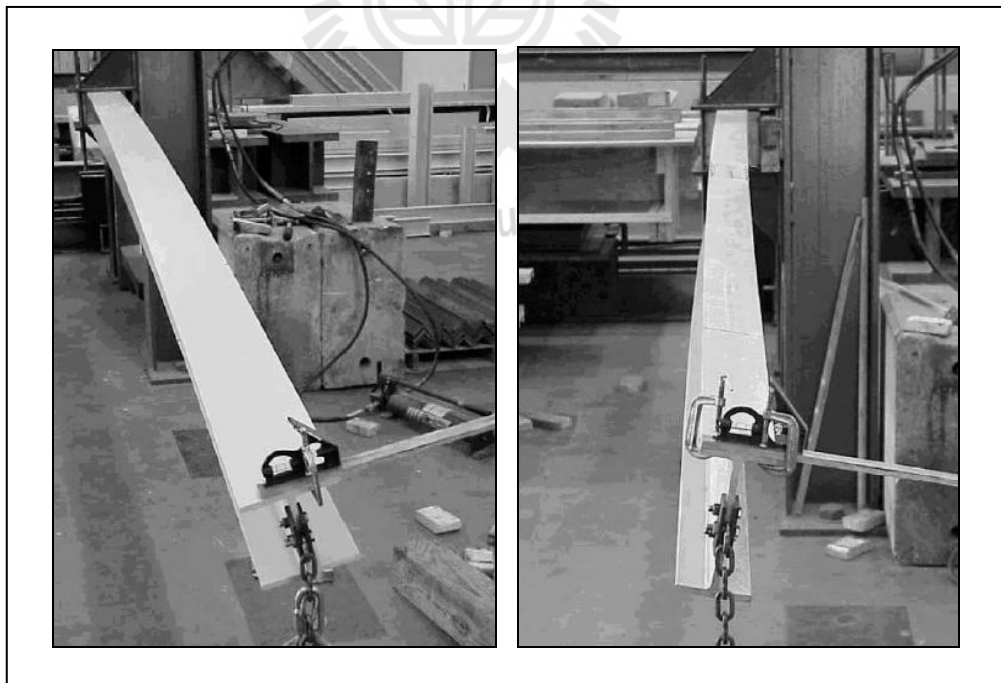


รูปที่ 2.19 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I
(Qiao, Zou, and Davalos, 2003)

จากผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling load, P_{cr}) มีค่าลดลงเมื่อคานมีความยาวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.20 และตัวอย่างหน้าตัดรูป wide-flange มีความสามารถต้านทานแรงกระทำสูงกว่าคานหน้าตัดรูปตัว I โดยขึ้น โมเมนต์อินเนอร์ซีรอบแกนรองและความยาวของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ ลักษณะการวิบัติของคานทุกตัวอย่างเป็นแบบการ โก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.21

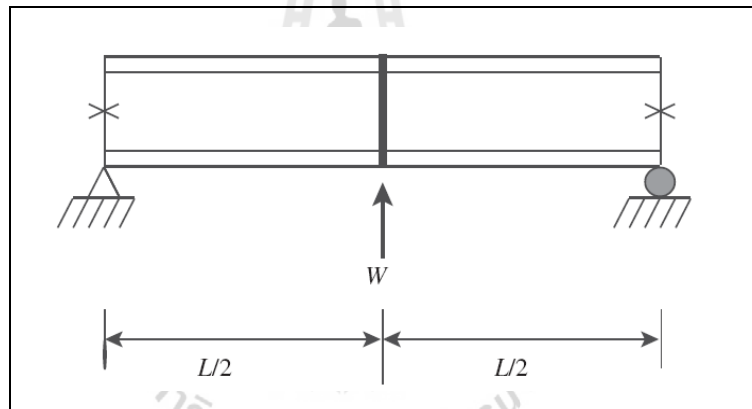


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด และความยาวของตัวอย่างทดสอบ (Qiao, Zou, and Davalos, 2003)



รูปที่ 2.21 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำที่ปลายคาน (Qiao, Zou, and Davalos, 2003)

Sirjani and Razzaq (2005) นำเสนอผลการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I และเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) โดยน้ำหนักบรรทุกทุกกระทำที่กึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยมีจุดรองรับแบบ Simply supported ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ตัวอย่างคานรูปตัว I ที่ใช้ในการทดสอบมีความลึก 101.6 mm กว้าง 50.8 mm และหนา 6.35 mm ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ 4 ค่า ได้แก่ 1800 2100 2400 และ 2700 mm โดยแรงกระทำสูงสุดที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสมการคำนวณทางทฤษฎีที่ดัดแปลง (modified) จากสมการสำหรับการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) สำหรับการออกแบบ โครงสร้างเหล็ก โดยวิธีคุณสมบัติความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design: LRFD) (AISC 350, 1999) โดยการดัดแปลงดังกล่าวใช้หลักการสมดุล (equilibrium approach) สำหรับแก้สมการอนุพันธ์ (differential equation)



รูปที่ 2.22 แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Sirjani and Razzaq, 2005)

จากผลการศึกษา พบว่าตัวอย่างทดสอบมีลักษณะวิบัติแบบ โก่งเดาะด้านข้าง โดยปราศจากการแตกหักของเนื้อวัสดุ หรือการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ตลอดจนผลทดสอบที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับสมการดัดแปลง (modified equation) ที่ปรับปรุงจากวิธี LRFD โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.40)

$$M_{\max} = \Gamma \frac{\pi}{L_b} C_b \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2.40)$$

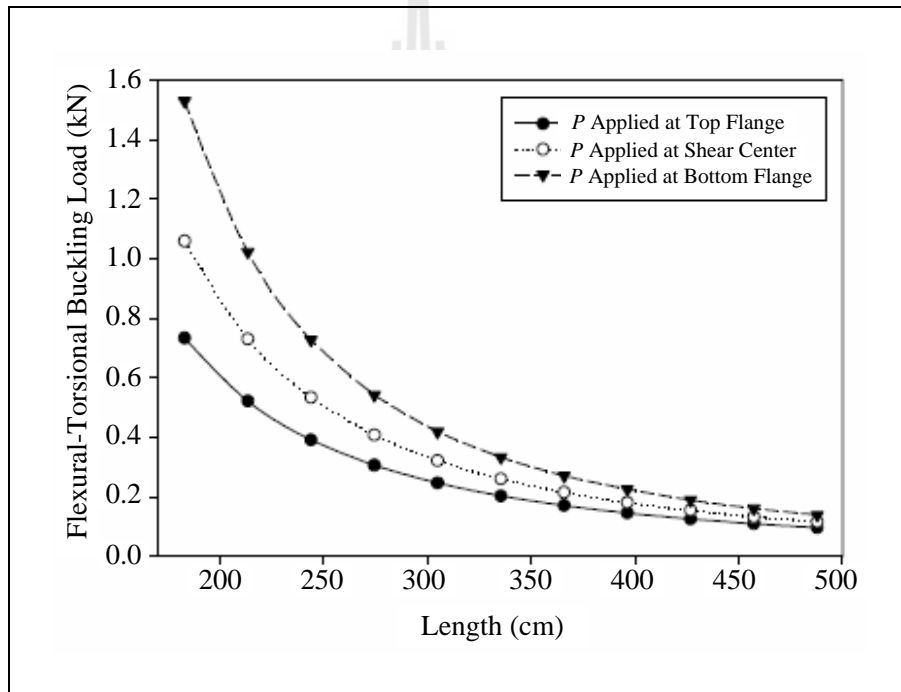
เมื่อ $\Gamma = \frac{L}{175} + 0.5715 \quad (2.41)$

Shan and Qiao (2005) นำเสนอผลการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซี โดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ (1) C 101.6×28.6×6.35 mm (2) C 152.4×41.2×6.35 mm และ (3) C 152.4×42.8×9.52 mm ตัวอย่างผลิตจากเส้นใยแก้วชนิด E (E-glass fiber) เรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion ตัวอย่างถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Shear center ของหน้าตัด เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซีที่ถูกทดสอบ โดยแรงกระทำที่ปลายคาน (Shan and Qiao, 2005)

จากผลการทดสอบ พบว่าน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling load, P_{cr}) มีค่าลดลง เมื่อตัวอย่างคานมีความยาวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบของตำแหน่งแรงที่กระทำ (load locations) โดยมี 3 ตำแหน่งบนหน้าตัด ได้แก่ ปีกบน (top flange) แกนสะเทิน (neutral axis) และปีกล่าง (bottom flange) พบว่าเมื่อพิจารณาความยาวตัวอย่างทดสอบที่เท่ากัน การให้แรงกระทำที่ตำแหน่งปีกล่างของคานให้ค่าน้ำหนักโก่งเดาะมากที่สุด รองลงมาคือการให้แรงกระทำที่ตำแหน่งแกนสะเทินและปีกบน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 นอกจากนี้ ที่น้ำหนักโก่งเดาะ (P_{cr}) ลักษณะการวิบัติของคานทั้งหมดเป็นแบบการโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด และความยาวของคาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซี (Shan and Qiao, 2005)



รูปที่ 2.25 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซี (Shan and Qiao, 2005)

2.5 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสมการที่ใช้ออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP ภายใต้แรงคัดส่วนใหญ่มาจากสมการออกแบบเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD และส่วนหนึ่งถูกพัฒนาสมการจากการทดสอบ (empirical formula) รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของคาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคัด โดยไม่มีการพิจารณาของจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ Simply supported และ Fixed-end supported อย่างจริงจัง ตลอดจนสมการออกแบบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มียังไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอ จึงเห็นสมควรทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะในการรับแรงคัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี โดยทำการทดสอบความสามารถและการตอบสนองของโครงสร้างในการรับแรงคัดของคาน CFRP ในห้องปฏิบัติการ และสุดท้ายนำผลการทดสอบที่ได้มาพัฒนาสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี เพื่อเกิดประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

บทที่ 3

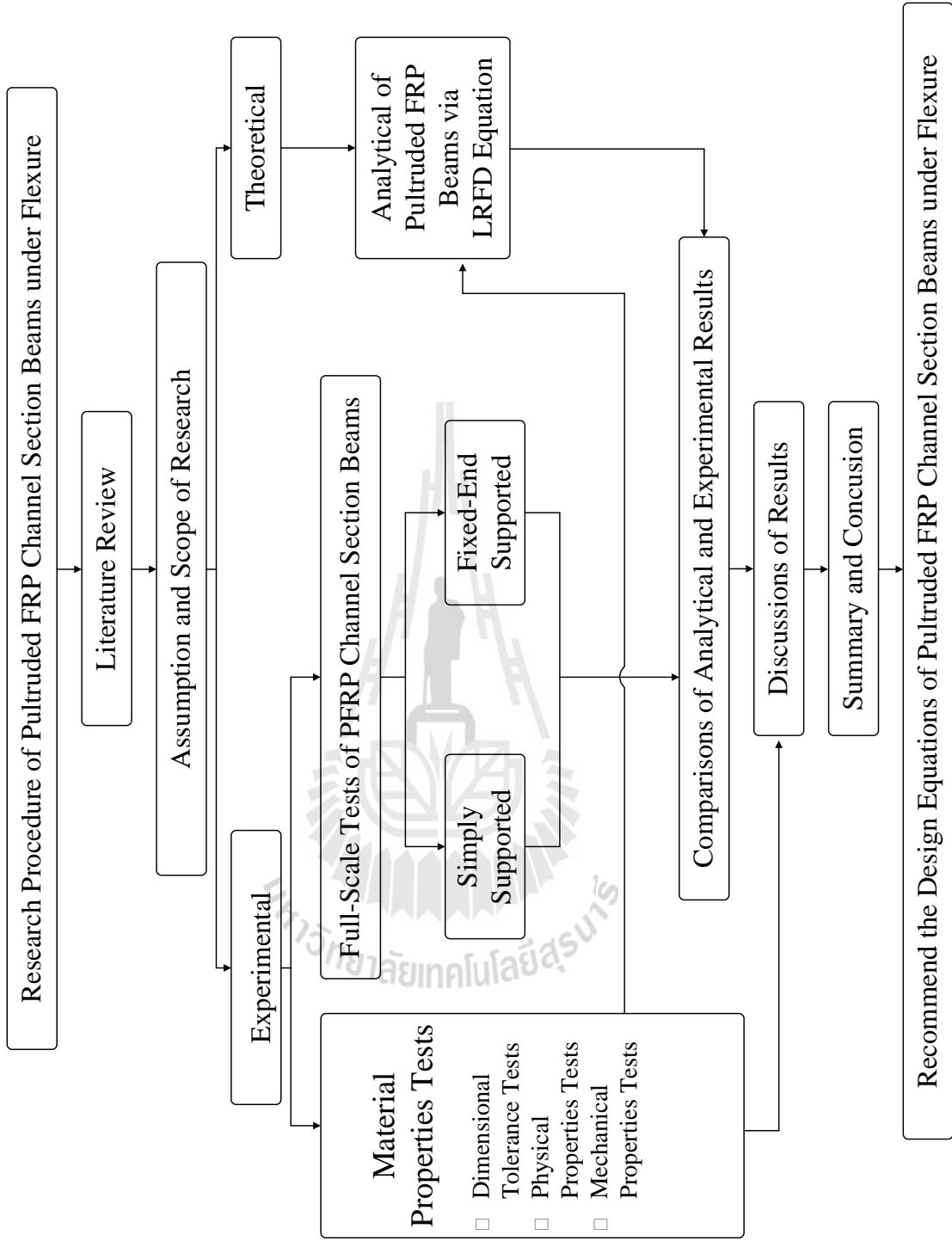
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด การศึกษาประกอบด้วย (1) การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซี (2) การทดสอบการรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด และ (3) การวิเคราะห์การกำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยใช้สมการออกแบบโดยวิธี LRFD

การศึกษาประกอบด้วย การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณ ขั้นตอนต่อมาทำการเลือกวัสดุที่ผลิตเป็นวัสดุ FRP และเลือกขนาดของหน้าตัดที่ทำการศึกษา จากนั้นจัดหาวัสดุ FRP และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เริ่มทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และกำลังรับแรงดัดของคานที่ทำจากวัสดุ FRP ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีจำนวน 172 ตัวอย่าง ถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) จุดรองรับแบบง่าย (simply supported) และ (2) จุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ที่ทดสอบได้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณความสามารถในการรับแรงดัดโดยสมการออกแบบของ LRFD

สุดท้ายเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยสรุปขั้นตอนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย

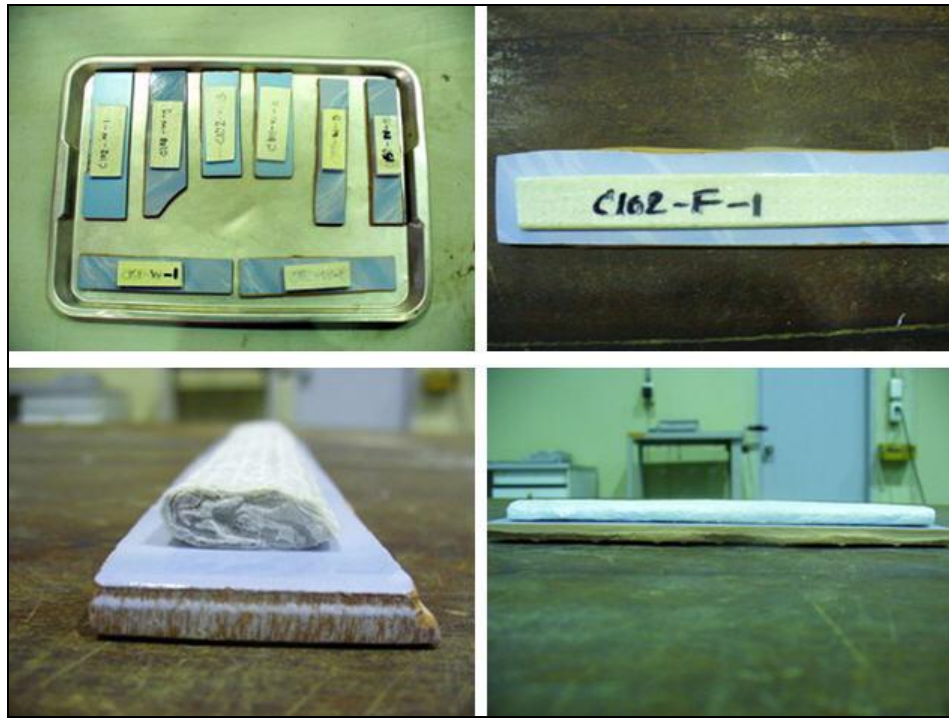
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ CFRP

ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและการคำนวณทางทฤษฎี ผลการทดสอบวัสดุมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการสำหรับทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าหากไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุเท่านั้น โดยการศึกษาประกอบด้วยการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยการทดสอบดังกล่าวถูกกระทำตามมาตรฐาน ASTM

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ CFRP

โดยทั่วไปคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดและปริมาณของใยแก้ว ชนิดและส่วนผสมของเรซิน เป็นต้น โดยชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP ที่ผลิตในประเทศไทย อาจมีคุณสมบัติแตกต่างกับวัสดุ CFRP ที่ผลิตในต่างประเทศ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบถูกตัดออกมาจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ CFRP ที่สำคัญได้แก่ การทดสอบปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ CFRP โดยปริมาณขององค์ประกอบมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ CFRP ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาปริมาณ โดยน้ำหนักของเรซิน ใยแก้ว และช่องว่าง (void) รวมถึงลักษณะของการจัดวาง (alignment) ของใยแก้วที่อยู่ภายในเนื้อวัสดุ CFRP โดยผลการทดสอบสามารถนำไปใช้ทำนายความสามารถและทิศทางในการรับแรงของชิ้นส่วน CFRP โดยประมาณได้

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ CFRP โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมดต้องผ่านการทดสอบหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (ASTM D3171, 1999) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.2 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 3.1



รูปที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

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

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาปริมาณของเรซิน ไยแก้ว และช่องว่างในวัสดุ FRP ได้แก่ เตาอบ และเตาเผา ซึ่งสามารถรักษาความร้อนได้คงที่ที่อุณหภูมิ 70°C และ 565°C ตามลำดับ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการ preheated ตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 70°C เพื่อกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปเผาภายในเตาเผาที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 565°C จนกระทั่งปริมาณเรซินถูกเผาจนหมด

โดยขั้นตอนดังกล่าวใช้ระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (ASTM D3171, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่อไป



รูปที่ 3.3 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C



รูปที่ 3.4 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้าง กำลังของวัสดุซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ โดยไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนั้น โครงสร้างที่ถูกออกแบบต้องมีความแข็งแรงที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้ ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกลขององค์อาคาร แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้ออกมาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ FRP จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับวัสดุ FRP ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ และนำค่าคุณสมบัติทางกลที่ทดสอบได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงค้ำของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการทางทฤษฎีต่อไป ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบถูกตัดออกจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ประกอบด้วย 5 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย การทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย และการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.1 การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

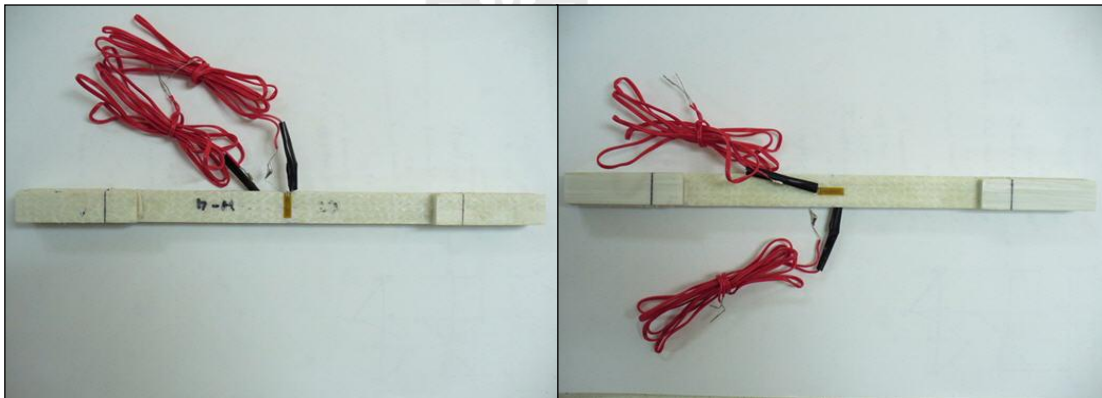
กำลังรับแรงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile strength) และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile modulus) เป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP (Shah, 2007) วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูงสุด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

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ FRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D3039-06 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Composite Materials” จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมดจำนวน 60 ตัวอย่าง จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 ASTM D3039 (2006) ได้กำหนดขนาดของตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของ

วัสดุ PFRP โดยมีความยาว 250 mm กว้าง 15 mm ความยาวของชิ้นส่วนยึดจับ (grip) 56 mm และความหนา มีค่าเท่ากับความหนาของชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ โดยมีทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation) เท่ากับ 0° (unidirectional) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.5 สำหรับค่าความเครียดเชิงดึง (tensile strain) ตามแนวแกนของเส้นใยสามารถหาได้โดยการติดตามวัดความเครียด (strain gauge)

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

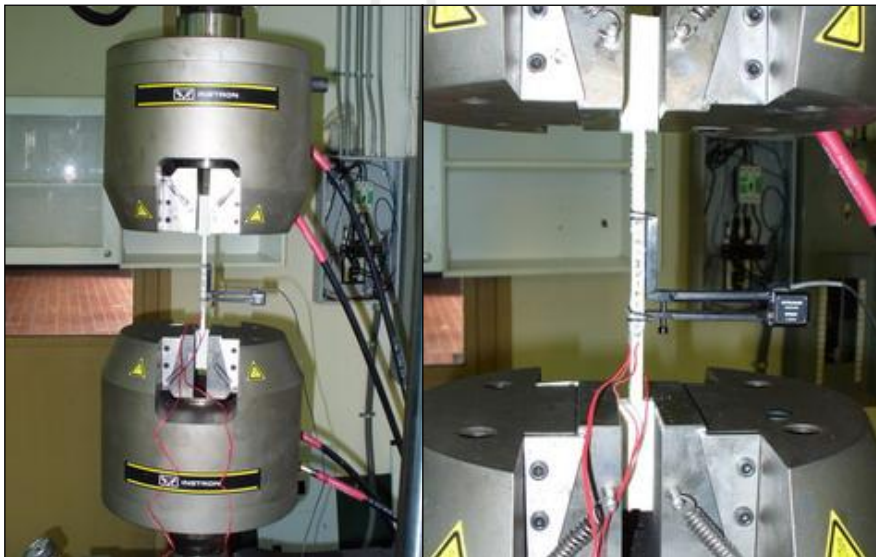
| ชื่อตัวอย่างทดสอบ | บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง | จำนวนตัวอย่าง |
|-------------------|--------------------------|---------------|
| C76-TL-W-No. | เอว | 10 |
| C76-TL-F-No. | ปีก | 10 |
| C102-TL-W-No. | เอว | 10 |
| C102-TL-F-No. | ปีก | 10 |
| C152-TL-W-No. | เอว | 10 |
| C152-TL-F-No. | ปีก | 10 |



รูปที่ 3.5 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 3.6 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยการบันทึกข้อมูลในการทดสอบใช้ Data Acquisition System (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 บันทึกค่าหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



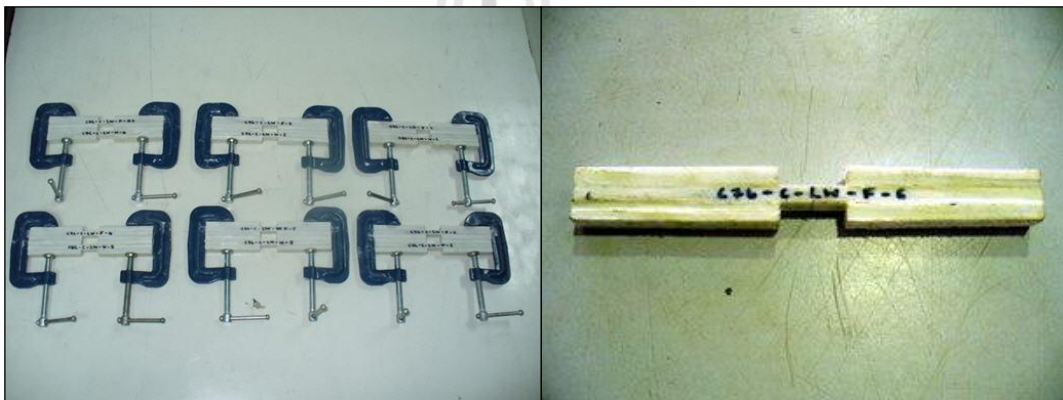
รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.2 การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal compression test) ปัญหาหลักที่พบระหว่างการทดสอบ คือ ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำตัวอย่างมักเกิดการโก่งเดาะ (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 PFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกน (longitudinal compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัด

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ PFRP รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.3



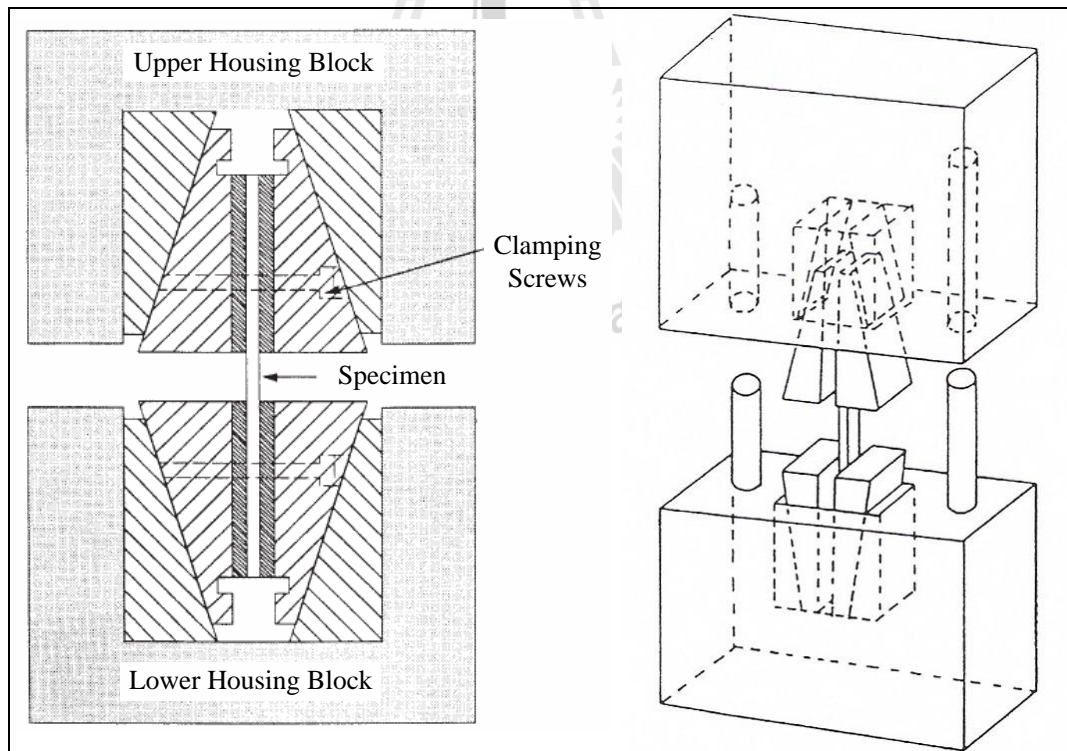
รูปที่ 3.7 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

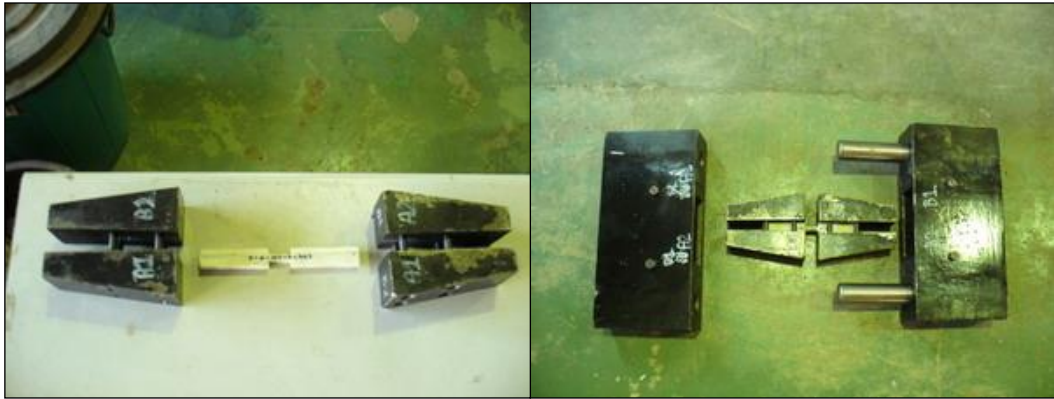
Whitney, Daniel, and Pipes (1981) กล่าวว่า การติดตั้งและการจัดวางตำแหน่ง (alignment) ตัวอย่างทดสอบในแนวตั้งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ Test fixture สำหรับใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เพื่อลดการเอียงศูนย์กลางในขั้นตอนการติดตั้ง ตลอดจนช่วยป้องกันการโก่งเดาะตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ โดยอุปกรณ์ Test fixture ที่นิยมใช้ในการทดสอบมากที่สุด คือ IITRI Test fixture ซึ่งถูกพัฒนาโดย Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) (Hofer and Rao, 1977) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 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 3.10 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.8 รายละเอียดของ Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

(ASTM D3410, 2003; Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006)



รูปที่ 3.9 Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.10 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.3 การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวขวางของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D695-02 “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics” จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่าง

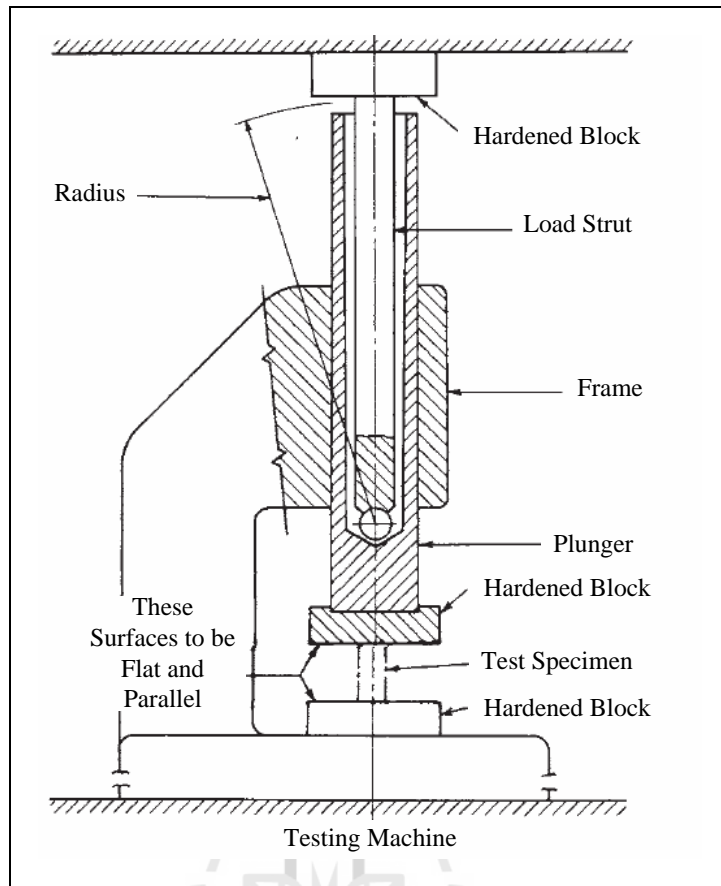
จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

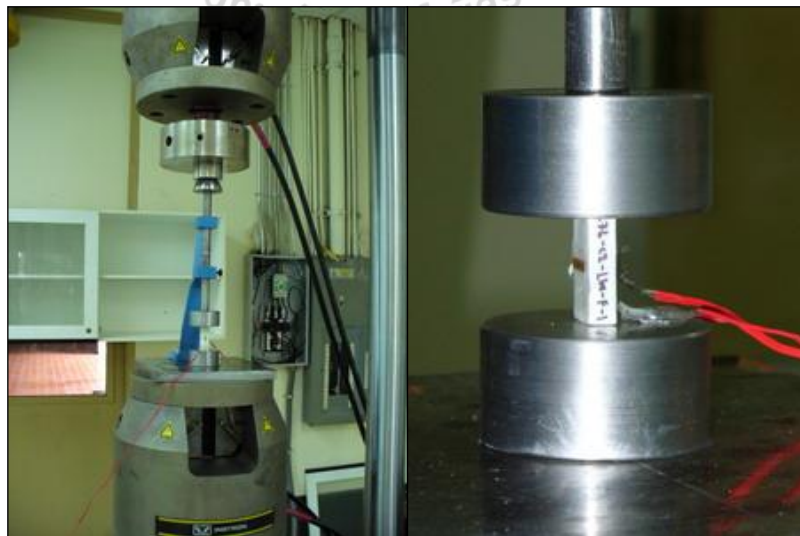
| ชื่อตัวอย่างทดสอบ | บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง | จำนวนตัวอย่าง |
|-------------------|--------------------------|---------------|
| C76-CT-W-No. | เอว | 10 |
| C76-CT-F-No. | ปีก | 10 |
| C102-CT-W-No. | เอว | 10 |
| C102-CT-F-No. | ปีก | 10 |
| C152-CT-W-No. | เอว | 10 |
| C152-CT-F-No. | ปีก | 10 |

มาตรฐาน ASTM D695 (2002) ได้กำหนดขนาดตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีขนาด 12.7×25.4 mm สำหรับความหนา 6 mm และขนาด 12.7×40.0 mm สำหรับความหนา 10 mm สำหรับความค่าความเครียดเชิงอัด (compressive strain) และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย สามารถหาได้โดยการตีความวัดความเครียด ยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ซึ่งถูกติดแบบ back-to-back บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ โดยค่าที่วัดได้เป็นค่าความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางและแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN ค่าหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วย Data logger ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 ตัวอย่างทดสอบถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงอัด (compression tool) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.11 ตัวอย่างถูกวางระหว่างจอร์จรองรับที่มีลักษณะแบบผิวเรียบ โดยให้ผิวของตัวอย่างทดสอบขนานกับผิวของจอร์จรองรับ และให้ทิศทางของแรงกระทำตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D695, 2002) รูปที่ 3.12 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย
(ASTM D695, 2002)



รูปที่ 3.12 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

3.2.2.4 การทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal flexural test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงค้ำสูงสุด (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำ (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำตามแนวแกน (longitudinal flexural modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

ตัวอย่างทดสอบถูกค้ำออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ PFRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D790-03 “Standard Test Method for Flexural of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials” ASTM D790 (2003) ไม่ได้ระบุขนาดของตัวอย่างทดสอบอย่างชัดเจน หากแต่กล่าวว่า ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ (support span) ควรมีค่าไม่น้อยกว่า 16 เท่าของความลึก (หนา) ของตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสเชิงค้ำ มาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำว่าตัวอย่างทดสอบควรมีอัตราส่วนระหว่างจุดรองรับต่อความลึก (span-to-depth ratio) เท่ากับ 60:1 เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉือน (shear effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

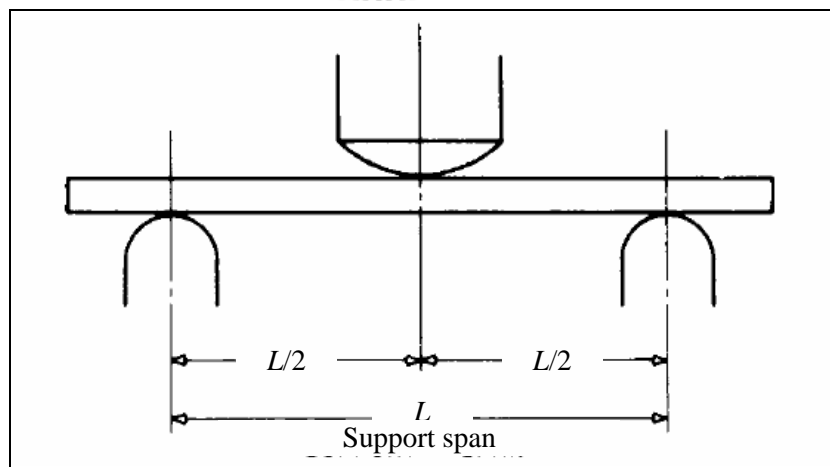


รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

| 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 ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยแรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN การทดสอบเป็นการทดสอบแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) โดยมีแรงกระทำเป็นจุดบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบ และมีจุดรองรับแบบง่าย ASTM D790 (2003) ได้ระบุว่าสำหรับการทดสอบแรงคัต จุดรองรับ และ loading nose จำเป็นต้องมีพื้นผิวลักษณะรูปทรงกระบอก (cylindrical surface) เพื่อลดผลกระทบของหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) ที่อาจเกิดขึ้นบริเวณจุดรองรับและหัวกด ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวกดที่มีอัตราความเครียดคงที่ (constant strain rate) เท่ากับ 0.1 mm/mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D790, 2003) รูปที่ 3.15 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.14 ลักษณะจุดรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D790, 2003)



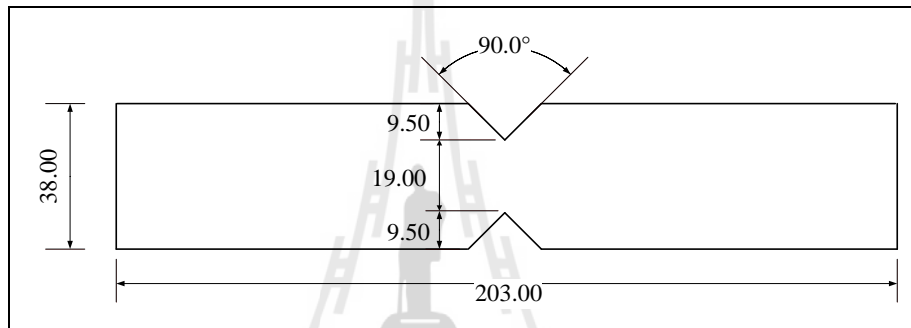
รูปที่ 3.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงตัดตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.5 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 พบว่าผลการทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch ที่ได้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ดี ต่อมาภายหลัง ASTM ได้นำรูปแบบของการทดสอบดังกล่าว ตีพิมพ์เผยแพร่และออกเป็นมาตรฐาน ASTM D5379 (2005)

การทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ultimate shear strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือน (shear modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกน (longitudinal shear modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงเฉือน วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D5379-05 “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by

the V-Notched Beam Method” ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชั้นส่วนปีก และชั้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP และบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบทำการตัดแต่ละด้านของ ขอบโดยทำมุม 90° ดังแสดงรายละเอียดของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.16 จำนวนตัวอย่างทดสอบ ทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบ แรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงดังตารางที่ 3.6 สำหรับการหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิง เกลื่อนของตัวอย่างทดสอบ ได้ทำการติดตามวัดความเครียดที่ห้อง Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างบริเวณรอยบาก (notch) โดยทำมุมกับ แนวแกนของเส้นใยเท่ากับ $\pm 45^\circ$ (Hodgkinson, 2000)



รูปที่ 3.16 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

ตารางที่ 3.6 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 |

สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบถูก กระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 1200 kN กำหนดหน่วย แรงและค่าความเครียดเชิงเกลื่อนถูกบันทึกโดยใช้อุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยเครื่อง Data logger

ยี่ห้อ YOKOGAWA-DS600 และ Data acquisition (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 โดยตัวอย่างทดสอบจะถูกติดตั้งเข้ากับชุดอุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (V-notched shear test fixture) ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ รูปที่ 3.17 แสดงการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.17 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดรูปตัวซี ได้บทสรุปเกี่ยวกับการให้แรงกระทำต่อหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัดตัวซี เนื่องจากในการคำนวณเชิงทฤษฎี น้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัด ส่งผลให้การวิเคราะห์สมการของการโก่งเดาะสำหรับคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีมีความซับซ้อนลดลง โดยที่การวิเคราะห์ดังกล่าวไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากแรงบิด (torsion) ที่เกิดขึ้นร่วมกับแรงดัด (bending) ระหว่างที่โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacements) ดังนั้นการทดสอบดังกล่าวจึงมีลักษณะแบบ Pure bending

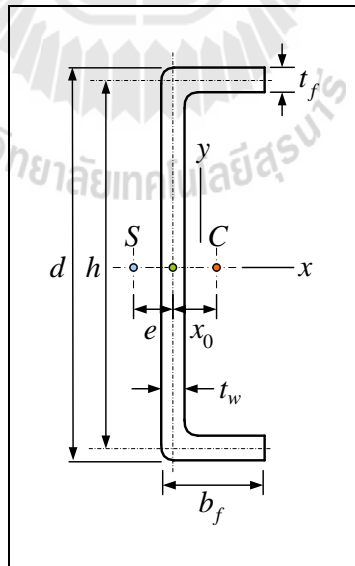
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการออกแบบของค้ำอาคารภายใต้แรงดัดของ AISC/ASD (AISC 316-89) และ AISC/LRFD (AISC 350-99) พบว่าสำหรับหน้าตัดที่สมมาตรรอบแกนเดียว (monosymmetric section) เช่น หน้าตัดรูปตัวซี สมการของการโก่งเดาะด้านข้าง (lateral buckling) ภายใต้แรงดัดดังกล่าวได้ถูกพิสูจน์ (proof) จากสมมติฐานเบื้องต้นว่า น้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต้องกระทำในแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) เท่านั้น (Salmon and Johnson, 1996)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้แรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด ตามเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดรูปตัวซี โดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm โดยเป็นหน้าตัดมาตรฐานและนิยมใช้ในงานโครงสร้าง (Creative Pultrusions, 2004; Shan and Qiao, 2005) โดยงานวิจัยนี้ การออกแบบการทดลองได้ตรวจสอบลักษณะการวิบัติแบบโก่งเดาะเฉพาะที่โดยใช้สมการที่นำเสนอโดย Kollar (2002) และ Kollar (2003) ซึ่งผลการตรวจสอบที่ได้ระบุว่าขนาดมิติและความหนาของหน้าตัดรูปรางน้ำที่ใช้ในงานวิจัยไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยโมเมนต์แบบโก่งเดาะเฉพาะที่จะมีค่าสูงกว่าโมเมนต์แบบโก่งเดาะโดยรวมประมาณ 3-4 เท่า

รูปที่ 3.18 และตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดหน้าตัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในงานวิจัย จากรูปพบว่าจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (จุด S) ของหน้าตัดรูปตัวซีอยู่นอกหน้าตัดที่ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางแนวตั้งของหน้าตัดเป็นระยะเยื้อง e โดยระยะดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) (Cook and Young, 1999)

$$e = \frac{3b^2t_f}{6bt_f + ht_w} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.18 ลักษณะหน้าตัดรูปตัวซีของคาน FRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดของหน้าตัดรูปตัวซีของคาน FRP

| 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 |

3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุกรองรับแบบง่าย (simply supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปตัวซี ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ 1) 76×22×6 mm 2) 102×29×6 mm และ 3) 152×43×10 mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 10-53 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 3.8 ถึงตารางที่ 3.10 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-S-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัวซีที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm S หมายถึงลักษณะของจุกรองรับแบบง่าย สดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C76-S-2.0 หมายถึงคานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุกรองรับแบบง่าย ขนาด 76×22×6 mm และยาว 2.0 m

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP 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 3.9 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 3.10 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP 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 |

ขั้นตอนการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.19

2) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ ชุดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กถูกเจาะรูสำหรับสลักเกลียว 16 mm (M16) ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด

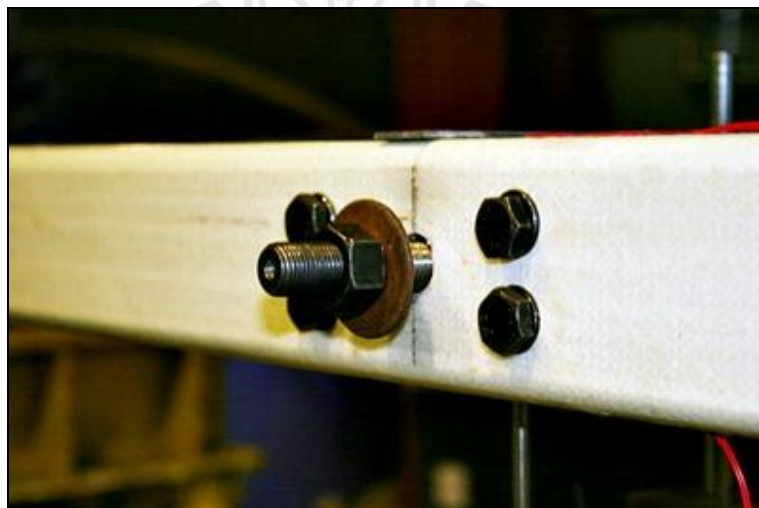
3) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย โดยออกแบบให้จตุรรองรับดังกล่าวเป็นจตุรรองรับแบบไร้แรงเสียดทาน (frictionless) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) รูปที่ 3.21 ถึงรูปที่ 3.22 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย

4) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

5) ระยะเวลาแอนตัวแนวดิ่ง (vertical deflection) และระยะเวลาแอนตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัด โดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.23

6) ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว บริเวณส่วนปีกบนและปีกล่างของตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซีเพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 3.24

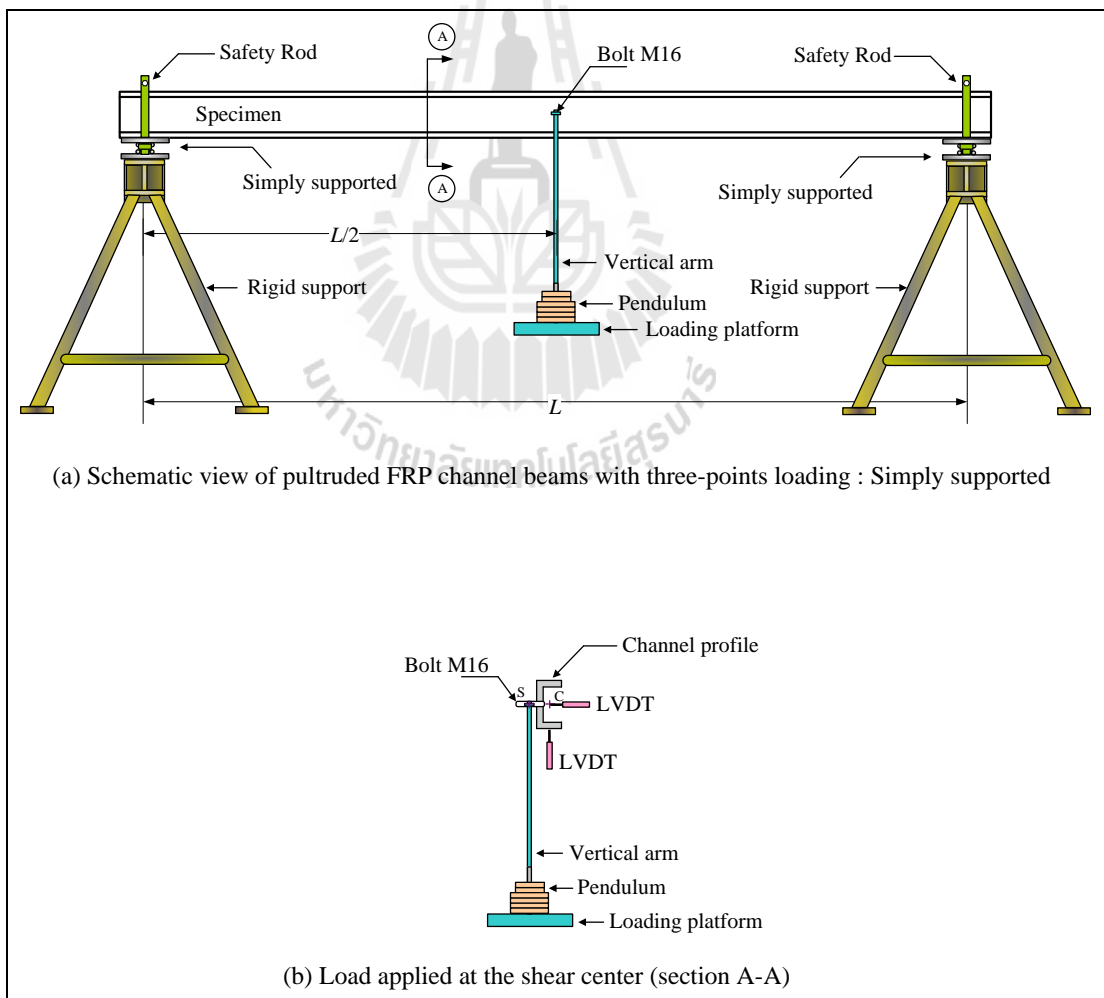
7) เริ่มต้นการทดสอบ โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ โดยค้อนน้ำหนัก (pendulum) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.19 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจตุรรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.20 การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบง่าย



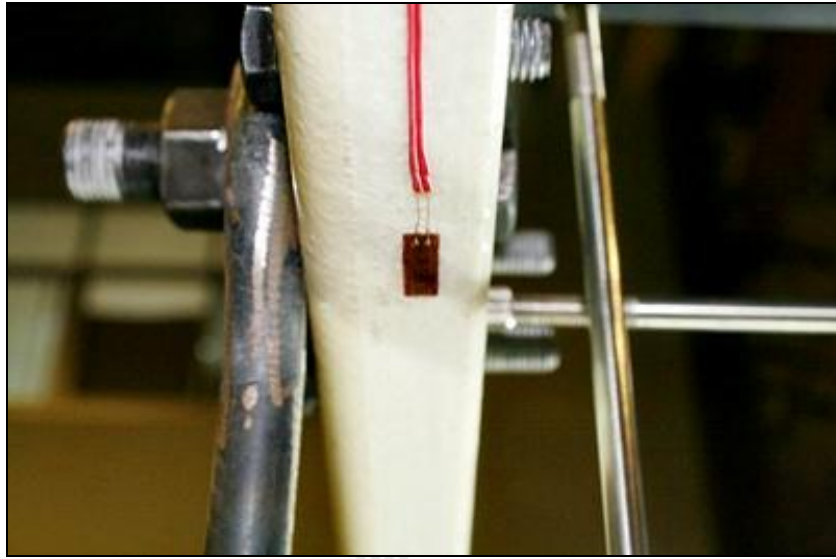
รูปที่ 3.21 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.22 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.23 การวัดระยะแอ่นตัวแนวตั้งและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.24 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างแกน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.25 การทดสอบตัวอย่างแกน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการ โกงเดาะ ด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโกงเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปตัวซี ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ (1) 76×22×6 mm (2) 102×29×6 mm และ (3) 152×43×10 mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 10-53 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 3.11 ถึงตารางที่ 3.13 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 82 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-F-ZZ ถูกตั้งขึ้น โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัวซีที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm F หมายถึงลักษณะของจุกรองรับแบบยึดแน่น สุดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C152-F-4.0 หมายถึง คานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น ขนาด 152×43×10 mm และยาว 4.0 m

ตารางที่ 3.11 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

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

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

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

ตารางที่ 3.13 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

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

ขั้นตอนการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบ ได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมียุทธศาสตร์ดังนี้

1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบ จากนั้นติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยชุดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กถูกเจาะรูสำหรับสลักเกลียว 16 mm (M16) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบคาน FRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด และตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test)

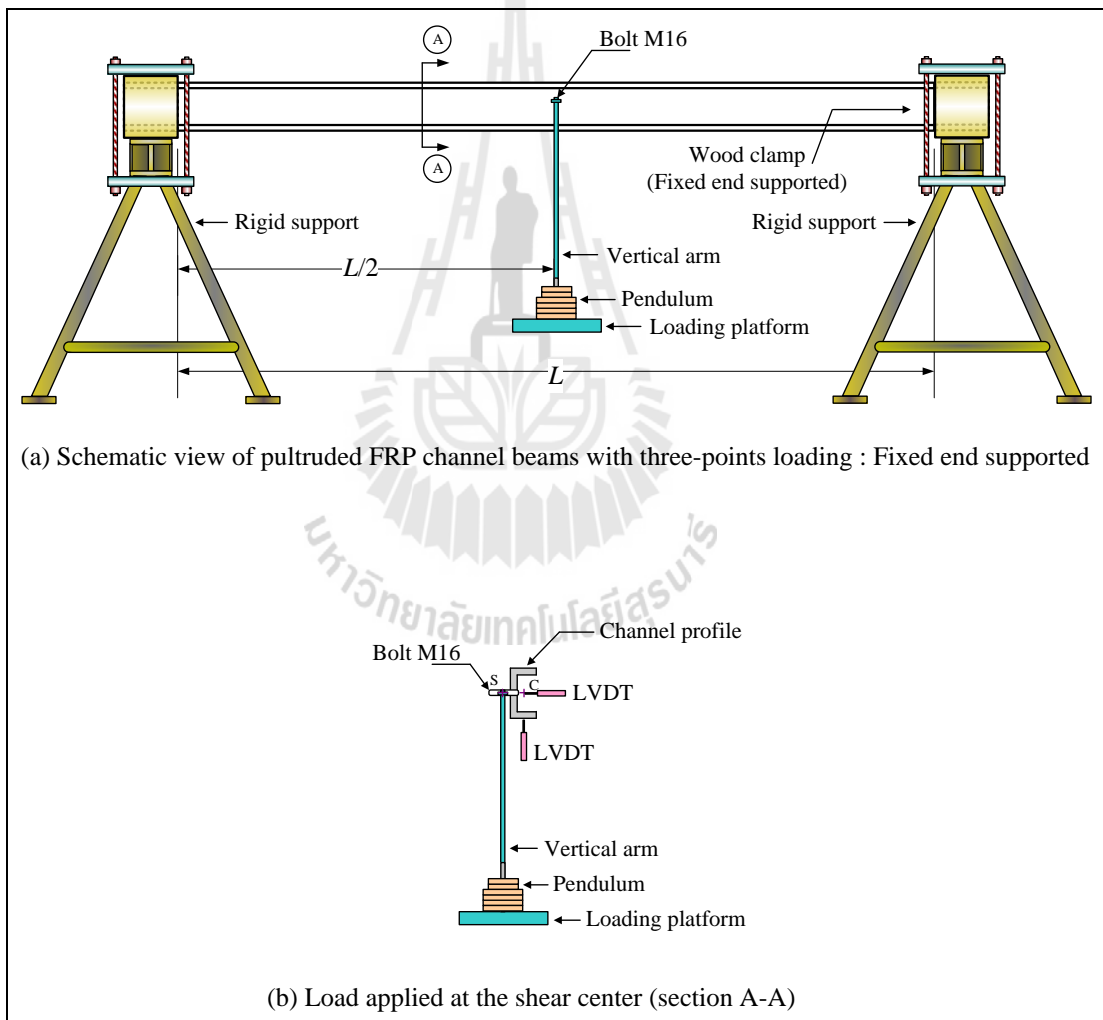
2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับ โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกทำให้ยึดแน่นโดยกล่องไม้เนื้อแข็งสำหรับจับตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการยึดจุกรองรับดังกล่าวโดยใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่นบีบรัดด้านบนและด้านล่างของกล่องไม้ รูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบยึดแน่น

3) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

4) ระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง (vertical deflection) และระยะการแอ่นตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัด โดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.29

5) ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว บริเวณส่วนปีกบนและปีกล่างของตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซีเพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด

6) เริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ โดยดัมพน้ำหนัก (pendulum) ดังแสดงในรูปที่ 3.30 ตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.26 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.27 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.28 จตุรรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.29 การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งและด้านข้างและการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.30 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

3.4 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการออกแบบ

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

AISC/LRFD 350-99 ได้นำเสนอ สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะ (M_{cr}) ของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่วิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2)

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (3.2)$$

| | | | |
|--------|-------|-----|---|
| 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 (3.3)

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

$$C_b = \frac{12.5M_{\max}}{2.5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (3.3)$$

| | | | |
|--------|------------|-----|------------------------------------|
| 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 (3.3) พบว่ากรณีจตุรรองรับแบบง่าย และจตุรรองรับแบบยึดแน่น C_b เท่ากับ 1.32 และ 1.92 ตามลำดับ

โดยปกติวัสดุ CFRP จะถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบ Orthotropic material ซึ่งคุณสมบัติทางกลขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นคุณสมบัติทางกลในสมการที่ (3.2) (E, G) สามารถถูกแทนที่ด้วยค่า E_L และ G_{LT} ดังนั้น สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเคาะของวัสดุ CFRP ที่วิบัติโดยการโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิด ($M_{cr,LRFD}$) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$M_{cr,LRFD} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{E_L I_y G_{LT} J + \left(\frac{\pi E_L}{L}\right)^2 I_y C_w} \quad (3.4)$$

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

นอกจากนี้ เนื่องจากความหนาของปีกและความหนาของเอวมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวจึงสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม หากหน้าตัดดังกล่าวมีความหนาปีกและความหนาเอวไม่เท่ากัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวอาจมีค่าแตกต่างกัน

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาบทนี้ได้นำเสนอผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ของวัสดุ FRP โดยผลการทดสอบดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) จากนั้นกล่าวถึงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคานที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการนำเสนอเป็นหัวข้อตามลักษณะของจุดรองรับ ได้แก่ จุดรองรับแบบง่าย (simply supported) และจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) ผลทดสอบที่ได้ประกอบด้วย ลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงค้ำ จากนั้นเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ำของคาน FRP ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี LRFD กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

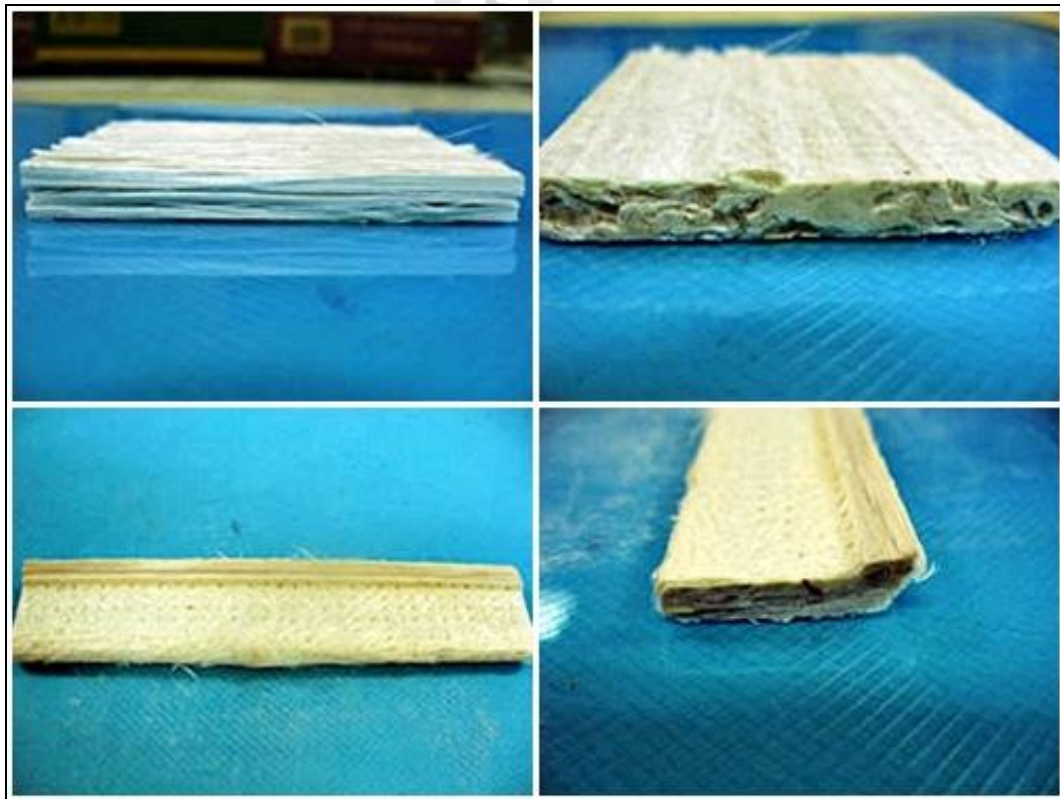
4.2 ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP

4.2.1 ผลการทดสอบปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ FRP

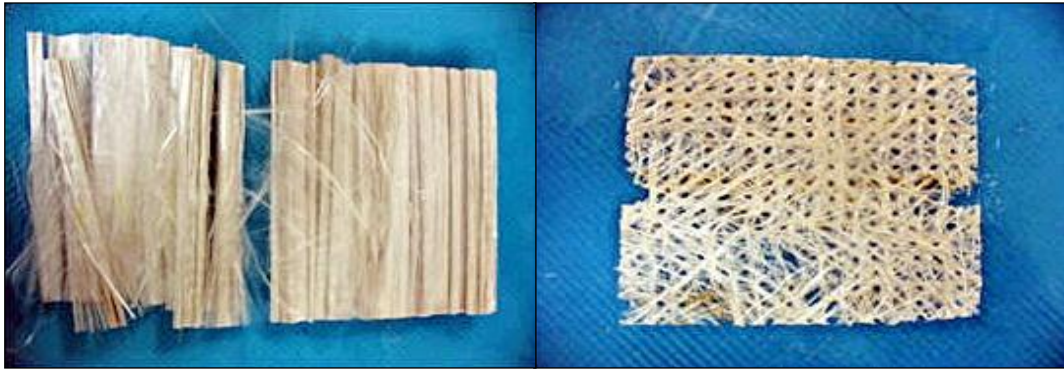
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าผลการทดสอบโดยเฉลี่ยวัสดุ FRP มีปริมาณของใยแก้วเท่ากับ 72.2% โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของเรซินเท่ากับ 27.8% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับปริมาณของใยแก้วที่ใช้ผลิตวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงระหว่าง 45-75% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณใยแก้วของตัวอย่างที่ทดสอบได้มีค่าค่อนข้างมาก แต่อยู่ในช่วงที่กำหนด รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.2 แสดงการเรียงตัวของใยแก้ว จากรูปพบว่าผิวภายนอกทั้งสองด้านของตัวอย่างเป็นแผ่นผิว (surface veil) ที่มีการวางตัวของใยแก้วโดยไม่มีการสานแบบสุ่มทิศทาง (random fiber non-woven filaments) ส่วนภายในมีกลุ่มของเส้นใยแก้ว (continuous strand rovings) เรียงตัวไปในทิศทางตามยาวของชิ้นส่วน โดยไม่มีใยแก้วแบบแผ่น (glass fiber mat) อยู่ภายในชิ้นส่วน

ตารางที่ 4.1 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 4.1 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ FRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก

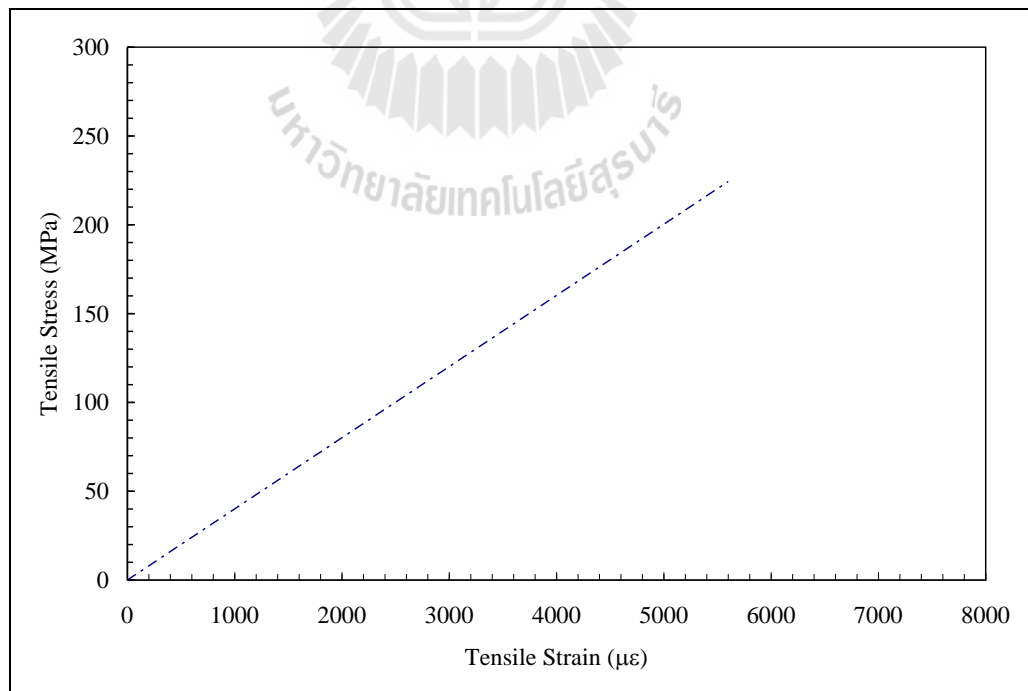


รูปที่ 4.2 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน PFRP

4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP

4.2.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.4 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

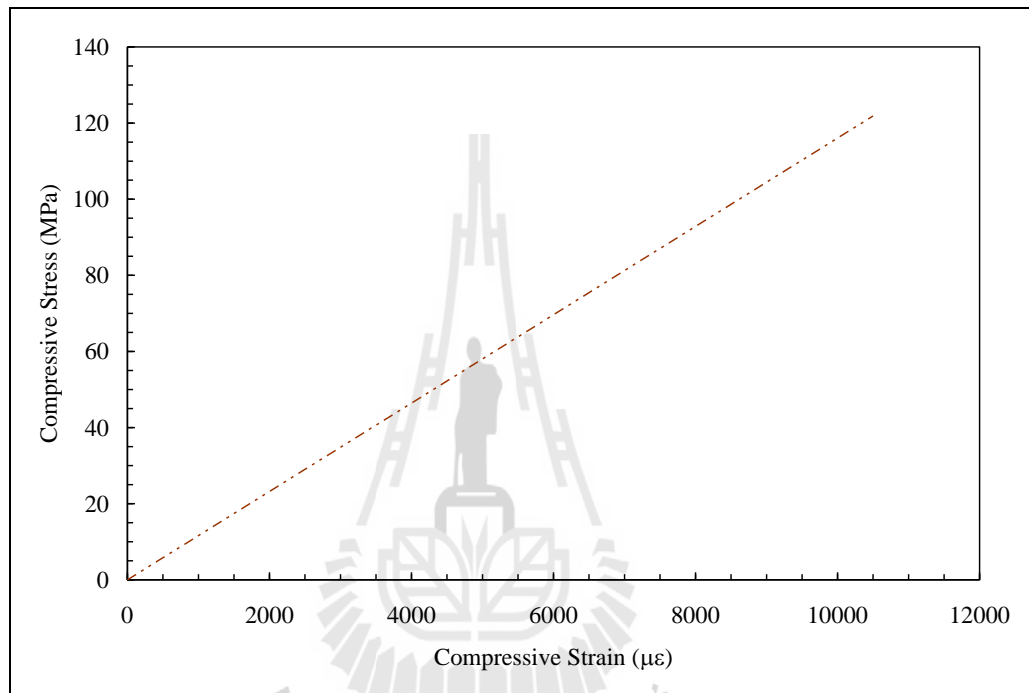
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงและ โมดูลัสยืดหยุ่นดึงตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบของวัสดุ PFRP ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าหน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุ PFRP มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion และ โมดูลัสยืดหยุ่นดึงของวัสดุ PFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า การที่วัสดุ PFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีโมดูลัสยืดหยุ่นดึงสูงกว่าของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วมาก (72.2% โดยน้ำหนัก) และเส้นใยแก้วนั้นมีโมดูลัสยืดหยุ่นดึงสูงกว่าเรซินประมาณ 18 เท่า (Bank, 2006) ดังนั้นวัสดุ PFRP จึงมีแนวโน้มในการมีโมดูลัสยืดหยุ่นดึงสูง

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP

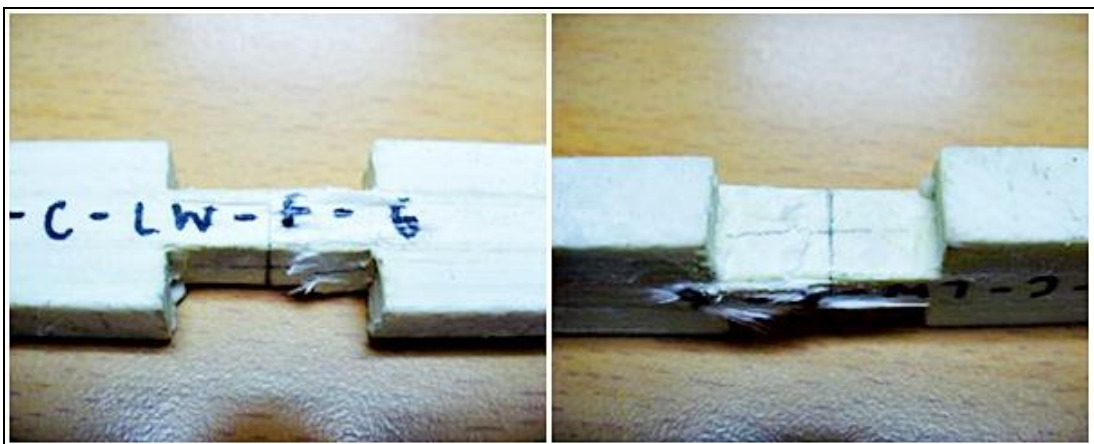
| คุณสมบัติทางกล | ผลทดสอบ | Creative Pultrusion |
|--|---------|---------------------|
| หน่วยแรงดึงประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบ (MPa) | 224.03 | 226.90 |
| โมดูลัสยืดหยุ่นดึงตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบ (GPa) | 35.20 | 17.20 |
| ความเครียดที่จุดวิบัติ (mm/mm) | 0.0054 | - |

4.2.2.2 ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) ที่ความเครียดประมาณ $10,000 \mu\epsilon$ และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.6 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

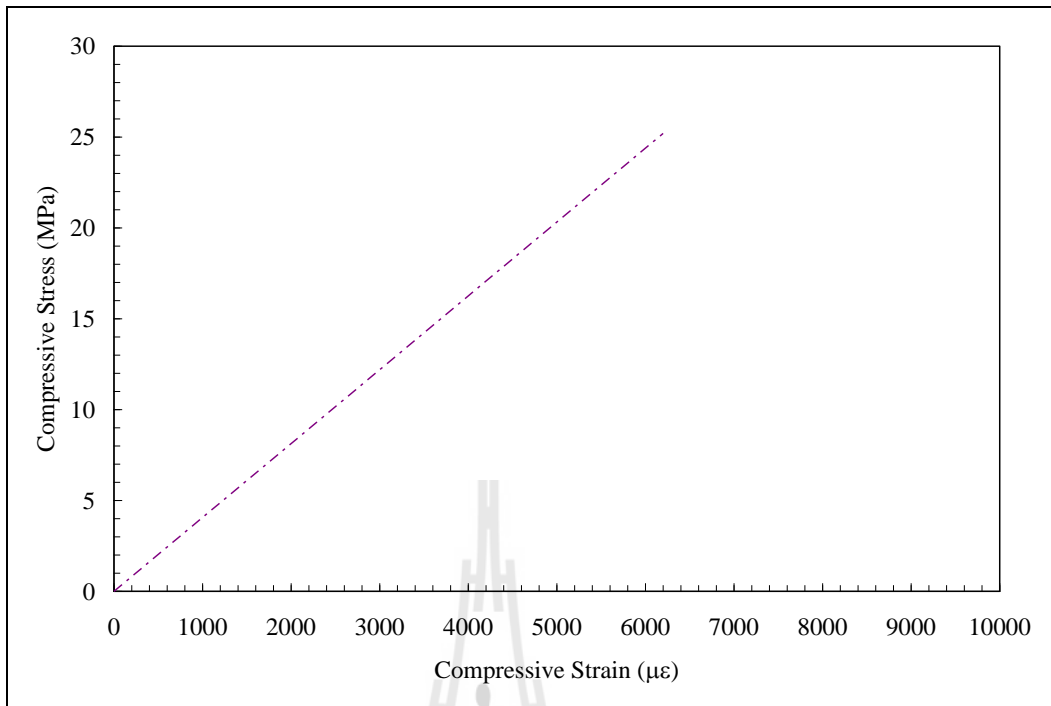
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้ว จะเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตด้อยคุณภาพ

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP

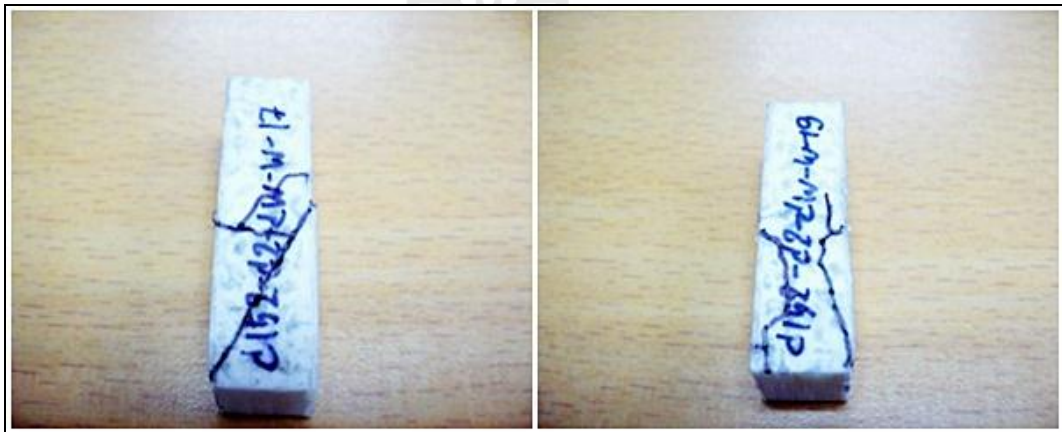
| คุณสมบัติทางกล | ผลทดสอบ | Creative Pultrusion |
|--|------------|---------------------|
| หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 121.86 MPa | 226.90 MPa |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 10.51 GPa | 20.60 GPa |

4.2.2.3 ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย จากรูปพบว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบการแตกหักโดยฉับพลันของเรซินและการเลื่อนของเส้นใย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ 4.8 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

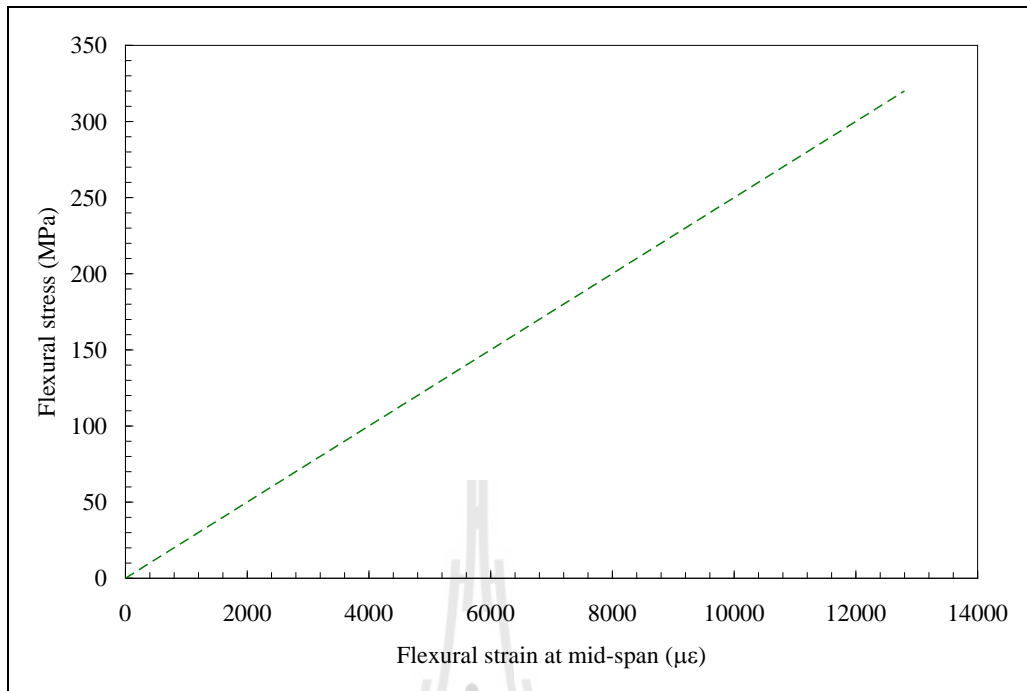
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยต่ำ เนื่องจากภายใต้แรงอัดตั้งฉากเส้นใย เรซินเป็นตัวหลักในการรับแรงกระทำ ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการเลื่อนได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ตามทิศทางที่รับแรงกระทำ การรับแรงในทิศทางขนานเส้นใยมีกำลังและความแกร่งมากกว่าการรับแรงในทิศทางตั้งฉากเส้นใย แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใยแก้วหรือเป็นวัสดุอโอโทรปิก (orthotropic material)

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

4.2.2.4 ผลการทดสอบแรงตัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงตัดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงตัดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเริ่มต้นจากการวิบัติของเรซิน จากนั้นจึงเกิดการขาดออกของเส้นใยแก้วบริเวณที่รับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบในทิศทางขนานกับเส้นใยแก้ว การวิบัติเริ่มจากผิวนอกของตัวอย่างที่มีหน่วยแรงคดสูงสุด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.10 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงคดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงคดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยสำหรับวัสดุ FRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRP มีหน่วยแรงคดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยสูง เนื่องจากวัสดุ FRP ที่ใช้

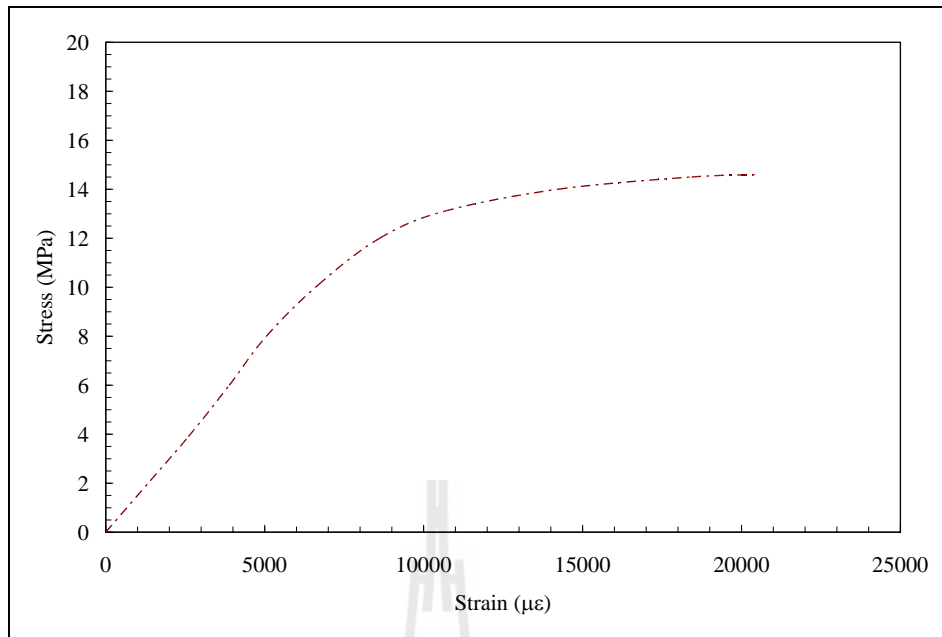
ในงานวิจัยมีปริมาณเส้นใยแก้วสูง ดังนั้นภายใต้แรงค้ำเส้นใยแก้วดังกล่าวทำหน้าที่รับหน่วยแรงดึง และแรงอัดเป็นหลักส่งผลให้กำลังวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูง

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

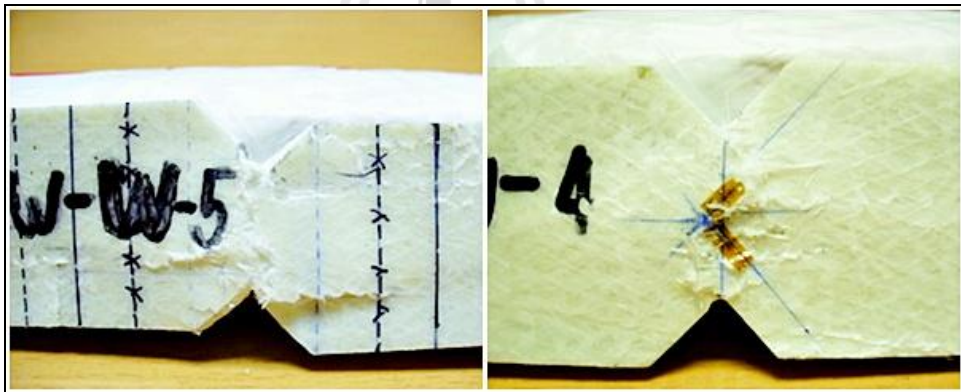
| คุณสมบัติทางกล | ผลทดสอบ | Creative Pultrusion |
|--|------------|---------------------|
| หน่วยแรงค้ำประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 509.73 MPa | 226.90 MPa |
| โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 31.07 GPa | 11.00 GPa |

4.2.2.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงจนใกล้ถึงหน่วยแรงเฉือนสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง พฤติกรรมของตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ หน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าลดลงแต่ตัวอย่างยังสามารถรับแรงต่อไปได้ หรือหน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าคงที่ โดยความเครียดที่บันทึกได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมาตรการความเครียดเกิดการหลุดร่อน การตรวจสอบลักษณะวิบัติของตัวอย่างใช้การสังเกตขณะทดสอบร่วมกับการเปลี่ยนแปลงโดยจับพลันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเฉือน วัสดุเหนียวบางประเภทอาจไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนเพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดการวิบัติหลายแบบร่วมกัน (ASTM D5379-05, 2005) รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติเริ่มต้นจากการแตกของเรซินตามทิศทางขนานกับเส้นใยแก้วบริเวณที่บากเป็นรูปตัววี (v-notched) จากนั้นรอยแตกจะเคลื่อนเข้าใกล้กับบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเลื่อนออกจากกัน ในแนวค้ำตามแนวบากรูปตัววี



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.12 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเค้นตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเค้นและโมดูลัสแรงเค้นตามแนวแกนของเส้นใยเคลือบของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเค้นตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเค้น โดยวัสดุ FRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ (27.8%) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเค้นมีค่าต่ำกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

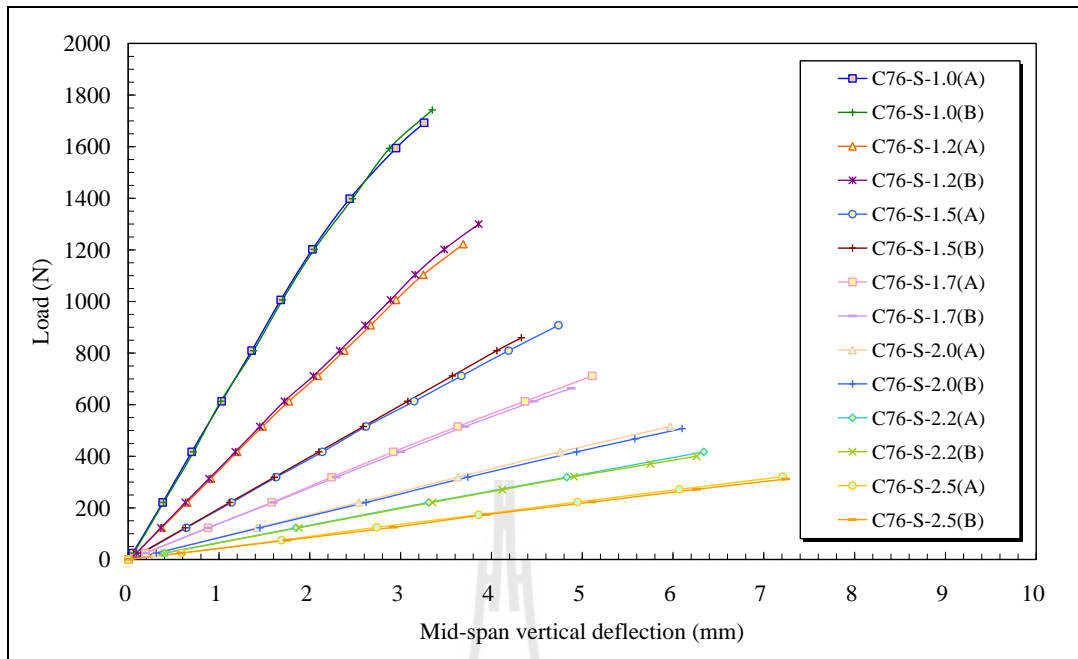
| คุณสมบัติทางกล | ผลทดสอบ | Creative Pultrusion (Full section) |
|---|-----------|---------------------------------------|
| หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 37.27 MPa | - |
| โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย | 2.18 GPa | 2.9 GPa |

4.3 คาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบง่าย

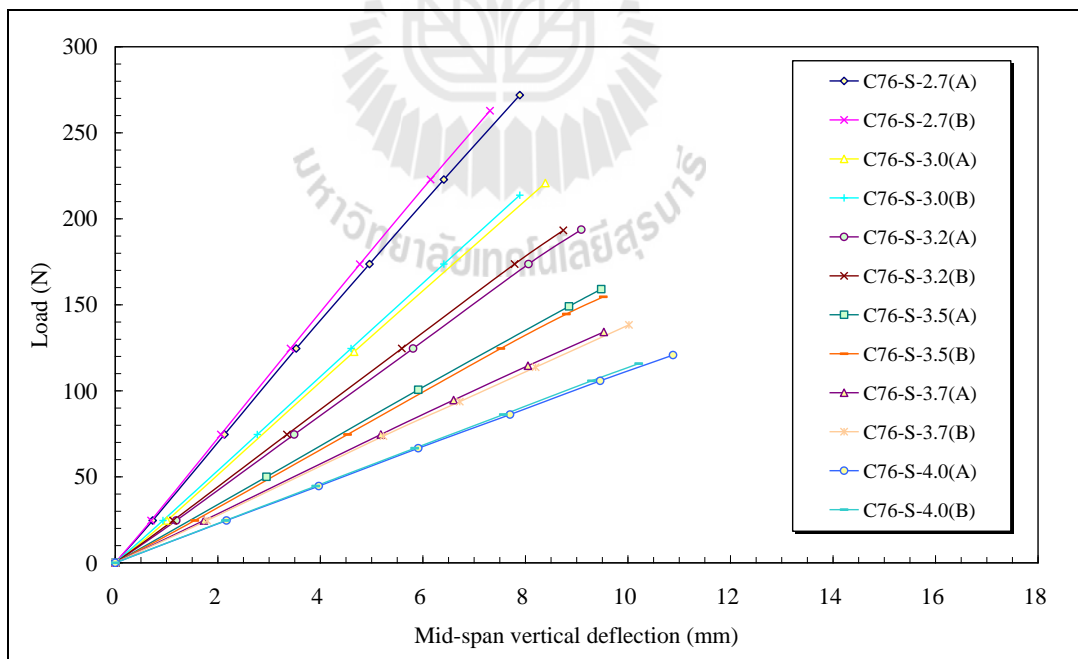
4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงคัตของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) ในทางตรงกันข้าม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวตั้ง รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

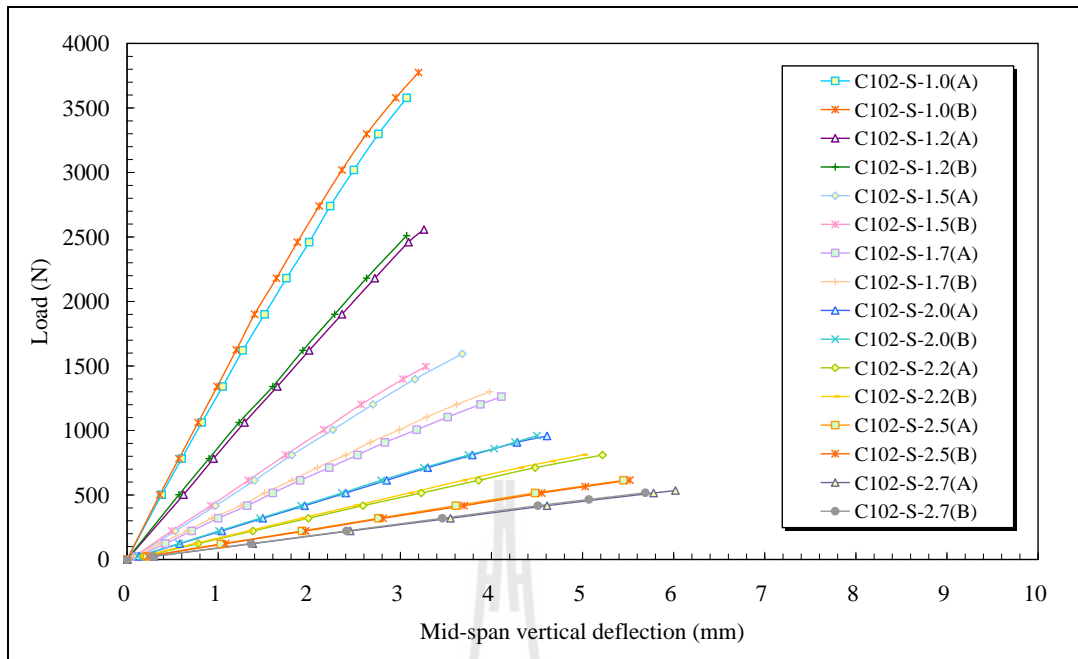
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน CFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



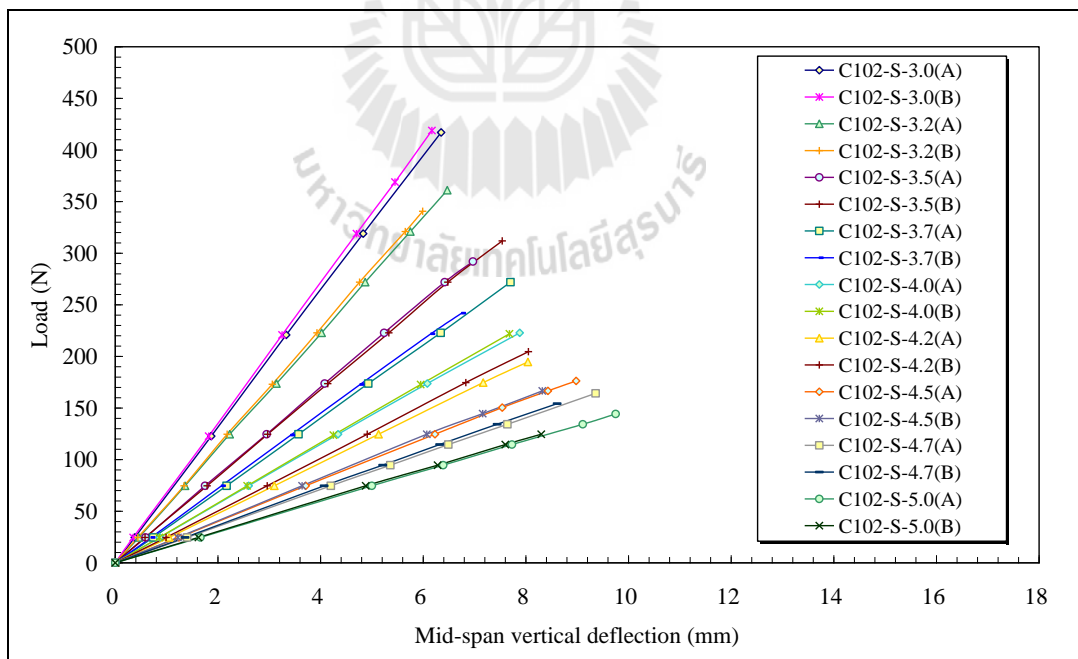
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



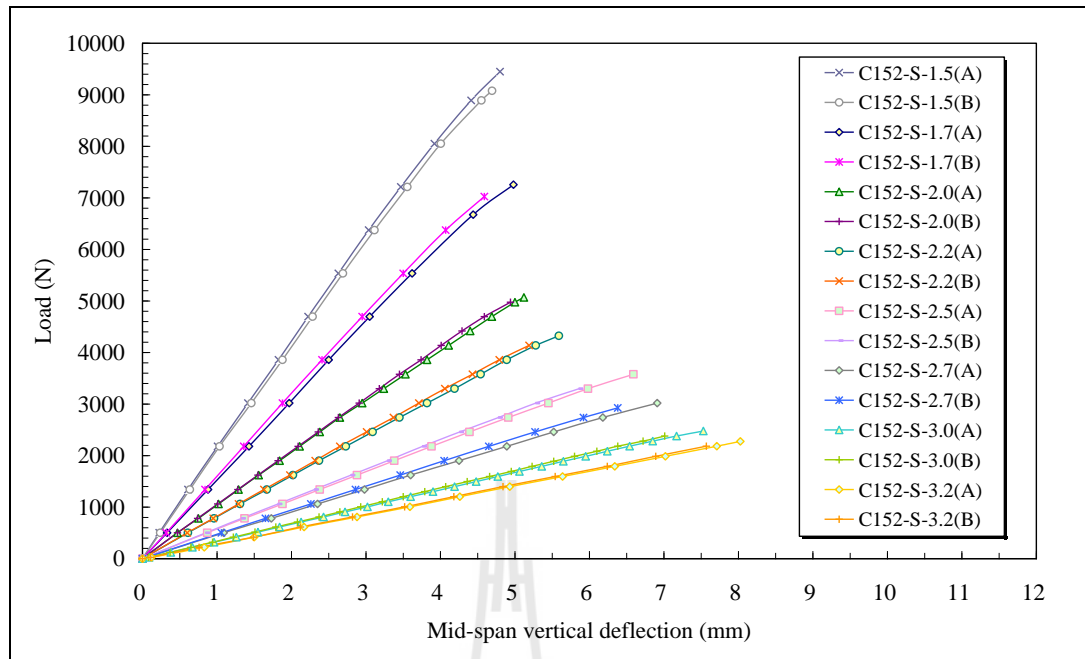
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



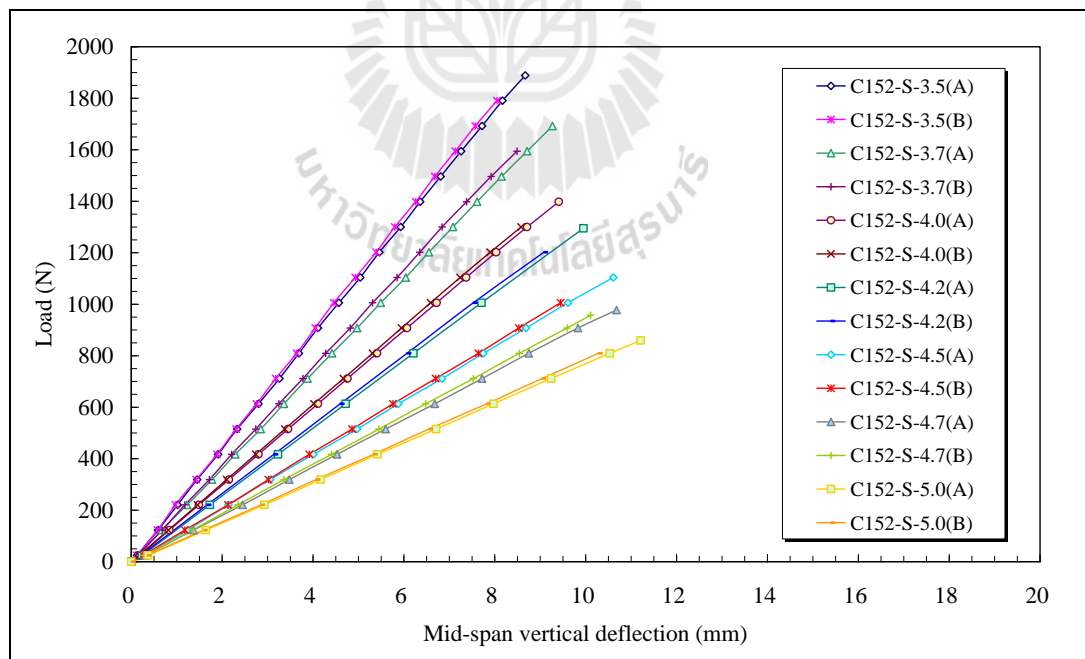
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



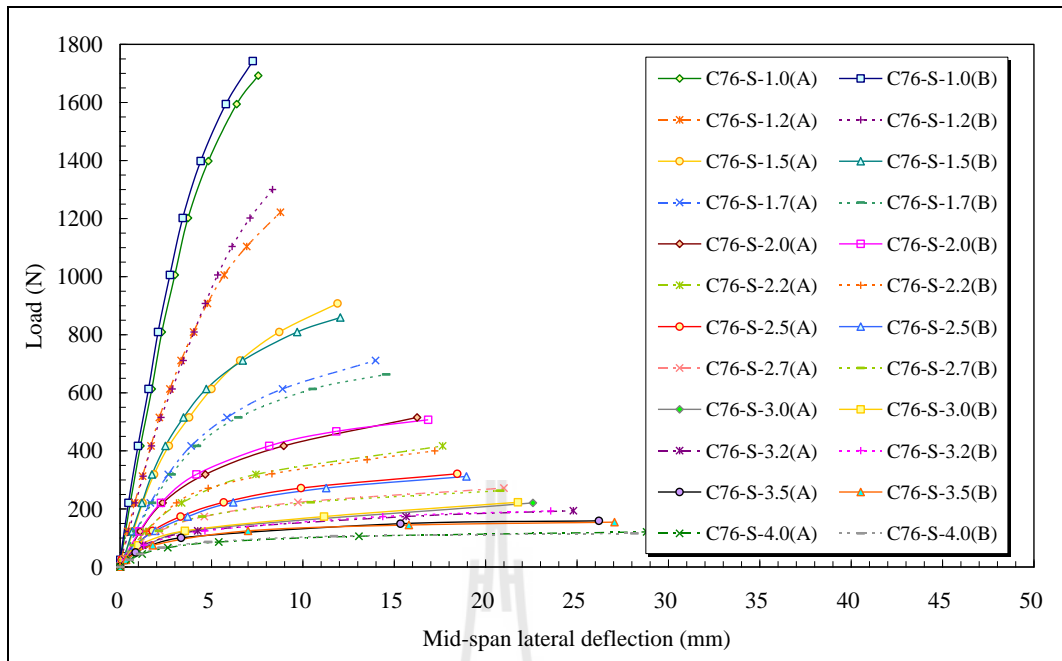
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



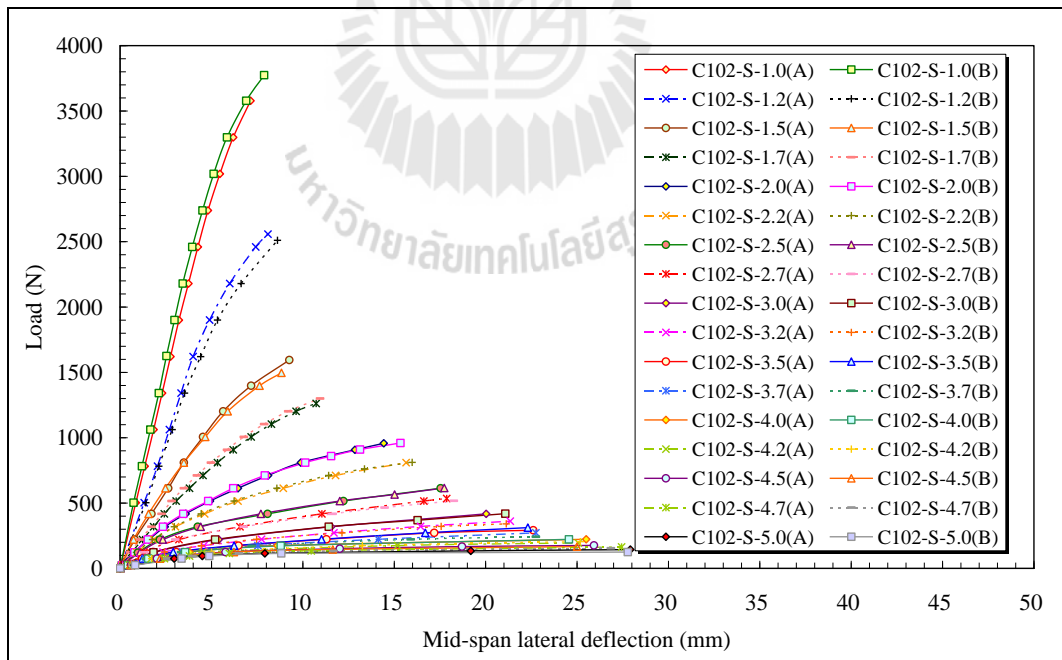
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



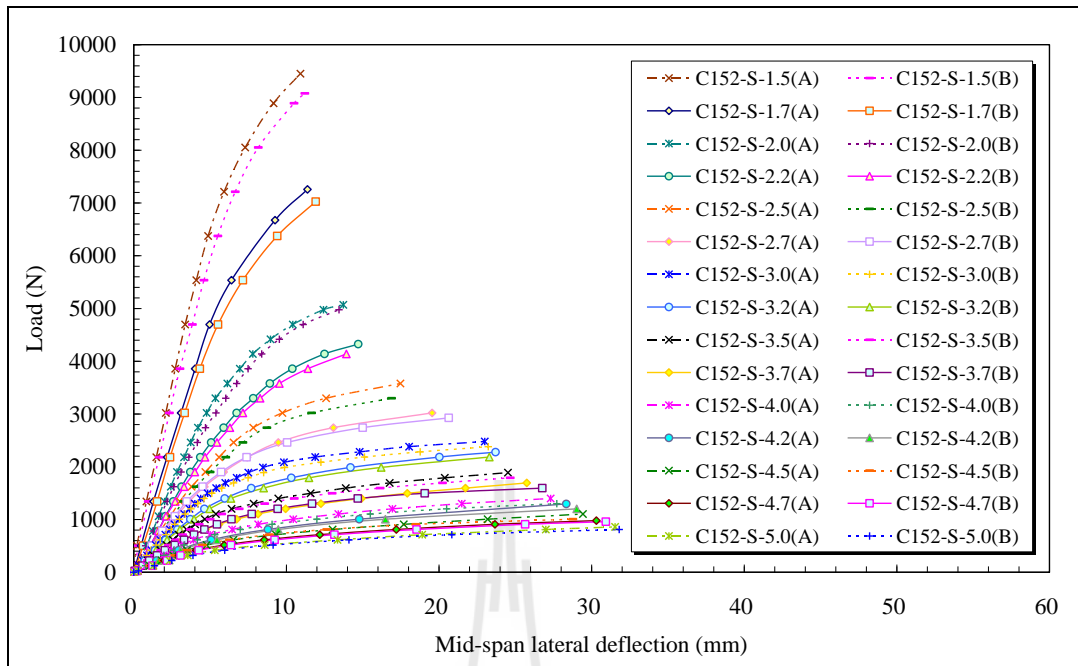
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



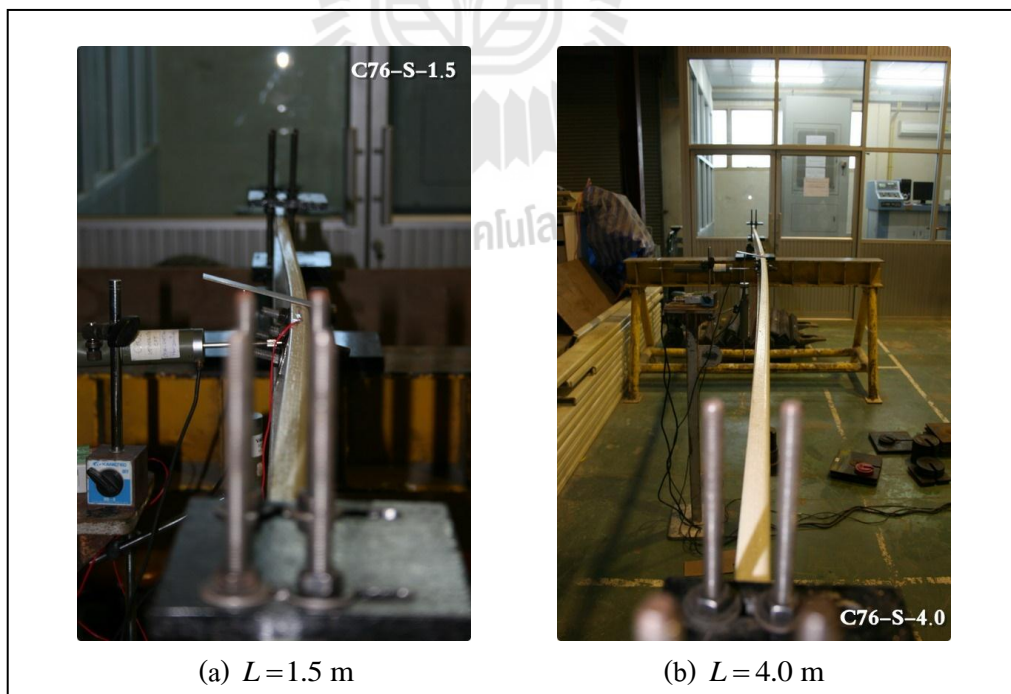
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



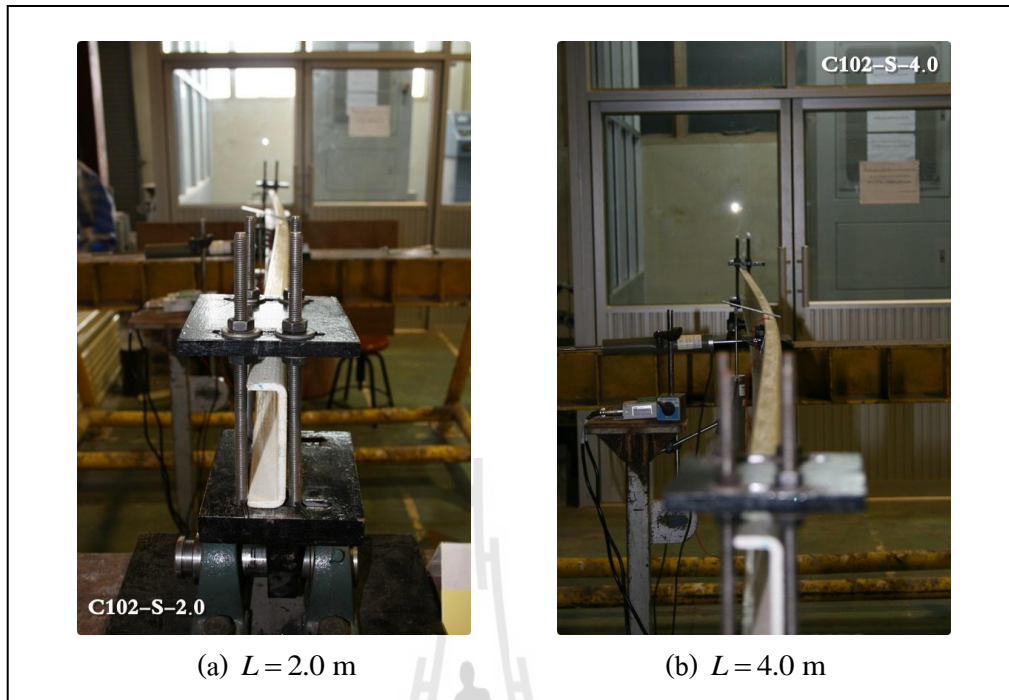
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



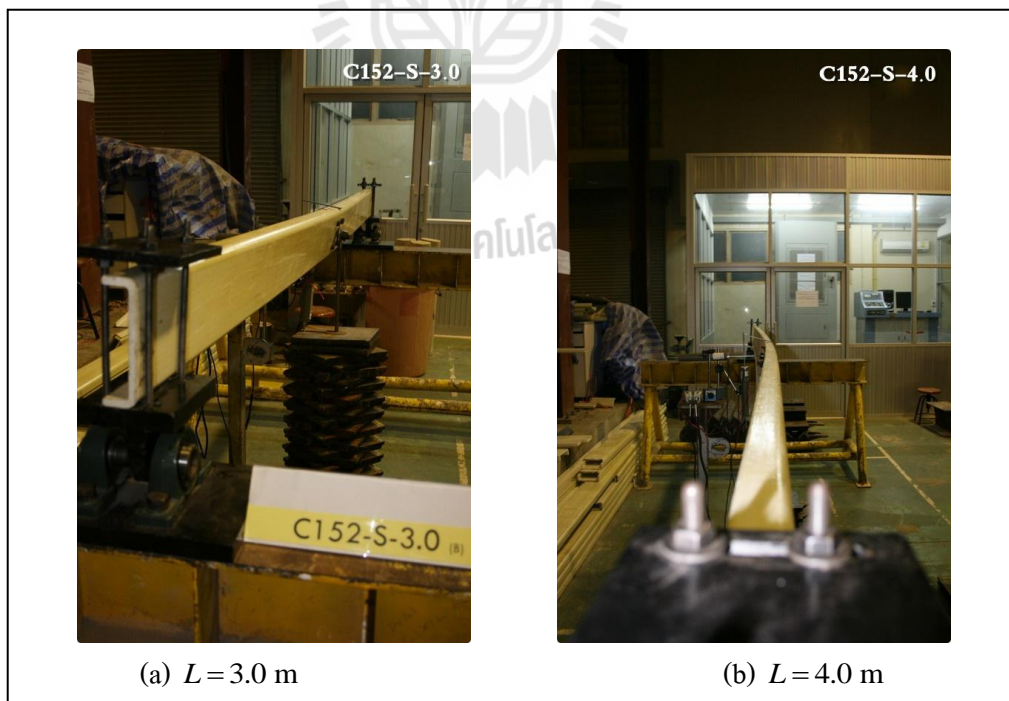
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.22 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.23 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.24 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบง่ายสำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

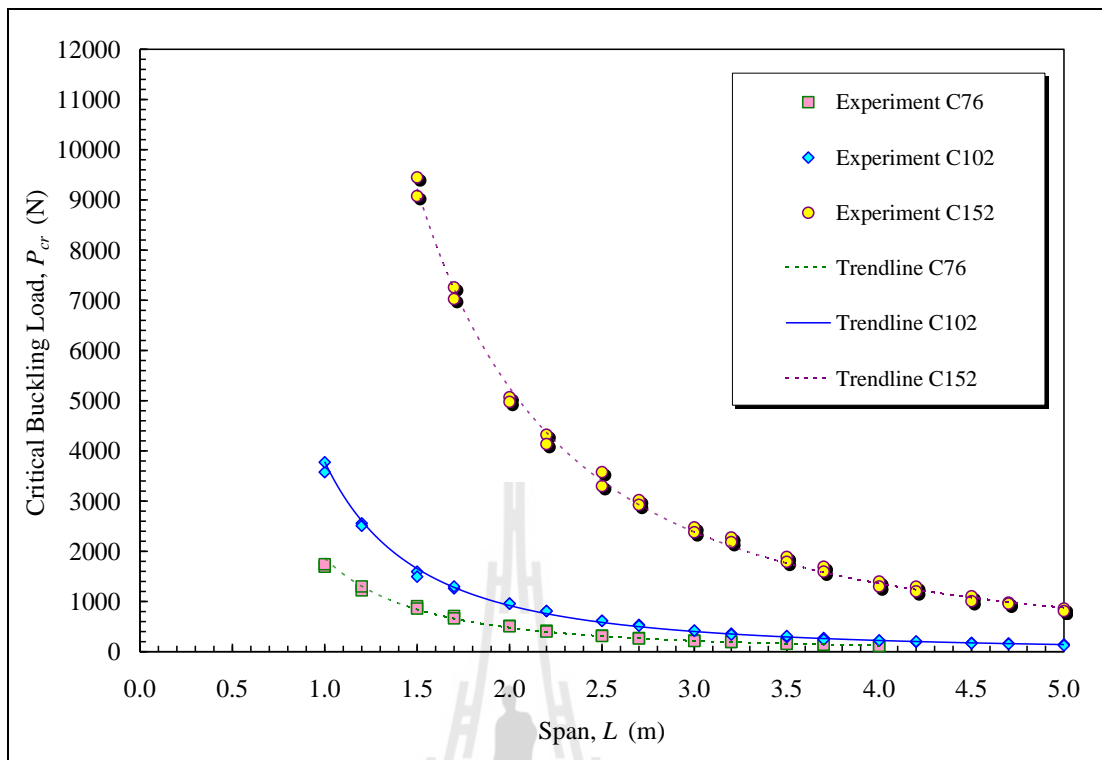
| Specimens | Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm) | L (m) | Experiment | | |
|-----------|---|----------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| | | | Test A $P_{cr,A}$ (N) | Test B $P_{cr,B}$ (N) | Average $P_{cr,EXP}$ (N) |
| 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 4.8 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 4.9 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 |

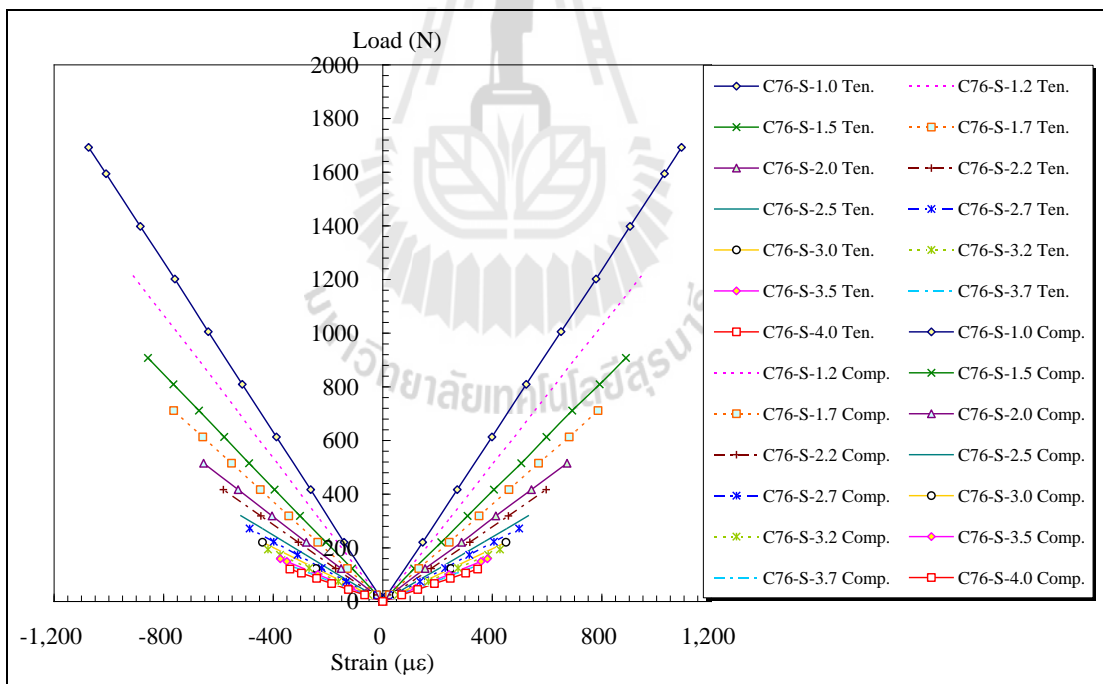


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

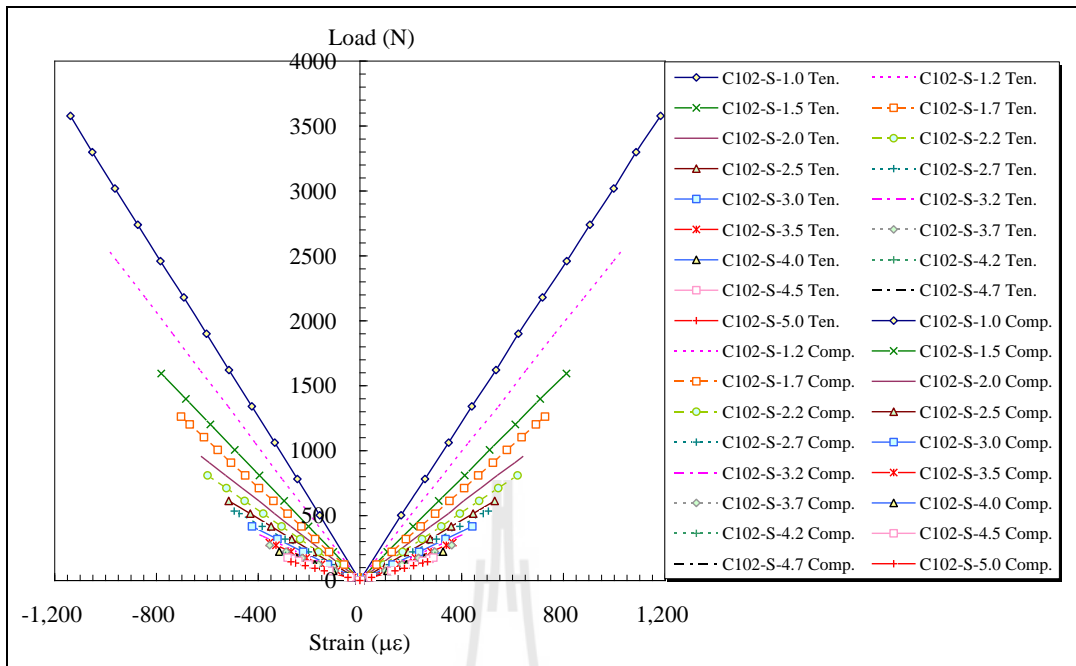
4.3.3 ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ในงานวิจัยนี้ มาตรการวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว ได้ถูกติดตั้งตามแนวแกนบริเวณส่วนของปีกบน (top flange) และปีกล่าง (bottom flange) ของตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซีเพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงคด โดยความเครียดเชิงอัด (compressive strain) ที่บันทึกจากปีกบนของหน้าตัดมีค่าเป็นลบ ในตรงกันข้าม ความเครียดเชิงดึง (tensile strain) ที่บันทึกจากปีกล่างของหน้าตัดมีค่าเป็นบวก

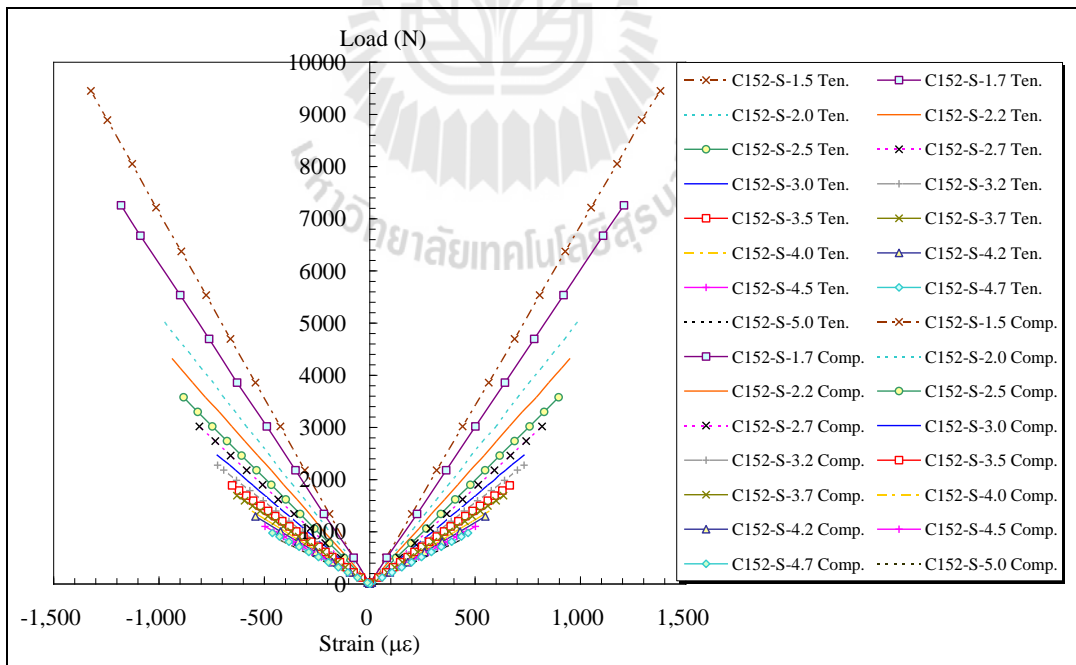
รูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ระหว่าง $500-1,200 \mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงคดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

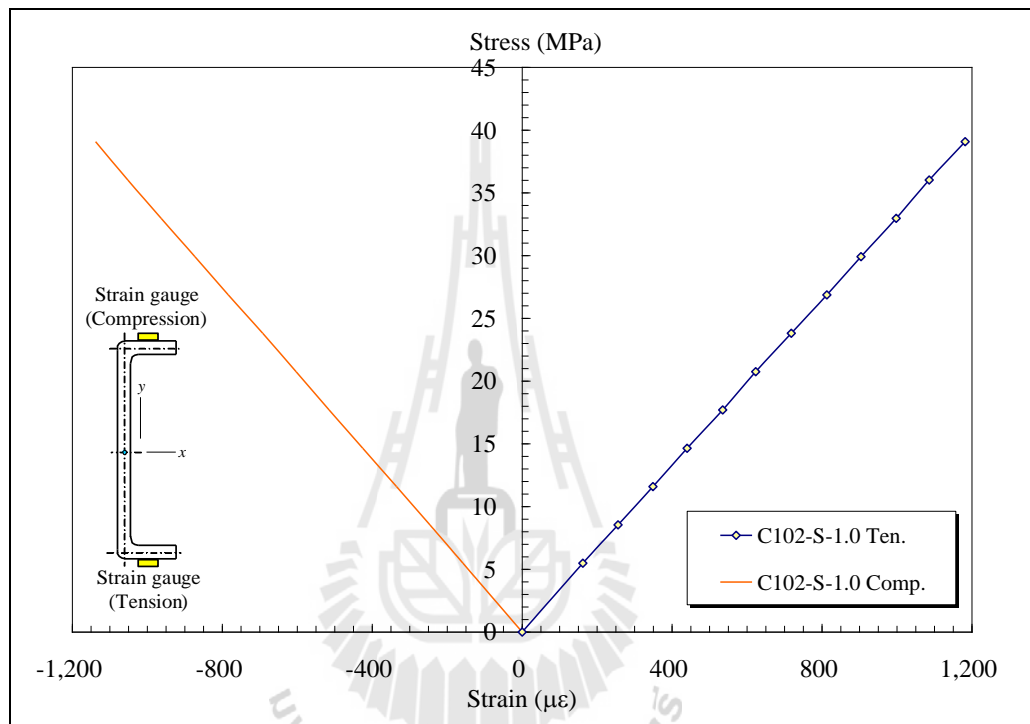


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

รูปที่ 4.29 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.1 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.4 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย

สำหรับคานที่มีจูดรองรับแบบง่ายภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้ ($P_{cr,EXP}$) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP}L/4 \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน FRP ที่มีจูดรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.4) จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ 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 โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม คานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.88-0.99 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ 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 4.11 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและสมการ 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 4.12 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

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

| 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 |

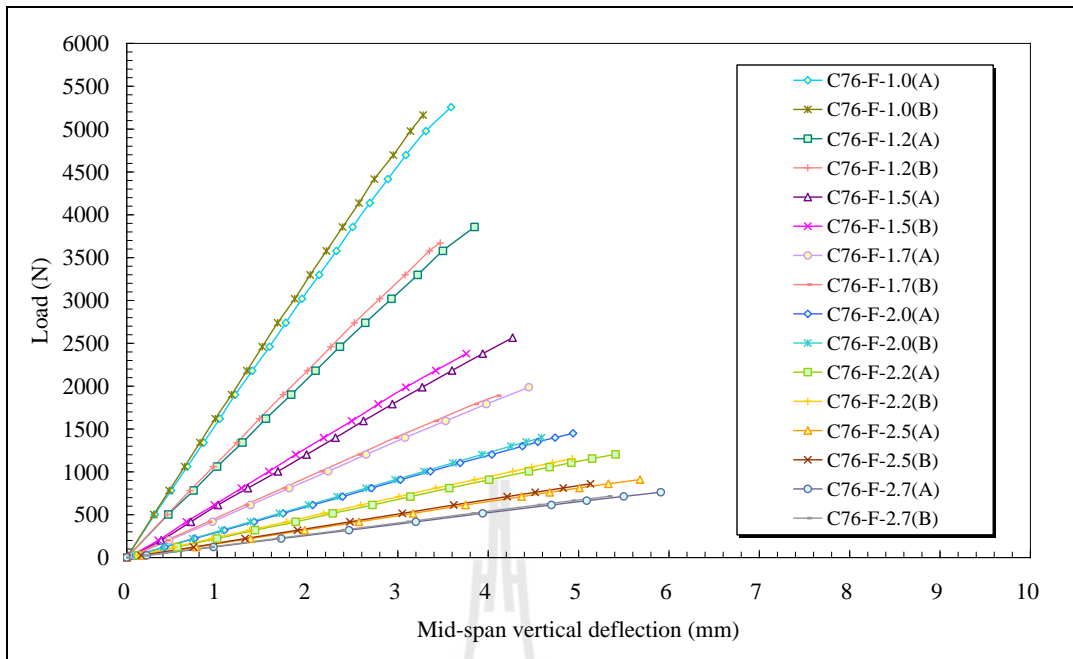
4.4 คาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

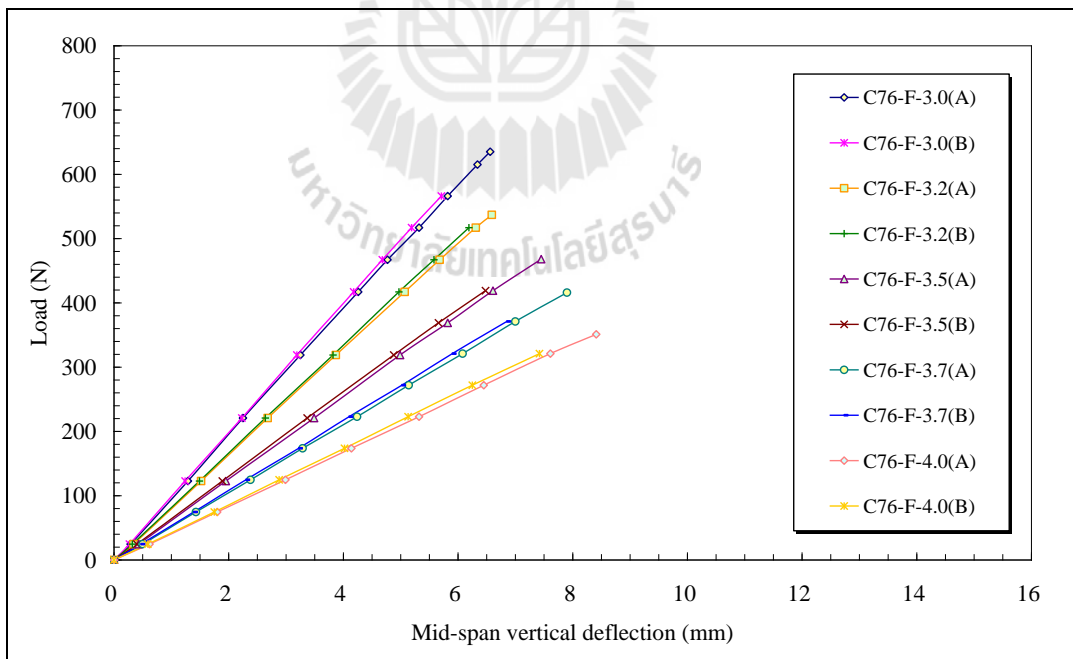
รูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวตั้ง รูปที่ 4.36 ถึงรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

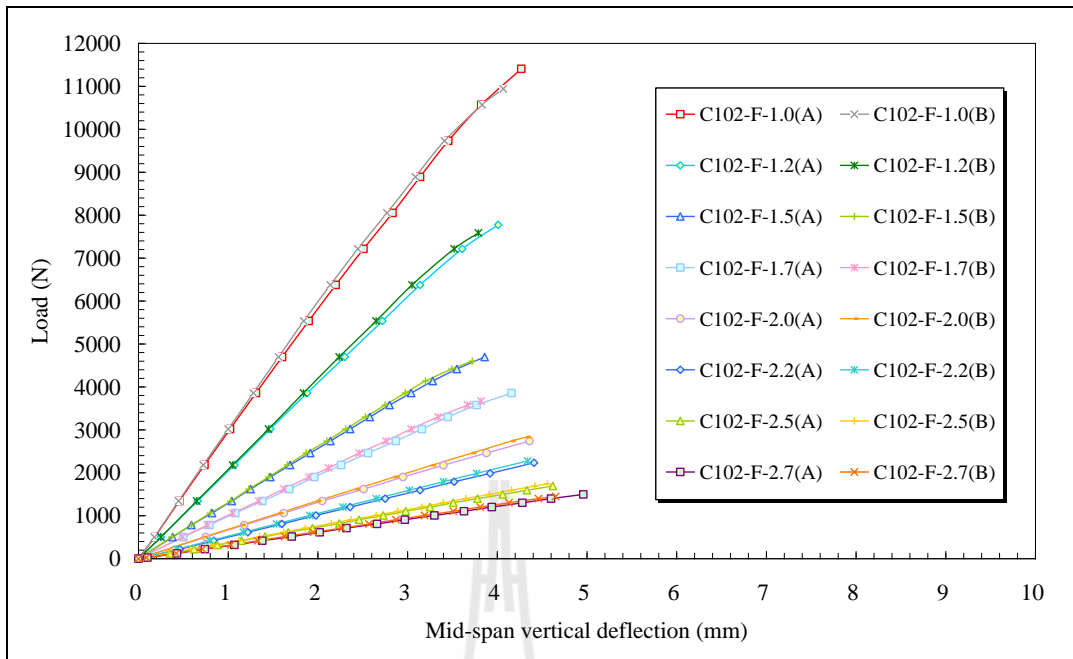
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีจุดรองรับยึดแน่นมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างในกลุ่มนี้แตกต่างจากลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบง่าย กล่าวคือ บริเวณจุดรองรับถึงจุดดัดกลับ (inflection point) หรือความยาวประมาณ $L/6$ จากจุดรองรับทั้งสองด้านจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ค่อนข้างน้อย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.39 ถึงรูปที่ 4.41 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน CFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



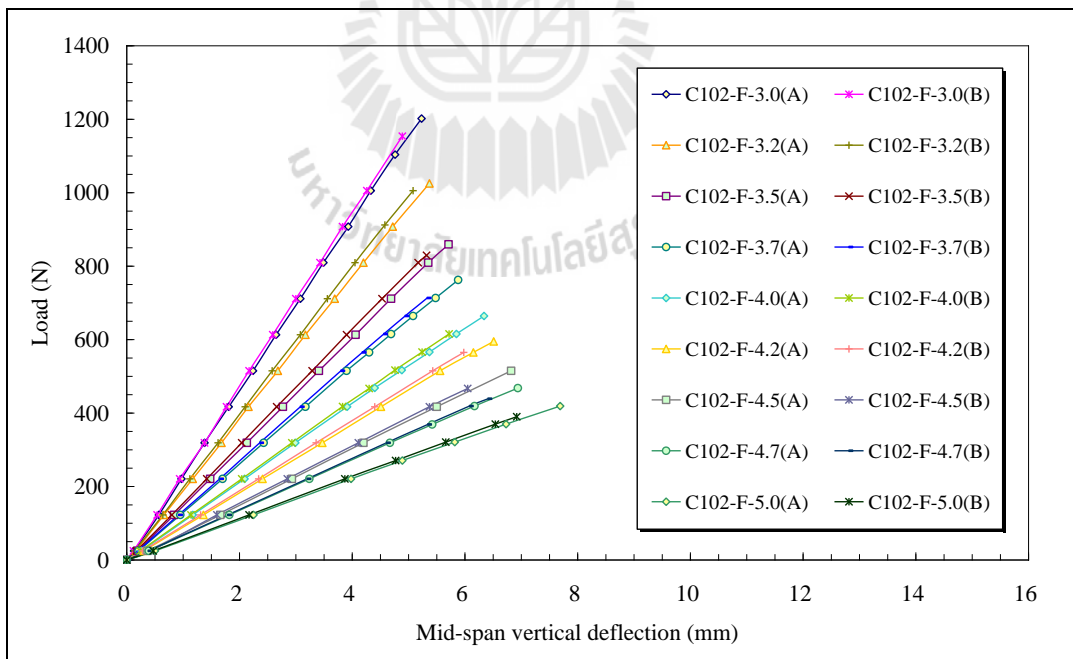
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



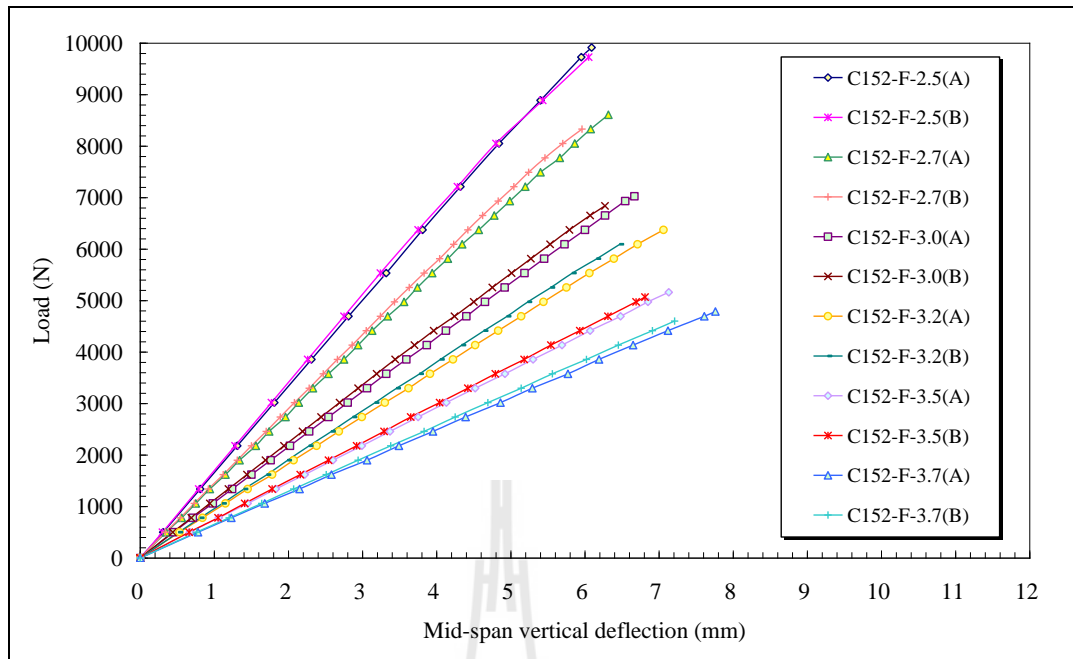
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



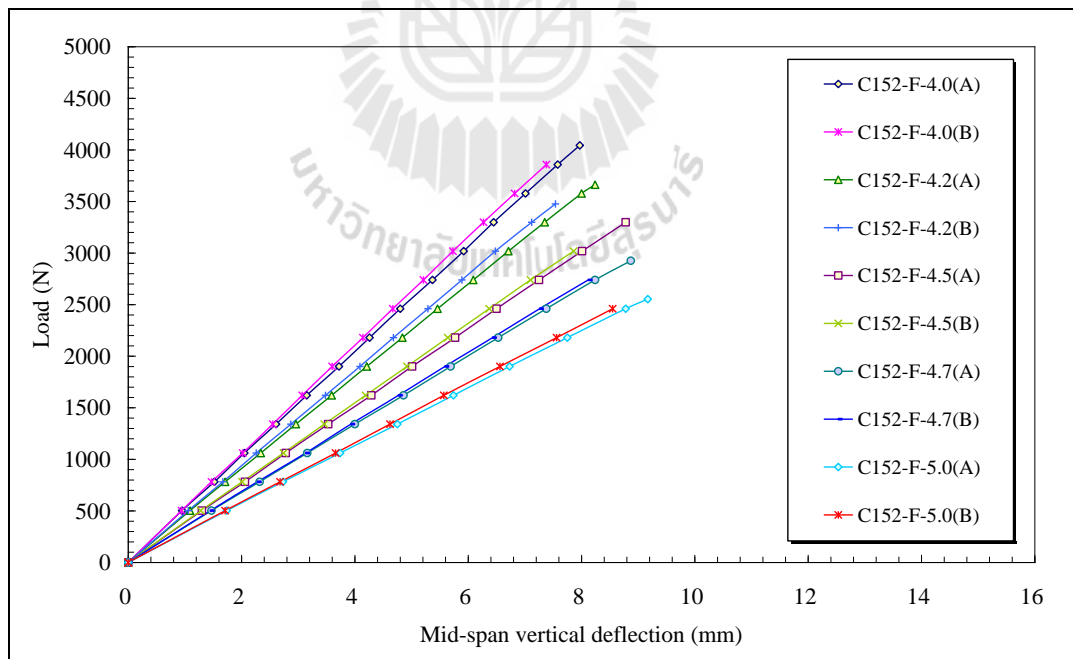
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด 102×29×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



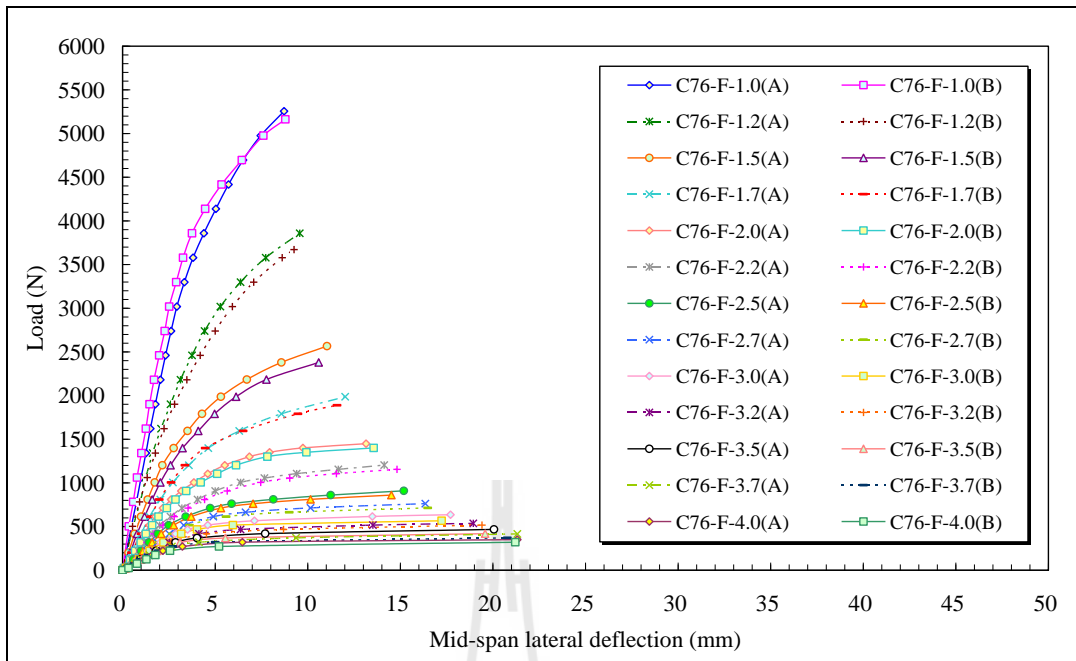
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด 102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



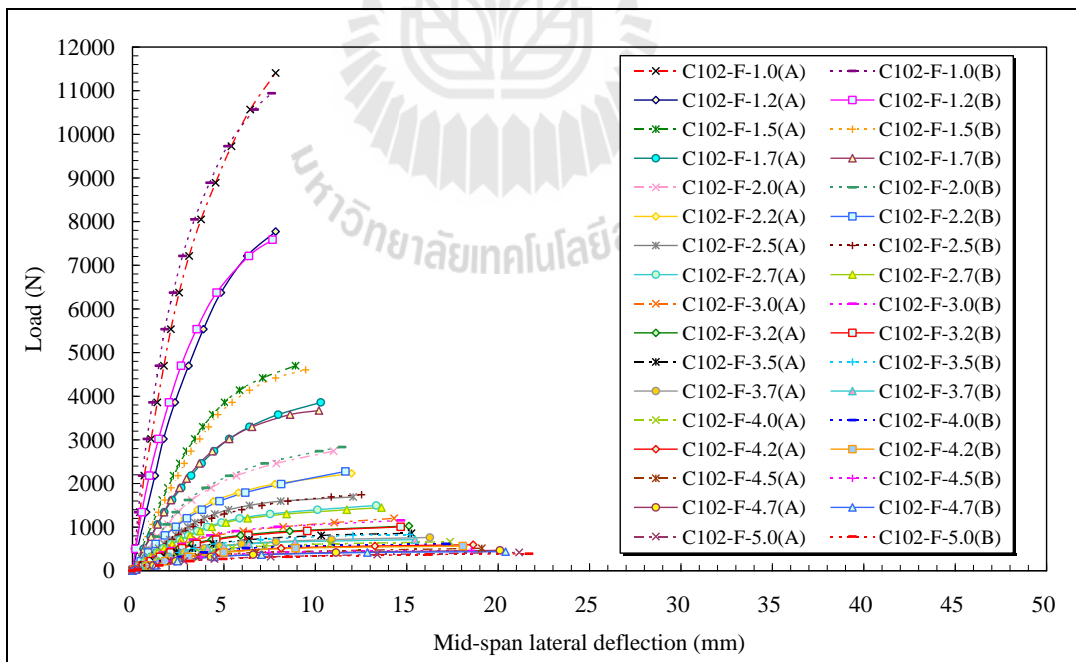
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง
ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



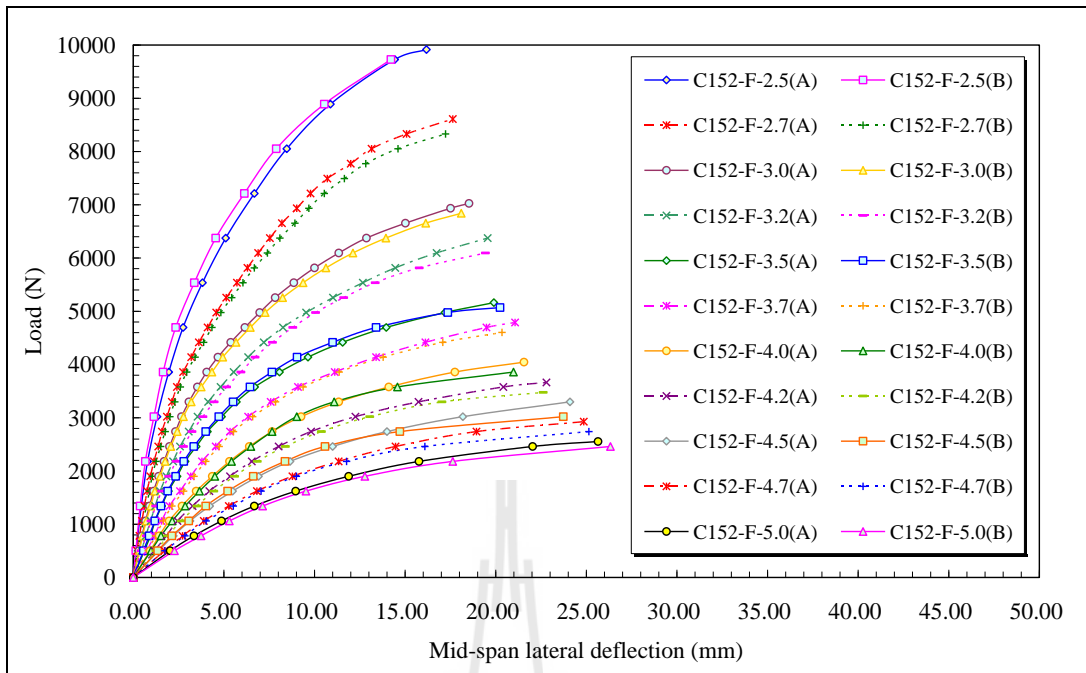
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง
ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



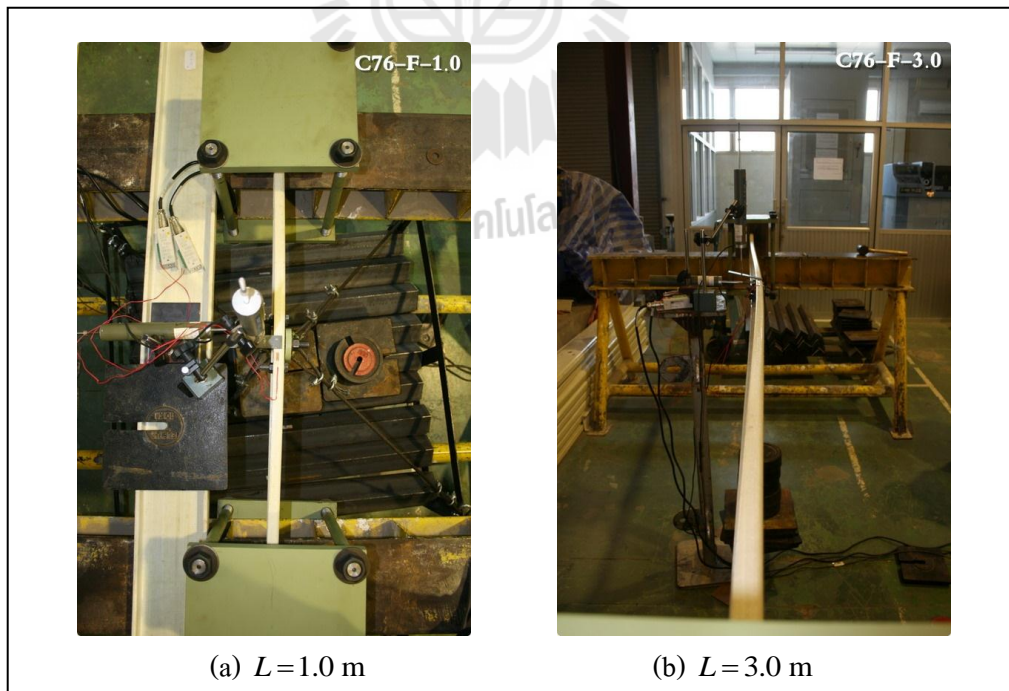
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



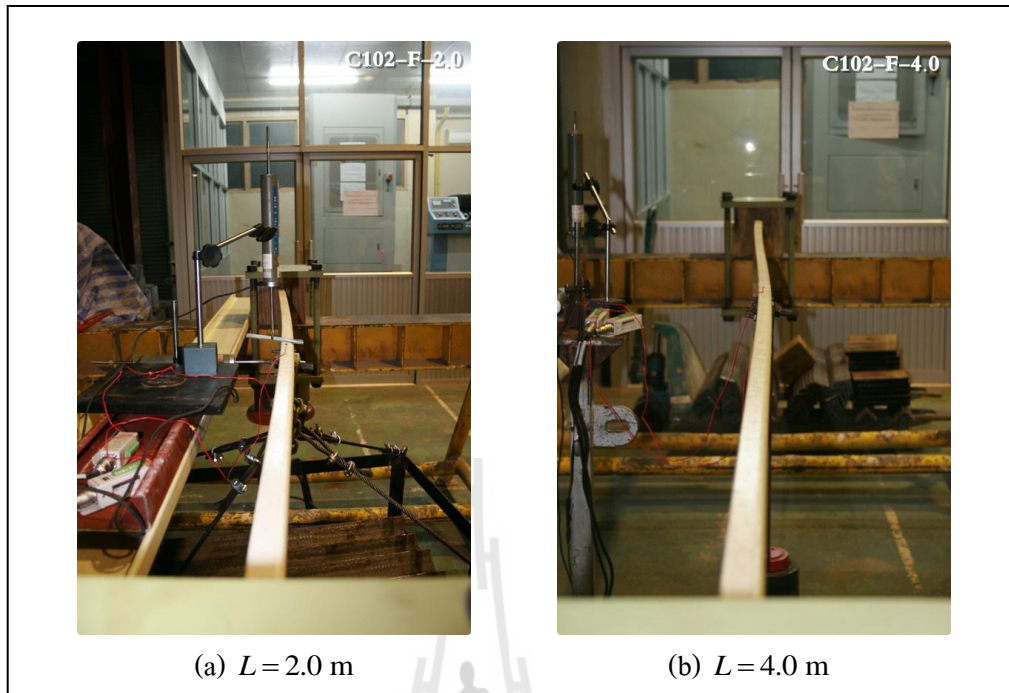
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



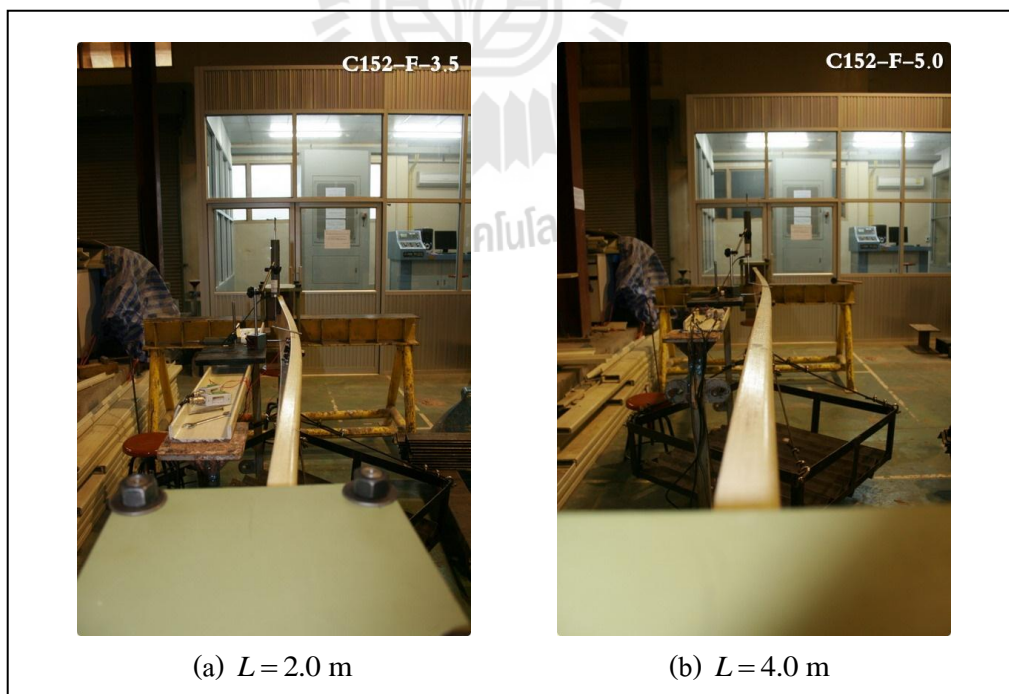
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.39 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.40 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.41 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นสำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้ พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

| 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-F-1.0 | $76 \times 22 \times 6$ | 1.0 | 5255.5 | 5162.3 | 5208.9 |
| C76-F-1.2 | $76 \times 22 \times 6$ | 1.2 | 3857.5 | 3671.1 | 3764.3 |
| C76-F-1.5 | $76 \times 22 \times 6$ | 1.5 | 2565.4 | 2379.0 | 2472.2 |
| C76-F-1.7 | $76 \times 22 \times 6$ | 1.7 | 1986.6 | 1888.5 | 1937.6 |
| C76-F-2.0 | $76 \times 22 \times 6$ | 2.0 | 1449.0 | 1399.9 | 1424.5 |
| C76-F-2.2 | $76 \times 22 \times 6$ | 2.2 | 1203.8 | 1154.7 | 1179.3 |
| C76-F-2.5 | $76 \times 22 \times 6$ | 2.5 | 909.5 | 860.4 | 885.0 |
| C76-F-2.7 | $76 \times 22 \times 6$ | 2.7 | 762.3 | 713.2 | 737.8 |
| C76-F-3.0 | $76 \times 22 \times 6$ | 3.0 | 635.2 | 566.1 | 600.7 |
| C76-F-3.2 | $76 \times 22 \times 6$ | 3.2 | 537.0 | 517.0 | 527.0 |
| C76-F-3.5 | $76 \times 22 \times 6$ | 3.5 | 468.0 | 418.9 | 443.5 |
| C76-F-3.7 | $76 \times 22 \times 6$ | 3.7 | 416.0 | 371.0 | 393.5 |
| C76-F-4.0 | $76 \times 22 \times 6$ | 4.0 | 351.0 | 321.0 | 336.0 |

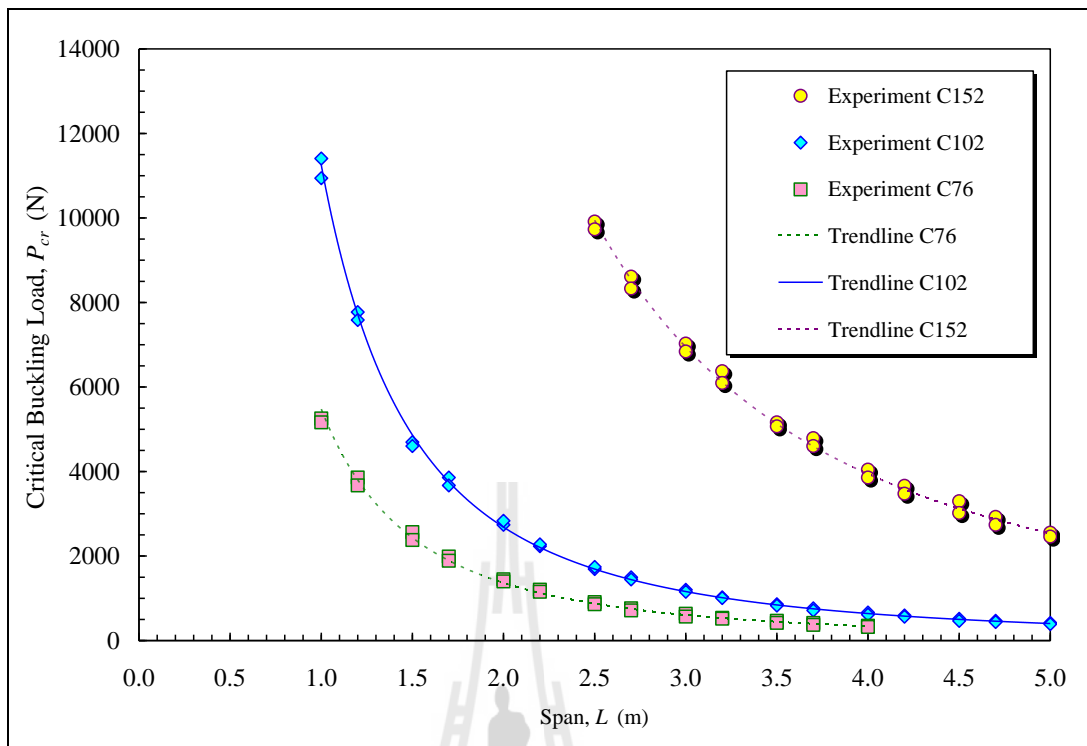
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

| 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-F-1.0 | $102 \times 29 \times 6$ | 1.0 | 11406.7 | 10940.7 | 11173.7 |
| C102-F-1.2 | $102 \times 29 \times 6$ | 1.2 | 7771.9 | 7585.5 | 7678.7 |
| C102-F-1.5 | $102 \times 29 \times 6$ | 1.5 | 4696.3 | 4602.4 | 4649.4 |
| C102-F-1.7 | $102 \times 29 \times 6$ | 1.7 | 3857.5 | 3671.1 | 3764.3 |
| C102-F-2.0 | $102 \times 29 \times 6$ | 2.0 | 2739.1 | 2832.9 | 2786.0 |
| C102-F-2.2 | $102 \times 29 \times 6$ | 2.2 | 2232.8 | 2276.0 | 2254.4 |
| C102-F-2.5 | $102 \times 29 \times 6$ | 2.5 | 1692.3 | 1742.3 | 1717.3 |
| C102-F-2.7 | $102 \times 29 \times 6$ | 2.7 | 1496.1 | 1448.0 | 1472.1 |
| C102-F-3.0 | $102 \times 29 \times 6$ | 3.0 | 1201.8 | 1153.7 | 1177.8 |
| C102-F-3.2 | $102 \times 29 \times 6$ | 3.2 | 1025.2 | 1005.6 | 1015.4 |
| C102-F-3.5 | $102 \times 29 \times 6$ | 3.5 | 859.2 | 829.4 | 844.3 |
| C102-F-3.7 | $102 \times 29 \times 6$ | 3.7 | 762.4 | 713.3 | 737.9 |
| C102-F-4.0 | $102 \times 29 \times 6$ | 4.0 | 664.3 | 615.2 | 639.8 |
| C102-F-4.2 | $102 \times 29 \times 6$ | 4.2 | 595.1 | 565.1 | 580.1 |
| C102-F-4.5 | $102 \times 29 \times 6$ | 4.5 | 515.1 | 467.0 | 491.1 |
| C102-F-4.7 | $102 \times 29 \times 6$ | 4.7 | 468.0 | 438.9 | 453.5 |
| C102-F-5.0 | $102 \times 29 \times 6$ | 5.0 | 419.0 | 389.9 | 404.5 |

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

| 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-F-2.5 | $152 \times 43 \times 10$ | 2.5 | 9915.5 | 9729.1 | 9822.3 |
| C152-F-2.7 | $152 \times 43 \times 10$ | 2.7 | 8610.7 | 8331.1 | 8470.9 |
| C152-F-3.0 | $152 \times 43 \times 10$ | 3.0 | 7026.3 | 6839.9 | 6933.1 |
| C152-F-3.2 | $152 \times 43 \times 10$ | 3.2 | 6373.9 | 6094.3 | 6234.1 |
| C152-F-3.5 | $152 \times 43 \times 10$ | 3.5 | 5162.3 | 5069.1 | 5115.7 |
| C152-F-3.7 | $152 \times 43 \times 10$ | 3.7 | 4789.5 | 4603.1 | 4696.3 |
| C152-F-4.0 | $152 \times 43 \times 10$ | 4.0 | 4043.9 | 3857.5 | 3950.7 |
| C152-F-4.2 | $152 \times 43 \times 10$ | 4.2 | 3662.1 | 3475.7 | 3568.9 |
| C152-F-4.5 | $152 \times 43 \times 10$ | 4.5 | 3298.3 | 3018.7 | 3158.5 |
| C152-F-4.7 | $152 \times 43 \times 10$ | 4.7 | 2925.5 | 2739.1 | 2832.3 |
| C152-F-5.0 | $152 \times 43 \times 10$ | 5.0 | 2552.7 | 2459.5 | 2506.1 |





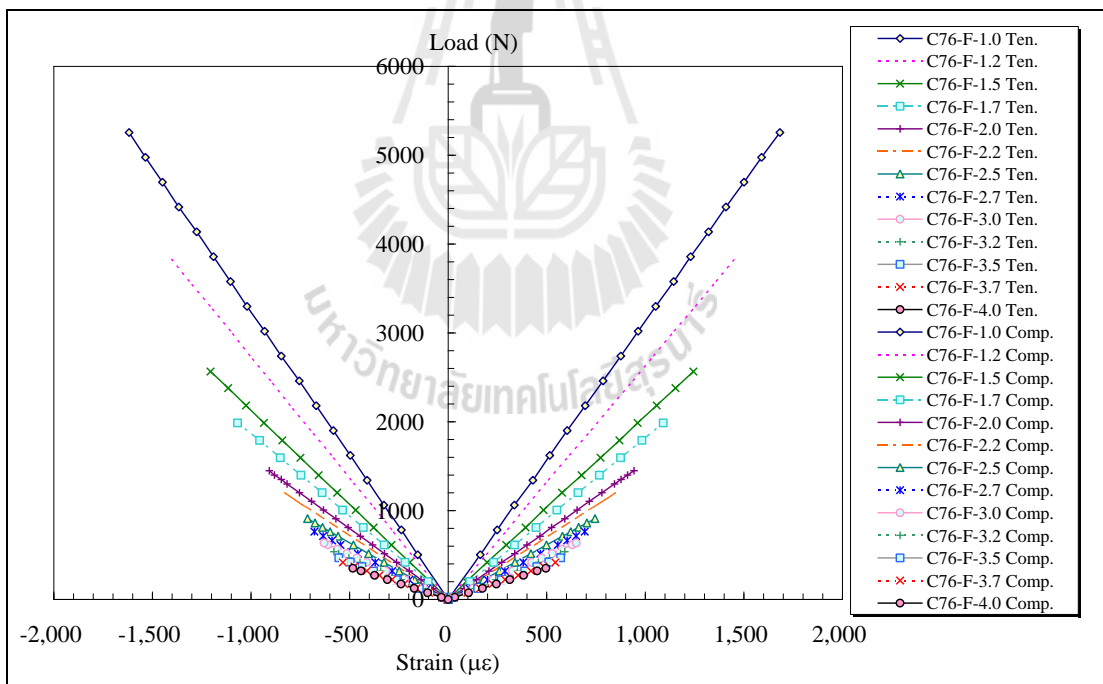
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก โกงเดาะและความยาวของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



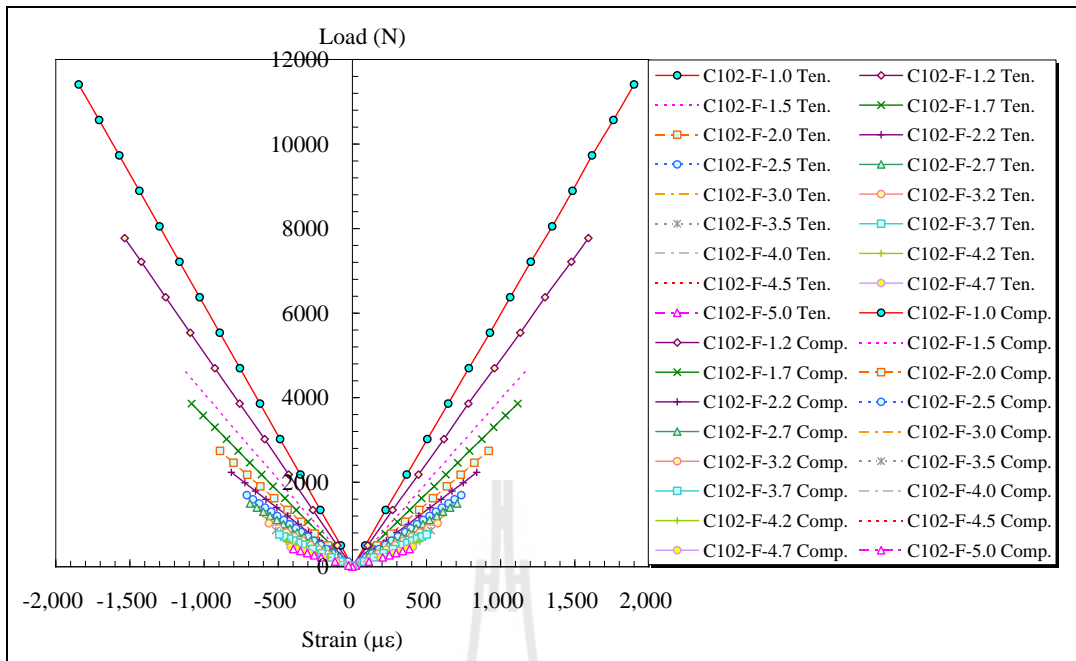
4.4.3 ความเครียดของคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

งานวิจัยนี้ มาตรฐานวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว ได้ถูกติดตั้งตามแนวแกนบริเวณส่วนของปีกบน (top flange) และปีกล่าง (bottom flange) ของตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซี เพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด โดยความเครียดเชิงอัด (compressive strain) ที่บันทึกจากปีกบนของหน้าตัดมีค่าเป็นลบ ในตรงกันข้าม ความเครียดเชิงดึง (tensile strain) ที่บันทึกจากปีกล่างของหน้าตัดมีค่าเป็นบวก

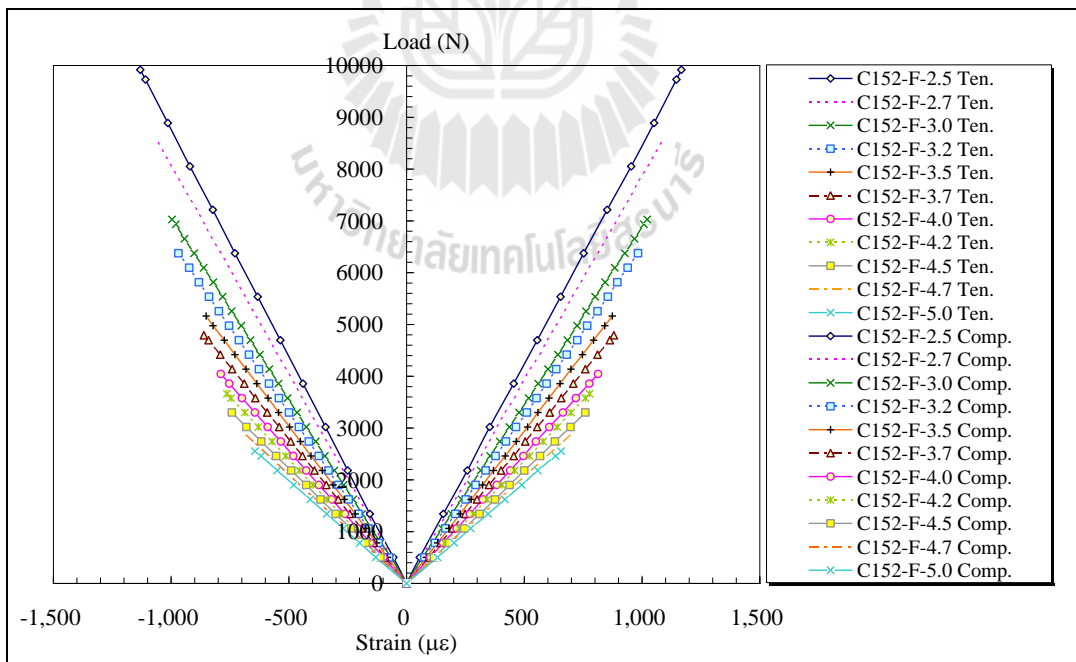
รูปที่ 4.43 ถึงรูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าประมาณ 500-2,000 $\mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

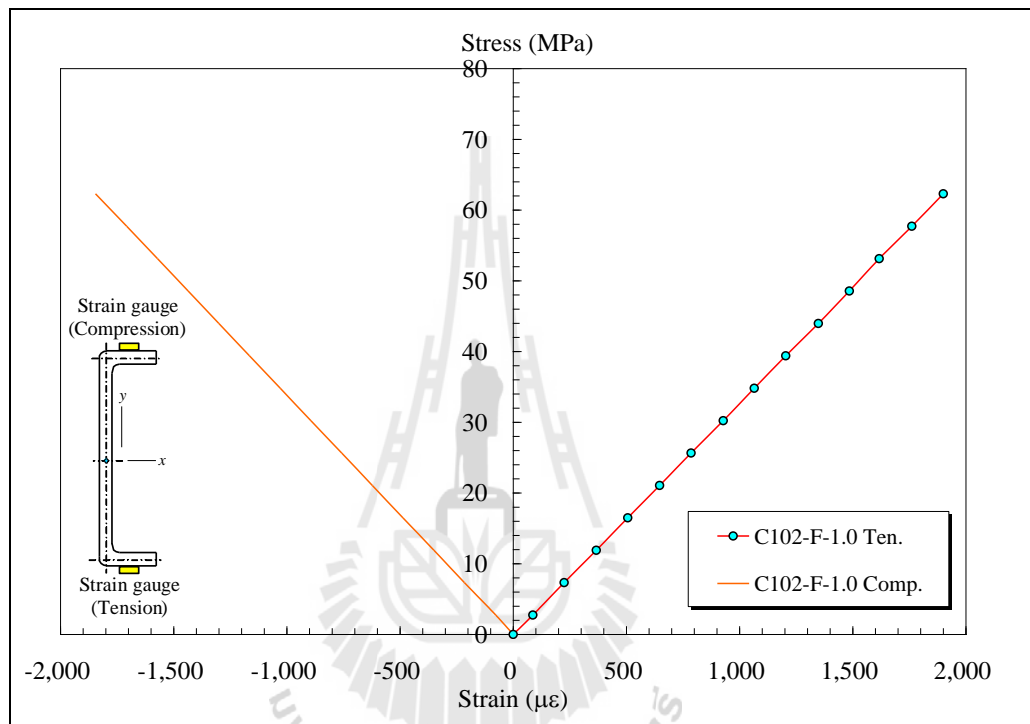


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

รูปที่ 4.46 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.6 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 4.46 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.4 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้ ($P_{cr,EXP}$) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.2)

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP}L/8 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.16 ถึงตารางที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.4) จากตารางพบว่า หากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.86-1.03 สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97-1.03 แสดงให้เห็นว่า โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย ในทางตรงกันข้าม คานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.86-0.97 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

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

| 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-F-1.0 | 13.2 | 656.9 | 645.3 | 651.1 | 757.0 | 0.86 |
| C76-F-1.2 | 15.8 | 578.6 | 550.7 | 564.6 | 626.0 | 0.90 |
| C76-F-1.5 | 19.7 | 481.0 | 446.1 | 463.5 | 487.6 | 0.95 |
| C76-F-1.7 | 22.4 | 422.2 | 401.3 | 411.7 | 421.1 | 0.98 |
| C76-F-2.0 | 26.3 | 362.3 | 350.0 | 356.1 | 350.2 | 1.02 |
| C76-F-2.2 | 28.9 | 331.0 | 317.5 | 324.3 | 315.1 | 1.03 |
| C76-F-2.5 | 32.9 | 284.2 | 268.9 | 276.5 | 274.2 | 1.01 |
| C76-F-2.7 | 35.5 | 257.3 | 240.7 | 249.0 | 252.5 | 0.99 |
| C76-F-3.0 | 39.5 | 238.2 | 212.3 | 225.2 | 225.8 | 1.00 |
| C76-F-3.2 | 42.1 | 214.8 | 206.8 | 210.8 | 210.9 | 1.00 |
| C76-F-3.5 | 46.1 | 204.8 | 183.3 | 194.0 | 192.1 | 1.01 |
| C76-F-3.7 | 48.7 | 192.4 | 171.6 | 182.0 | 181.3 | 1.00 |
| C76-F-4.0 | 52.6 | 175.5 | 160.5 | 168.0 | 167.3 | 1.00 |

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

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

| 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-F-1.0 | 9.8 | 1425.8 | 1367.6 | 1396.7 | 1596.0 | 0.88 |
| C102-F-1.2 | 11.8 | 1165.8 | 1137.8 | 1151.8 | 1268.0 | 0.91 |
| C102-F-1.5 | 14.7 | 880.6 | 863.0 | 871.8 | 982.0 | 0.89 |
| C102-F-1.7 | 16.7 | 819.7 | 780.1 | 799.9 | 858.0 | 0.93 |
| C102-F-2.0 | 19.6 | 684.8 | 708.2 | 696.5 | 718.7 | 0.97 |
| C102-F-2.2 | 21.6 | 614.0 | 625.9 | 620.0 | 636.2 | 0.97 |
| C102-F-2.5 | 24.5 | 528.8 | 544.5 | 536.7 | 543.2 | 0.99 |
| C102-F-2.7 | 26.5 | 504.9 | 488.7 | 496.8 | 495.2 | 1.00 |
| C102-F-3.0 | 29.4 | 450.7 | 432.6 | 441.7 | 437.6 | 1.01 |
| C102-F-3.2 | 31.4 | 410.1 | 402.2 | 406.2 | 406.3 | 1.00 |
| C102-F-3.5 | 34.3 | 375.9 | 362.9 | 369.4 | 367.1 | 1.01 |
| C102-F-3.7 | 36.3 | 352.6 | 329.9 | 341.3 | 345.0 | 0.99 |
| C102-F-4.0 | 39.2 | 332.2 | 307.6 | 319.9 | 316.6 | 1.01 |
| C102-F-4.2 | 41.2 | 312.4 | 296.7 | 304.6 | 300.1 | 1.01 |
| C102-F-4.5 | 44.1 | 289.7 | 262.7 | 276.2 | 278.5 | 0.99 |
| C102-F-4.7 | 46.1 | 275.0 | 257.9 | 266.4 | 265.8 | 1.00 |
| C102-F-5.0 | 49.0 | 261.9 | 243.7 | 252.8 | 248.8 | 1.02 |

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD
ของคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

| 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-F-2.5 | 16.4 | 3098.6 | 3040.3 | 3069.5 | 3515.8 | 0.87 |
| C152-F-2.7 | 17.8 | 2906.1 | 2811.7 | 2858.9 | 3180.0 | 0.90 |
| C152-F-3.0 | 19.7 | 2634.9 | 2565.0 | 2599.9 | 2782.6 | 0.93 |
| C152-F-3.2 | 21.1 | 2549.6 | 2437.7 | 2493.6 | 2569.4 | 0.97 |
| C152-F-3.5 | 23.0 | 2258.5 | 2217.7 | 2238.1 | 2305.6 | 0.97 |
| C152-F-3.7 | 24.3 | 2215.1 | 2128.9 | 2172.0 | 2158.6 | 1.01 |
| C152-F-4.0 | 26.3 | 2022.0 | 1928.8 | 1975.4 | 1971.0 | 1.00 |
| C152-F-4.2 | 27.6 | 1922.6 | 1824.7 | 1873.7 | 1863.5 | 1.01 |
| C152-F-4.5 | 29.6 | 1855.3 | 1698.0 | 1776.7 | 1723.2 | 1.03 |
| C152-F-4.7 | 30.9 | 1718.7 | 1609.2 | 1664.0 | 1641.1 | 1.01 |
| C152-F-5.0 | 32.9 | 1595.4 | 1537.2 | 1566.3 | 1532.0 | 1.02 |



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบ Pultrusion และลักษณะการวิบัติของวัสดุ และเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคด โดยมีสภาวะของจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จุดรองรับแบบง่าย (simply supported) และจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

5.2 สรุปผลทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบ Pultrusion

วัสดุ FRP ที่ใช้ในการศึกษามีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับวัสดุ FRP ที่ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion โดยหน่วยแรงคดประลัยมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดของวัสดุ FRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วสูงถึง 72.2% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังส่งผลให้หน่วยแรงคดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ

หน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยมีค่าน้อยกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRP ที่ใช้มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้วจะเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตด้อยคุณภาพ ในทางเดียวกันจึงส่งผลให้หน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้โมดูลัส

ยึดหยุ่นเชิงเดือนตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเดือน โดยวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ ส่งผลให้หน่วยแรงเดือนมีค่าต่ำกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion

5.2.2 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด

พฤติกรรมรับแรงกระทำของคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่นมีลักษณะคล้ายคลึงกันภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด

สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยึดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ นอกจากนี้ น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของลักษณะการวิบัติ ตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น มีลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) โดยเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน และจากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

5.2.3 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่นภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อความยาวของคานเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น โดยโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LRFD ประมาณ 5-10% โดยมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM (initial crookedness) และความแปรปรวนของวัสดุ CFRP โดยเฉพาะตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน

การที่วัสดุ FRP มีหน่วยแรงคดประลัยที่ค่อนข้างสูงแต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การแอ่นตัวของโครงสร้างควบคุมการออกแบบโครงสร้าง FRP เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ FRP กับของเหล็กโครงสร้างแล้ว เห็นได้ว่าวัสดุ FRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กโครงสร้าง 6.7 เท่า ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างวัสดุ FRP ควรมีการตรวจสอบค่าหน่วยแรงเฉือน นอกจากนี้โมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ FRP ไม่สามารถคำนวณหาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง (ν) ในรูปของสมการ $G = 0.5 E/(1+\nu)$ ดังเช่นที่ใช้กับเหล็กโครงสร้าง

นอกจากนี้ ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปใช้งาน คือ สำหรับการออกแบบคานที่ความยาวต่ำ ตัวอย่างเช่น คานที่มีอัตราส่วน L/d ต่ำกว่า 20 ผู้ออกแบบควรลดกำลังโก่งเคาะที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LFRD ประมาณ 10% ตามที่เหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีข้อจำกัดอยู่มาก การนำผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการตลอดจนสมการออกแบบที่นำเสนอในการศึกษาครั้งนี้ไปใช้งานก่อสร้างจริงนั้น วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานต้องใช้วิจารณญาณ โดยคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ คุณภาพการก่อสร้าง ขนาดหน้าตัด ความยาวของคาน รวมทั้งลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยเป็นหลักด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบเชิงศูนย์ภายใต้แรงคด
- 2) ศึกษาแรงกระทำที่ตำแหน่ง (location) ต่าง ๆ ของหน้าตัด เช่น ปีกบน (top flange) และปีกล่าง (bottom flange) เพื่อให้ผลงานวิจัยต่อไปครอบคลุมถึงการใช้งานจริง
- 3) ศึกษาพฤติกรรมของคานประกอบหน้าตัดตัวซีคู่ภายใต้แรงคด โดยใช้สมการออกแบบของ LFRD ในงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐาน
- 4) การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคด



รายการอ้างอิง

- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2542). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุใยแก้วเสริมพลาสติก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5. หน้า MAT-202-MAT-207, ชลบุรี, 24-26 มีนาคม 2542.
- 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. (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. (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. (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. (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., 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.
- Barbero, E.J., and Raftoyiannis, I.G. (1994). Lateral and distortional buckling of pultruded I-beams. **Composite Structures**. 27(3): 261-268.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- Ministry of Commerce. (2011). **Trade Summary of Thailand** [On-line]. Available: <http://www2.ops2.moc.go.th/menucomen/>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tosh, M.W., and Kelly, D.W. (2001). Fibre steering for a composite C-beam. **Composite Structures**. 53(2): 133-141.
- 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.





ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

ก.1 วารสารวิชาการระดับนานาชาติ

- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2012). **Experimental evaluation on fixed end supported PFRP channel beams and LRFD approach.** Applied Mechanics and Materials, Vol.105-107, pp. 1671-1676. (doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.105-107.1671)
- Seangatith, S. and Thumrongvut, J. (2011). **Experimental investigation on simply supported PFRP channel beams subjected to three-point loading.** Advanced Materials Research, Vol.335-336, pp. 1321-1326. (doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321)
- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2011). **On the structural responses of simply supported PFRP channel beams under three-point loading.** International Journal of Civil & Environmental Engineering, Vol.11 No.4, pp.13-17.
- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2011). **Responses of PFRP cantilevered channel beams under tip point loads.** Key Engineering Materials, Vol. 471-472, pp. 578-583. (doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578)

ก.2 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2011). **Experimental study on lateral-torsional buckling of PFRP cantilevered channel beams.** The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong Special Administrative Region, China, January 26-28, Procedia Engineering, Vol.14, pp. 2438-2445. (doi:10.1016/j.proeng.2011.07.306)

ก.3 การประชุมวิชาการระดับชาติ

- Thumrongvut, J. and Seangatith, S. (2011). **Flexural-torsional buckling behaviors of simply supported PFRP channel beams subjected to three-point loading.** The 16th National Convention on Civil Engineering, Chonburi, May 18-20, (CD-Rom)

ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ-สกุล นายสิทธิชัย แสงอาทิตย์
Mr. Sittichai Seangatith
2. ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์
3. สถานที่ติดต่อ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
E-mail: sitichai@sut.ac.th
4. ประวัติการศึกษา
Ph.D. in Civil Engineering (1997), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA
M.Eng. in Civil Engineering (1993), University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA
B.Eng. in Civil Engineering (1990), Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand
5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญ
Structural Engineering - Experimental and Applied Mechanics on Civil Engineering Fiber Reinforced Plastic Composite Materials and Structures, Reinforced Concrete, Masonry, and Steel. Finite Element Analysis.
6. ผลงานทางวิชาการ (ย้อนหลัง 3 ปี 2552-2554)
 - 6.1 บทความวิจัย
 1. หวังแก้ว บุญสวน สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และสงวน วงษ์ชวลิตกุล “พฤติกรรมและคุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพลาทูดที่ผลิตในประเทศไทยภายใต้การอัด การเหือน และการตัด,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 4 หน้า 1625-1632.
 2. จักขดา ชำรงวุฒิ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน “TUBED CONCRETE COLUMN หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าและสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ,” การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552. เล่มที่ 6 หน้า 1931-1937.
 3. Duangjaras, C., Seangatith, S. and Apichatvullop, A., “Failure Characteristics of Full Depth Precast Slabs with Loop Joints,” The Fourteenth National Convention on Civil Engineering, Nakhon Ratchasima, Thailand, May 13-15, 2009. Vol. 6, pp. 2275-2279.

4. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Experimental Investigation on Square Steel Tubed RC Columns under Axial Compression," Suranaree Journal of Science and Technology, Vol. 16, No. 3, July-September 2009, pp. 205-220.
5. จักษดา ชำรงวุฒิ วรรณ คำลือ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และวินัย มณีรัตน์ "การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูป," การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, สมาคมคอนกรีตไทย, นครราชสีมา, 20-22 ตุลาคม 2552. paper no. STR-07. (in CD-Rom format)
6. Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvut, J. and Sukprasert, S., "Axial Compressive Capacity of Circular Steel Tubed Concrete Specimens Preconfined with Steel Jackets," The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2010), Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Royal Mekong Nongkhai Hotel, Nong Khai, March 4-6, 2010, paper A3_005. (Best paper presentation award)
7. ชูสิทธิ์ อู๋ยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และศาสน์ สุขประเสริฐ "การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 15, อุบลราชธานี, 12-14 พฤษภาคม 2553. paper no. STR-41. (in CD-Rom format)
8. Seangatith, S., "Experimental Study on PFRP Box Columns with Different Supports under Axial Compression," The Third International Conference Advanced Composite Materials Engineering (COMAT2010), Transylvania University of Brasov, Brasov, Romania, October 27-29, 2010.
9. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., "Behaviors of Square Thin-walled Steel Tubed RC Columns under Direct Axial Compression on RC Core," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 513–520 doi:10.1016/j.proeng.2011.07.064)
10. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Experimental Study on Lateral-Torsional Buckling of PFRP Cantilevered Channel Beams," The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), Hong Kong SAR, China, January 26-28, 2011. (Procedia Engineering 14 (2011) 2438–2445 doi:10.1016/j.proeng. 2011.07.306)

11. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Responses of PFRP Cantilevered Channel Beams under Tip Point Loads," Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 471-472 (Composite Science and Technology), February 2011, pp. 578-583. (doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.578)
12. นันทิกา นามวิจิตร สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ "พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก," วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, ปีที่ 4, ฉบับที่ 1, มกราคม-มิถุนายน 2554, หน้า 1-15
13. ชุติพร อู๋ยืนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และศาสน์ สุขประเสริฐ "พฤติกรรม การรับแรงอัดของคอนกรีตหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0053. (in CD-Rom format)
14. นันทพร กาญจนวัฒน์นางศ์และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ "ผลของเรซินและมวลรวมละเอียดต่อ พฤติกรรมรับแรงอัดของพอลิเอสเตอร์พอลิเมอร์คอนกรีต," การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. MAT-0069. (in CD-Rom format)
15. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Flexural-Torsional Buckling Behaviors of Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading," The Sixteenth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Chonburi, Thailand, May 18-20, 2011. paper no. STR-0078. (in CD-Rom format)
16. กรรณ คำลือ จักษดา ชำรงวุฒิ และสิทธิชัย แสงอาทิตย์ "การตรวจสอบคานคอนกรีตอัดแรง สำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 16, พัทยา ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554. paper no. STR-0079. (in CD-Rom format)
17. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "On the Structural Responses of Simply Supported PFRP Channel Beams under Three-point Loading," International Journal of Civil & Environmental Engineering, IJENS Publishers, Vol. 11, No. 04, August 2011, pp. 13-17.
18. Thumrongvut, J. and Seangatith, S., "Experimental Evaluation on Fixed End Supported PFRP Channel Beams and LRFD Approach," Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 105-107 (Vibration, Structural Engineering and

Measurement I), September 2011, pp. 1671-1676. (doi:10.4028/ www.scientific.net/ AMM.105-107.1671)

19. Seangatith, S. and Thumrongvut, J., “Experimental Investigation on Simply Supported PFRP Channel Beams Subjected to Three-point Loading,” *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 335-336 (Advanced Materials and Structures), September 2011, pp. 1321-1326. (doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.335-336.1321).

6.2 บทความทั่วไป

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “สิ่งที่นักศึกษาใหม่ควร “รู้” บนพื้นฐานของอัตลักษณ์ มทส.,” เรียนอย่าง Smile ใน มทส., วีรพงษ์ พลนิกรกิจ บรรณาธิการ, พิมพ์ครั้งที่ 8 ฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, พ.ศ. 2552, หน้า 1-20.
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “ตัวบ่งชี้การประกันคุณภาพการศึกษาและภาวะการเป็นมหาวิทยาลัยในกำกับของรัฐ,” วารสาร สอ. ประเทศไทย (ASAIHL-Thailand Journal), สมาคมสถาบันการศึกษาขั้นอุดมแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย, ปีที่ 12, ฉบับที่ 2, พฤศจิกายน 2552, หน้า 66-78 และ 60-65.

6.3 รายงานวิจัย

1. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จั๊กชดา ชำรงวุฒิ และกรรม คำลือ, “การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูปที่ถูกเสริมกำลังด้วยเหล็กเสริมสั้น,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552. (แหล่งทุน: บริษัท ไทย แมค ฟรีแคชท์ จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)
2. สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จั๊กชดา ชำรงวุฒิ และกรรม คำลือ, “การทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง,” รายงานการวิจัย, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554. (แหล่งทุน: บริษัท เอส-คอนคอนกรีต จำกัด, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 50%)
3. สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตและเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกห่อหุ้มด้วยปลอกเหล็กและถูกโอบรัดก่อนภายใต้แรงอัดในแนวแกน,” รายงานการวิจัย หมายเลข SUT7-712-52-24-63, สถาบันวิจัยและพัฒนา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2554. (แหล่งทุน: สำนักงานงบประมาณ โดยการพิจารณาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, สัดส่วนที่ทำงานวิจัย 100%)

6.4 ตำราและเอกสารคำสอน

1. เอกสารคำสอนวิชา Engineering Statics

2. ตำราวิชา Mechanics of Materials
3. เอกสารคำสอนวิชา Material Testing
4. คู่มือปฏิบัติการวิชา Material Testing
5. เอกสารคำสอนวิชา Theory of Structures
6. ตำราวิชา Structural Analysis
7. เอกสารคำสอนวิชา Structural Steel Design
8. เอกสารคำสอนวิชา Advanced Mechanics of Materials (ภาษาอังกฤษ)
9. ตำราวิชา Advanced Theory of Structures

