

การวิเคราะห์และทดสอบลักษณะเฉพาะของพลาสติกเสริมเส้นใย
แบบพัลทรีดหน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงดัด

นายจักษดา ชำรงวุฒิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL
CHARACTERIZATION OF PULTRUDED
FIBER-REINFORCED PLASTIC
CHANNEL SECTION UNDER FLEXURE**

Jaksada Thumrongvut

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy of Engineering in Civil Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การวิเคราะห์และทดสอบลักษณะเฉพาะของพลาสติกเสริมเส้นใย
แบบพอลิพรอสเทอโรนภายใต้แรงดัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ศ. ดร.สุชนันต์ หอพิบูลสุข)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.สงวน วงษ์ชาติกุล)

กรรมการ

(ผศ. ดร.มงคล จิรวรรณ)

กรรมการ

(อ. ดร.ทงศักดิ์ พิศาลสิน)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

จักษดา ชำรงวุฒิ : การวิเคราะห์และทดสอบลักษณะเฉพาะของพลาสติกเสริมเส้นใย
แบบพัลทูดหน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด (ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL
CHARACTERIZATION OF PULTRUDED FIBER-REINFORCED PLASTIC
CHANNEL SECTION UNDER FLEXURE) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 290 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP หน้าตัดรูปร่าง
ภายใต้แรงดัดโดยมีสถานะของจูดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จูดรองรับแบบคานยื่น จูดรองรับแบบง่าย
และจูดรองรับแบบยึดแน่น คาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในศึกษาประกอบด้วยเส้นใยแก้วชนิด
E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และผลิตโดยวิธี Pultrusion ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่
76×22×6 102×29×6 และ 152×43×10 mm โดยมีอัตราส่วน L/d อยู่ในช่วงระหว่าง 5-53 คาน FRP
จำนวน 244 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อศึกษาผลของความยาวต่อการตอบสนองทางโครงสร้าง
และโมเมนต์โก่งเคาะของคาน จากนั้น โมเมนต์โก่งเคาะของตัวอย่างคานที่ทดสอบได้ถูกนำมา
เปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LFRD และผลการวิเคราะห์จากวิธีไฟไนต์
อีลิเมนต์

จากผลการทดสอบโดยรวมพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและระยะ
การแอ่นตัวแนวตั้งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรม
การรับแรงด้านข้าง โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเคาะ
จากนั้น ความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นแบบการโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิด โมเมนต์โก่งเคาะ
ที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน L/d มีค่าลดลง นอกจากนี้ สมการออกแบบของ LFRD สามารถ
ทำนายโมเมนต์โก่งเคาะของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ และจากการเปรียบเทียบผลการแอ่นตัว
แนวตั้งที่ได้จากการทดสอบและจากการคำนวณโดยทฤษฎีคานของ Timoshenko พบว่า ผลการ
ทดสอบและทฤษฎีดังกล่าวมีค่าสอดคล้องกัน ดังนั้น ภายใต้ช่วงใช้งานทฤษฎีคานของ Timoshenko
มีความสำคัญสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบคาน FRP สุดท้าย โมเมนต์โก่งเคาะที่ได้จาก
การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ สมการออกแบบของ LFRD และผลการทดสอบมีค่า
ใกล้เคียงกันโดยความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

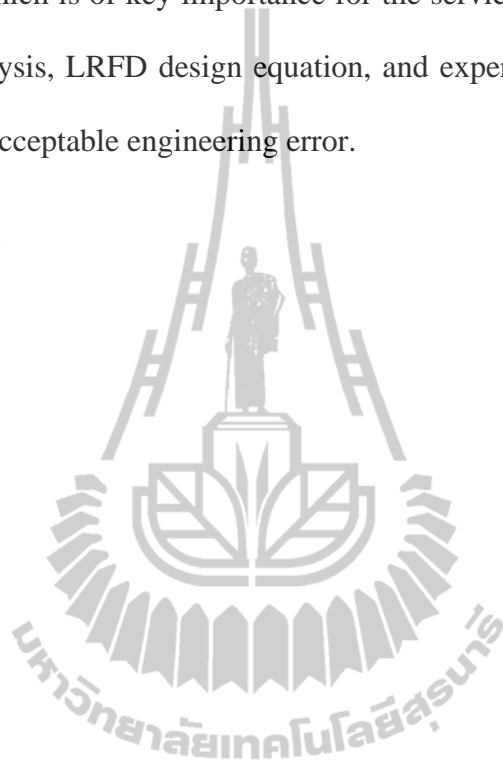
JAKSADA THUMRONGVUT : ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL
CHARACTERIZATION OF PULTRUDED FIBER-REINFORCED
PLASTIC CHANNEL SECTION UNDER FLEXURE. THESIS ADVISOR :
ASSOC. PROF. SITTICHAI SEANGATITH, Ph.D., 290 PP.

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

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; cantilever supported, 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 5 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 and analytical finite element results.

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. The general mode of failure is the lateral-torsional buckling. 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 predict the critical buckling moment of the PFRP

specimens. By comparing the obtained vertical deflection with those predicted by the Timoshenko's shear deformation beam equation, it was found that they are in good agreement. It is concluded that the Timoshenko's beam theory is especially important in PFRP beams, which is of key importance for the serviceability design. Finally, the finite element analysis, LRFD design equation, and experimental values are in good agreement within acceptable engineering error.



School of Civil Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

- รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาทั้งด้านวิชาการและการชี้แนะแนวทางในการดำรงชีวิต

- ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันต์ หอพิบูลสุข รองศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ อภิชาติวัลลภ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวรรณเดช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธิ์ ชินกุลกิจนิวัฒน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สนิทริอาจารย์ ดร.ทองศักดิ์ พิศาลสิน และคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา

- รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน วงษ์สวัสดิกุล อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยวงษ์สวัสดิกุล สำหรับการให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

- รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีกรีช หิรัญมาศ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการให้เกียรติเป็นกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์

- คุณฉัฐญา กิ่งโคกกรวด และคุณจริยาพร ศรีวิไลลักษณ์ ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับการติดต่อประสานงานต่าง ๆ

- คุณภรณ์ คำลือ คุณนันทิกานามวิจิตร คุณชุลีพร อู๋ยืนยงค์ และคุณหวังแก้ว บุญสวน เพื่อนร่วมเรียนระดับบัณฑิตศึกษาที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำโดยตลอด

- คุณวัฒนากร นิมอ่อง คุณจิโรจ เกตุเจริญผล และคุณไวยวูช ลักขณะะ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ร่วมมือทดสอบงานวิจัยสำเร็จไปด้วยดี

- ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย และศูนย์เครื่องมือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับสถานที่ดำเนินงานวิจัย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติ ๆ ทุกคนที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรมและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความสามารถ มีจิตใจที่เข้มแข็งและช่วยเหลือตัวเองได้จนประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

จักษดา ชำรงวุฒิ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ย
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	10
1.3 สมมุติฐานการวิจัย.....	10
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	11
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	12
2 ปรัชญ่วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
2.1 บทนำ.....	13
2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion.....	13
2.2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP.....	13
2.2.2 ประวัติความเป็นมาและการใช้งานวัสดุ PFRP.....	16
2.2.3 วัตถุประสงค์และส่วนประกอบของวัสดุ PFRP.....	19
2.2.3.1 เส้นใยแก้ว.....	19
2.2.3.2 เรซิน.....	22
2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ PFRP.....	24
2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ PFRP.....	25

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด	31
2.3.1	การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ โดยวิธี AISC/LRFD.....	34
2.3.2.1	คานหน้าตัดอัดแน่น	36
2.3.2.2	คานหน้าตัดไม่อัดแน่น.....	41
2.3.2	การโค้งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ	42
2.3.3	สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด ของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน.....	45
2.3.4	สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด ของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน PFRP	45
2.3.5	การโค้งตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดสำหรับวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด	48
2.4	การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด.....	52
2.5	การวิเคราะห์คานและชิ้นส่วนวัสดุ PFRP โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	65
2.5.1	ลักษณะโดยทั่วไปของวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	65
2.5.2	โปรแกรม ANSYS.....	66
2.5.3	การวิเคราะห์คานและชิ้นส่วนวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	66
2.6	สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	70
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	71
3.1	บทนำ.....	71
3.2	การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ PFRP	73
3.3	การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ.....	73
3.3.1	การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	การทดสอบกำลังรับแรงค้ดของคาน PFRP ที่มีจูดรองรับแบบง่าย.....	82
3.3.3	การทดสอบกำลังรับแรงค้ดของคาน PFRP ที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น	92
3.4	การวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ดของคาน PFRP หน้าค้ดรูปรงน้ำ โดยสมการออกแบบ	100
3.5	การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคาน PFRP โดยทฤษฎีคานของ Timoshenko	103
3.6	การวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ดของคาน PFRP หน้าค้ดรูปรงน้ำ โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์.....	104
4	ผลการศึกษาและอภิปรายผล.....	110
4.1	บทนำ.....	110
4.2	คาน PFRP หน้าค้ดรูปรงน้ำที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น.....	110
4.2.1	พฤติกรรมการรับแรงค้ดของคานที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น	110
4.2.2	น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น.....	114
4.2.3	การเปรียบเทียบระยการแอ่นตัวของคาน ที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น	119
4.2.4	การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้ กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคาน ที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น	121
4.2.5	ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ของคานที่มีจูดรองรับแบบคานอื่น.....	125
4.3	คาน PFRP หน้าค้ดรูปรงน้ำที่มีจูดรองรับแบบง่าย.....	136
4.3.1	พฤติกรรมการรับแรงค้ดของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย	136
4.3.2	น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย.....	143
4.3.3	ความเครียดของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย	147

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	149
4.3.5	การเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะที่ทดสอบ ได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	153
4.3.6	ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ของคาน ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	157
4.4	คาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	168
4.4.1	พฤติกรรมการรับแรงค้ำของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	168
4.4.2	น้ำหนักโค้งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	175
4.4.3	ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	179
4.4.4	การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคาน ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	181
4.4.5	การเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะที่ทดสอบ ได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	185
4.4.6	ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ของคาน ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	189
4.5	ผลของอัตราส่วน โมดูลัสต่อ โมเมนต์โค้งเดาะของคาน	200
5	สรุปผลงานวิจัย.....	202
5.1	บทนำ.....	202
5.2	สรุปผลทดสอบ.....	202
5.2.1	พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	202
5.2.2	พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น.....	202
5.2.3	ลักษณะการวิบัติคาน FRP	203

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.4	เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD	203
5.2.5	เปรียบเทียบสมการออกแบบคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ และการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	203
5.3	ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน	204
5.4	ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป	204
รายการอ้างอิง		205
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรอด	213
ภาคผนวก ข.	การคำนวณ โมดูลัสยืดหยุ่นและ โมดูลัสแรงเฉือน	259
ภาคผนวก ค.	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Eigenvalue Buckling	266
ภาคผนวก ง.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	279
ประวัติผู้เขียน		290

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ..... 20
2.2	คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์..... 23
2.3	คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล ของเหล็กรูปพรรณ ตามมาตรฐาน ASTM A36 30
2.4	ขีดจำกัดของอัตราส่วน b/t 35
2.5	ค่าสัมประสิทธิ์ α และระยะการแอ่นตัวสูงสุด..... 44
2.6	ค่าสัมประสิทธิ์ α และ β และระยะการแอ่นตัวสูงสุด 50
3.1	รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างนำของคาน FRP..... 74
3.2	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น 76
3.3	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น 76
3.4	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น 77
3.5	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 83
3.6	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 84
3.7	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 85
3.8	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 93
3.9	รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 94

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.10	รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	95
4.1	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	115
4.2	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	116
4.3	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	117
4.4	ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	122
4.5	ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	123
4.6	ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	124
4.7	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	131
4.8	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	132
4.9	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	133
4.10	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	143
4.11	ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	144

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย.....	145
4.13 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	154
4.14 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	155
4.15 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	156
4.16 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	163
4.17 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	164
4.18 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโค้งเดาะจากการวิเคราะห์ โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	165
4.19 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	175
4.20 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	176
4.21 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	177
4.22 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบ และสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	186

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.23	ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบ และสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 187
4.24	ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบ และสมการ LRFD ของคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 188
4.25	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 195
4.26	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 196
4.27	ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และสมการ LRFD ของคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 197
ก.1	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง 215
ก.2	ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด 218
ก.3	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่น และความถ่วงจำเพาะ 219
ก.4	ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ 222
ก.5	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ 223
ก.6	ผลทดสอบการดูดซึมน้ำและความชื้น 224
ก.7	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ 225
ก.8	ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด 228
ก.9	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 232
ก.10	ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP 235

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.11	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 237
ก.12	ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP 240
ก.13	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 241
ก.14	ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 245
ก.15	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย 247
ก.16	ผลทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย 250
ก.17	รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 252
ก.18	ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 258
ค.1	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดรูปรางน้ำ 274
ค.2	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดต่าง ๆ 275

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	สภาวะกีดกร่อนเนื่องจากสนิมในโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	1
1.2	โครงสร้างแปและชิ้นส่วน โครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปร่างน้ำ	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	Cooling tower ที่ทำจากวัสดุ FRP	17
2.4	การติดตั้งโครงข้อแข็งที่ทำจากวัสดุ FRP ระหว่างการก่อสร้าง	17
2.5	อาคาร Eyecatcher ที่ทำจากวัสดุ FRP	18
2.6	แบบจำลอง โครงสร้างแบบ 2 มิติของเส้นใยแก้ว	19
2.7	เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP	21
2.8	เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP	23
2.9	ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้ว โดยวิธี Pultrusion	24
2.10	หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion	25
2.11	การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน FRP	26
2.12	การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน FRP	27
2.13	การทดสอบแรงคดของชิ้นส่วน FRP	28
2.14	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน FRP	29
2.15	หน่วยแรงคดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน	32
2.16	ค่าตัวคูณรูปร่างของคานหน้าตัดต่าง ๆ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระดับกับความยาวไร้การยึดรั้ง ด้านข้างของคานา	36
2.18 พิกัดของหน้าตัดรูปรางน้ำ	41
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคานา.....	53
2.20 การทดสอบคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ ภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด.....	54
2.21 ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ	55
2.22 การทดสอบคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด	57
2.23 ลักษณะการวิบัติของคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด	58
2.24 การทดสอบคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป Wide-flange และรูปตัว I	59
2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด และความยาวของตัวอย่างทดสอบ	60
2.26 ลักษณะการวิบัติของคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป Wide-flange และรูปตัว I ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำที่ปลายคานา	61
2.27 แผนภาพการทดสอบคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด	62
2.28 การทดสอบคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำที่ถูกทดสอบ โดยแรงกระทำที่ปลายคานา	63
2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด และความยาวของคานา PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ.....	64
2.30 ลักษณะการวิบัติของคานาพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ.....	65
2.31 แบบจำลองอีลิเมนต์แบบแผ่น กิ่ง 4 จุด.....	67
2.32 แบบจำลองลักษณะการ โกงเดาะสำหรับคานาอื่น	67

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.33	แบบจำลองลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใย หน้าตัดรูป Wide-flange และรูปตัว I 68
2.34	แบบจำลองลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ 69
3.1	แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย 72
3.2	ลักษณะหน้าตัดรูปรางน้ำของคาน PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย 74
3.3	การเจาะรูบริเวณปลายคานเพื่อติดตั้งชุดทดสอบ 78
3.4	การติดตั้งชุดให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ 78
3.5	แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น 79
3.6	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบคานยื่น (ปลายยื่น) 80
3.7	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบคานยื่น (ด้านยึดแน่น) 80
3.8	การตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ 81
3.9	การวัดระยะแอนตัวแนวคิงที่ปลายคาน 82
3.10	การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจุกรองรับแบบง่าย 87
3.11	การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุกรองรับแบบง่าย 87
3.12	แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 88
3.13	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบง่าย 89
3.14	จุกรองรับแบบง่าย 89
3.15	การวัดระยะแอนตัวแนวคิงและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 90
3.16	การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 90
3.17	การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย 91
3.18	แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 97
3.19	การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุกรองรับแบบยึดแน่น 98
3.20	จุกรองรับแบบยึดแน่น 98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.21	การวัดระยะแอนตัวแนวดิ่งและด้านข้างของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	99
3.22	การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	99
3.23	การทดสอบตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	100
3.24	อิลลิเมนต์ BEAM188/3D linear finite strain beam	105
3.25	การจำลองหน้าตัดรูปรางน้ำโดย Beam Tool.....	106
3.26	ตัวอย่างแบบจำลองหน้าตัดรูปรางน้ำ.....	108
3.27	แบบจำลองตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	108
3.28	แบบจำลองตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	109
3.29	แบบจำลองตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	109
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอนตัวแนวดิ่ง ที่ปลายของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	111
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอนตัวแนวดิ่ง ที่ปลายของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	112
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอนตัวแนวดิ่ง ที่ปลายของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	112
4.4	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	113
4.5	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	113
4.6	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของตัวอย่าง ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	118
4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	119
4.9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	120
4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	120
4.11 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-C-0.5	126
4.12 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-C-2.0	126
4.13 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-C-1.0	127
4.14 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-C-4.0	127
4.15 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-C-1.0	128
4.16 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-C-3.0	128
4.17 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	129
4.18 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	129
4.19 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	130

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	134
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	134
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น	135
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	137
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	137
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	138
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	138
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	139
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	140
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	140
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	141
4.32 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	141
4.33 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	142
4.34 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	142
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก โกงเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	146
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	147
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38	ความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 148
4.39	ตัวอย่างความสัมพัทธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 149
4.40	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 76×22×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 150
4.41	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 76×22×6 mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 150
4.42	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 102×29×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 151
4.43	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 151
4.44	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 152
4.45	การเปรียบเทียบความสัมพัทธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 152
4.46	รูปแบบการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบ C76-S-1.0..... 158
4.47	รูปแบบการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบ C76-S-3.0..... 158
4.48	รูปแบบการโก่งเดาะของตัวอย่างทดสอบ C102-S-1.0..... 159

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.49	รูปแบบการโค้งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-S-5.0..... 159
4.50	รูปแบบการโค้งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-S-2.0..... 160
4.51	รูปแบบการโค้งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-S-4.0..... 160
4.52	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 161
4.53	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 161
4.54	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 162
4.55	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โค้งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... 166
4.56	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โค้งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... 166
4.57	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โค้งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย..... 167
4.58	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวคิ่ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 169
4.59	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวคิ่ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 169

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	170
4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	170
4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	171
4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	171
4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	172
4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	172
4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	173
4.67 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	173
4.68 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....	174

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.69	ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 174
4.70	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของคาน ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 178
4.71	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 179
4.72	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 180
4.73	ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 180
4.74	ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 181
4.75	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 182
4.76	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 182
4.77	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 183
4.78	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัว แนวคิ่งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น 183

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.79	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 184
4.80	การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 184
4.81	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-F-1.0..... 190
4.82	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-F-4.0..... 190
4.83	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-F-1.0..... 191
4.84	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-F-3.0..... 192
4.85	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-F-2.0..... 192
4.86	รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C152-F-4.0..... 192
4.87	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 193
4.88	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 193
4.89	ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัว แฉกของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น..... 194
4.90	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 198
4.91	ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 198

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น	199
4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือนต่างกัน	200
4.94 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกน ต่อโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวางต่างกัน	201
ก.1 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง	215
ก.2 การวัดขนาดความหนาของปีกวัสดุ FRP โดยไมโครมิเตอร์	216
ก.3 การวัดขนาดความกว้างของปีกวัสดุ FRP โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์	217
ก.4 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ	220
ก.5 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในอากาศ	220
ก.6 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในน้ำ	221
ก.7 ลักษณะตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ	223
ก.8 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ	225
ก.9 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกลอบด้วยอุณหภูมิ 70°C	226
ก.10 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกลอบด้วยอุณหภูมิ 565°C	227
ก.11 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ FRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก	229
ก.12 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน FRP	229
ก.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล	231
ก.14 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย	232
ก.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย	233
ก.16 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง ตามแนวแกนของเส้นใย	234
ก.17 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย	235
ก.18 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัด ตามแนวแกนของเส้นใย	236

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.19	รายละเอียดของ Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 238
ก.20	Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย..... 238
ก.21	การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 239
ก.22	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 239
ก.23	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย..... 240
ก.24	อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... 242
ก.25	การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 243
ก.26	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... 244
ก.27	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย..... 244
ก.28	ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย..... 246
ก.29	ลักษณะจุกรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 248
ก.30	การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 248
ก.31	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 249
ก.32	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย..... 250
ก.33	รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 252
ก.34	ตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 253
ก.35	อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 254

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.36	แผนผังวัตถุอิสระของแรงเฉือนและโมเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 255
ก.37	การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 256
ก.38	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 257
ก.39	การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย..... 257
ข.1	ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น 261
ข.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย 263
ข.3	ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 265
ค.1	Degree of freedom ของ Beam element 270
ค.2	การเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน 273
ค.3	การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko โดยโปรแกรม ANSYS 275

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

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

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

L	=	ความยาวคาน
L_b	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้าง (สำหรับวิธี LRFD)
L_r	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินelasติก
L_p	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$
L_{pd}	=	ความยาวไร้การยึดครั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก
L/d	=	อัตราส่วนความยาวต่อความลึก
M	=	โมเมนต์ค้ครอบแกนสะเทิน
M_A	=	โมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน
M_B	=	โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน
M_C	=	โมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน
M_{cr}	=	โมเมนต์โก่งเดาะ หรือ โมเมนต์วิกฤต
$M_{cr,EXP}$	=	โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ
$M_{cr,LRFD}$	=	โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD
M_{max}	=	โมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวที่ปราศจากการยึดครั้ง
M_n	=	กำลังโมเมนต์ระบุ
M_p	=	โมเมนต์พลาสติก
M_r	=	โมเมนต์สูงสุดในช่วงelasติก
M_u	=	โมเมนต์ใช้งานที่เพิ่มค่าแล้ว
M_y	=	โมเมนต์ค้ดที่จุดคราก
$P_{cr,A}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง A
$P_{cr,B}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบตัวอย่าง B
$P_{cr,EXP}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ
$P_{cr,FEA}$	=	น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
R_n	=	ความต้านทานระบุ
r_y	=	รัศมีไจเรชั่นรอบแกนรอง
S	=	โมดูลัสหน้าตัด

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

t_f	=	ความหนาของปีก
t_w	=	ความหนาของเอว
u_x	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน x
u_y	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน y
u_z	=	การเคลื่อนที่ในทิศทางแกน z
W	=	น้ำหนักบรรทุกใช้งาน
Z_x	=	โมเมนต์พลาสติก
Δ	=	ระยะการแอ่นตัว
Δ_{allow}	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้
Δ_{max}	=	ระยะการแอ่นตัวสูงสุด
γ_i	=	ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก
α	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะ ของจุดรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงดัด
β	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะ ของจุดรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน
γ	=	ความเครียดเฉือน
λ_w	=	ค่าสัดส่วนความชะลูดของเอวคาน
λ_f	=	ค่าสัดส่วนความชะลูดของปีกคาน
θ_x	=	การหมุนรอบทิศทางแกน x
θ_y	=	การหมุนรอบทิศทางแกน y
θ_z	=	การหมุนรอบทิศทางแกน z
ϕ	=	ตัวคูณความต้านทาน (สำหรับองค์อาคารรับแรงดัด $\phi = 0.90$)
AISC	=	American Institute of Steel Construction
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
DAQ	=	Data Acquisition Unit
LVDT	=	Linear Variable Differential Transducer
UTM	=	Universal Testing Machine

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

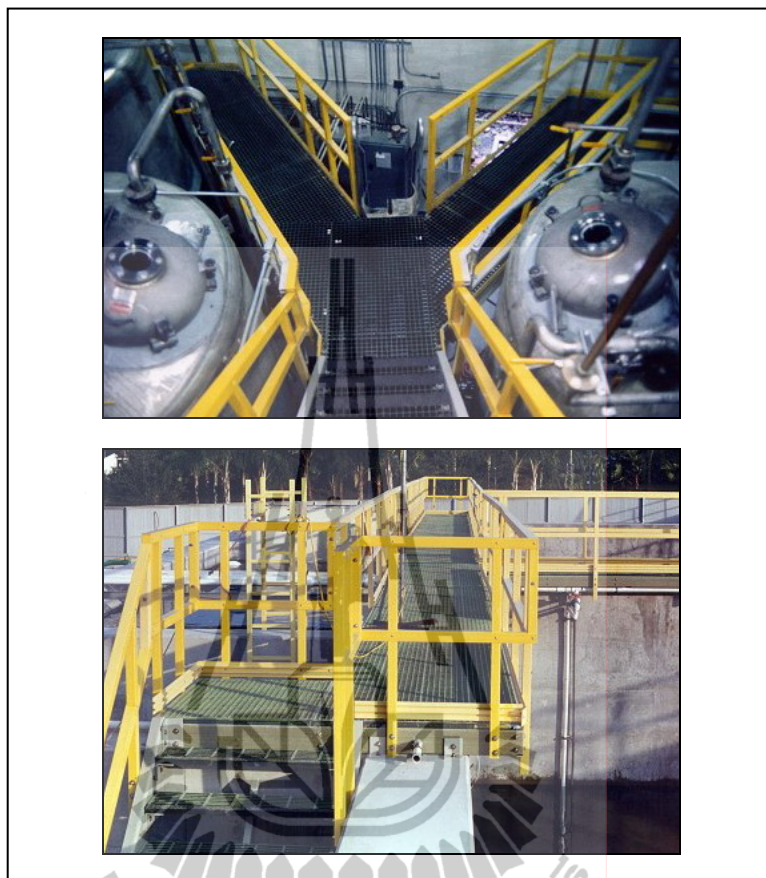
สำหรับงานโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ หน้าตัดเหล็กประเภทหนึ่งที่นิยมใช้ในการรับแรงคดของโครงสร้าง คือ หน้าตัดรูปรางน้ำ (channel section) โดยถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชิ้นส่วนของโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น โครงสร้างแป (purlin) โครงผนังค้ำยัน (wall stud) และชิ้นส่วนในระบบโครงข้อหมุน (truss system) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 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 ล้านบาท และสำหรับปริมาณการใช้งานโดยประมาณของเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำคิดเป็นร้อยละ 0.5 ของปริมาณเหล็กที่นำเข้าทั้งหมด คิดเป็นมูลค่าประมาณ 1,875 ล้านบาท สาเหตุหลักของการนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็ก เนื่องจากประเทศไทยไม่มีแหล่งแร่เหล็ก (iron ore) โดยวัสดุคืบดังกล่าวต้องนำเข้าจากประเทศออสเตรเลียและบราซิล จากนั้นจึงนำมาผ่านการถลุงและผลิตเป็นสินค้าเหล็กรูปพรรณ ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว ภาครัฐและเอกชนจึงควรส่งเสริมการใช้วัสดุก่อสร้างที่ผลิตในประเทศ โดยใช้วัสดุคืบภายในประเทศหรือใช้วัสดุคืบซึ่งนำเข้าจากต่างประเทศในปริมาณน้อยที่สุด เพื่อทดแทนการนำเข้าผลิตภัณฑ์เหล็กและลดการขาดดุลการค้าระหว่างประเทศ



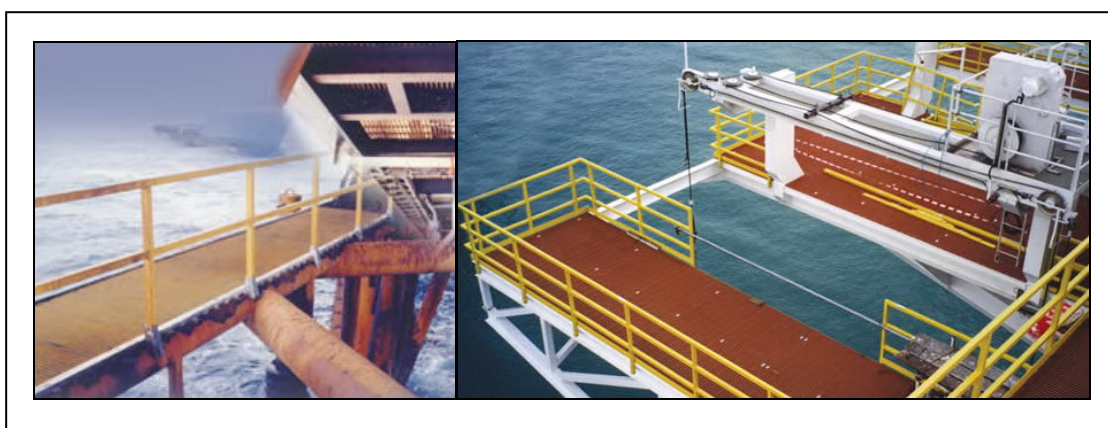
รูปที่ 1.2 โครงสร้างแปและชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำ

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

ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาพลาสติกเสริมเส้นใยชนิดใหม่ขึ้นมาหลายในแวดวงวิศวกรรม 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 ๆ เข้าถึงยาก
(Powertrusion International, 2007)



รูปที่ 1.6 การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา
(Strongwell, 2002)

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือ FRP 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 เนื่องจากวัสดุชนิดนี้เป็นวัสดุออร์ทोटโรปีค (orthotropic material) และไม่เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) จึงต้องพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ ตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย (Creative Pultrusion, 2004) นอกจากนี้วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยยังมีความแข็งแรงต่ำและเปราะ (brittle material) ที่มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) โดยมีค่าโมดูลัสต่าง ๆ ก่อนข้างต่ำและมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนสูง ดังนั้นการเสียรูปของโครงสร้าง จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่ควบคุมการออกแบบ (Roberts and Al-Ubaidi, 2002)

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



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

ชิ้นส่วน โครงสร้าง (structural member) ที่ทำมาจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุก่อสร้างใหม่สำหรับประเทศไทย แต่ได้มีการนำมาใช้งานก่อสร้างในต่างประเทศมาแล้วไม่ต่ำกว่า 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 โดยคู่มือการออกแบบดังกล่าวมีพื้นฐานจากมาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยวิธี 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 FRP หากแต่กล่าวถึง ข้อกำหนดสำหรับการออกแบบโครงสร้าง ข้อควรปฏิบัติ และข้อกำหนดด้านการใช้งานสำหรับโครงสร้างพลาสติกและวัสดุประกอบโพลีเมอร์โดยรวมเท่านั้น (Bank, 2006) นอกจากมาตรฐานการออกแบบที่กล่าวมา ยังมีคู่มือการออกแบบ (design manual) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP 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 FRP ที่ผลิตขึ้นโดยบริษัทผู้ผลิตนั้น ๆ และเน้นที่หน้าตัด wide-flange (WF) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) เป็นหลัก

จากเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้การดัด (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 FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้การดัดที่มีสถานะเงื่อนไข

ของจตุรรองรับ (support condition) ที่แตกต่างกัน ได้แก่ จตุรรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported) และจตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังไม่พบสมการที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงคด จากคุณสมบัติและข้อดีที่ได้เปรียบของวัสดุ CFRP ที่มีต่อวัสดุก่อสร้างชนิดอื่นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อีกทั้งการขาดคู่มือในการออกแบบโครงสร้างที่ได้มาตรฐาน จึงมีความคิดที่จะศึกษาพฤติกรรมทางกลของชิ้นส่วนโครงสร้างวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion โดยเน้นพฤติกรรมหลัก ได้แก่ การรับแรงคดภายใต้สภาวะเงื่อนไขของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน และมุ่งเน้นที่หน้าตัดรูปรางน้ำที่ยังไม่มีผู้ศึกษา มากนัก เพื่อให้สอดคล้องกับยุทธศาสตร์ (strategy) ด้านการปรับโครงสร้างทางอุตสาหกรรม และส่งเสริมการใช้วัสดุชนิดนี้ให้แพร่หลายในอุตสาหกรรมก่อสร้างประเทศไทยมากขึ้น นอกจากนี้ ยังสอดคล้องกับแนวคิดด้านการวิจัยและพัฒนา (research and development) และเป็นการส่งเสริมขบวนการเรียนรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์อย่างมีระบบและถูกต้องตามหลักวิชาการ อีกทั้งยังลดปริมาณการใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างเนื่องจากปัญหาการลดลงของป่าไม้และปัญหาจากภัยธรรมชาติต่าง ๆ ที่เป็นผลมาจากการตัดไม้ทำลายป่า และยังลดการนำเข้าวัสดุก่อสร้างจากต่างประเทศ เช่น เหล็กและอลูมิเนียม เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยดังกล่าวสามารถผลิตได้เองในประเทศไทยโดยใช้วัตถุดิบภายในประเทศบางส่วน สุดท้ายเป็นการลดปัญหาขยะจากอุตสาหกรรมก่อสร้างเนื่องจากวัสดุชนิดนี้ทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

ภายใต้กรอบแนวความคิด (conceptual framework) และสมมติฐานในงานวิจัยนี้ เนื่องจากยังไม่มีผลการทดสอบและการตีพิมพ์เผยแพร่ผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับคานประกอบพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้การคดที่ได้มาตรฐาน ในการวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานเบื้องต้น โดยให้ลักษณะของการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปรางน้ำมีลักษณะการวิบัติที่คล้ายคลึงกับชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็กรูปพรรณ นอกจากนี้ Barbero and Raftoyiannis (1994); Davalos, Qiao, and Salim (1997) ได้ศึกษาลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัด wide-flange (WF) ภายใต้แรงคด พบว่าการวิบัติแบบโก่งคดด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) หรือเรียกอีกชื่อว่าการโก่งคดเนื่องจากการคดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) เป็นลักษณะการวิบัติซึ่งมักเกิดขึ้นก่อนการวิบัติเนื่องจากการกำลังของวัสดุ (material failure) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากวัสดุ CFRP มีคุณสมบัติและพฤติกรรมเป็นแบบ Orthotropic material ซึ่งแตกต่างจากเหล็กรูปพรรณซึ่งมีพฤติกรรมแบบ Isotropic material ตลอดจนวัสดุ CFRP มีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 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 จากกรอบแนวความคิดวิธีการศึกษาและพัฒนาสมการดังกล่าว สุดท้ายคาดว่า จะได้สมการเพื่อใช้สำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปร่างหน้าภายใต้แรงคด ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการออกแบบและก่อสร้างจริงได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1) เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างหน้าภายใต้แรงคด โดยมีสถานะของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จตุรรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported) และจตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported)
- 1.2.2) เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และพัฒนาสมการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างหน้าภายใต้แรงคดที่ได้มาตรฐาน
- 1.2.3) เพื่อตรวจสอบผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการและสมการออกแบบ กับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 สมมติฐานการวิจัย

- 1.3.1) ในงานวิจัยนี้ วัสดุ CFRP ถูกพิจารณาเป็นวัสดุเนื้อเดียวสม่ำเสมอ (homogenous) และเป็นวัสดุออร์ทोटโรพิก (orthotropic material) ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานตามทิศทางที่พิจารณา
- 1.3.2) พฤติกรรมของวัสดุ CFRP พิจารณาบนพื้นฐานแบบกลศาสตร์มหภาค (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) ที่มีหน้าตัดรูปร่างน้ำ
- 1.4.2) วัสดุ PFRP ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วย ใยแก้ว (fiber) ชนิด E-glass และเรซิน (resin) ชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyesters)
- 1.4.3) ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ขนาดของหน้าตัด (dimensions) ความยาวของคาน (span) และชนิดของจุดรองรับ (support condition) โดยกำหนดให้ตัวแปรอื่น ๆ เช่น เฟอร์เซินของเส้นใยแก้ว ชนิดเรซิน สารผสมเพิ่ม (additives) และกรรมวิธีการผลิตของตัวอย่างทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันเท่าที่สามารถทำได้
- 1.4.4) วัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm
- 1.4.5) ชนิดของจุดรองรับมี 3 แบบ ได้แก่ จุดรองรับแบบคานยื่น จุดรองรับแบบงาย และจุดรองรับแบบยึดแน่น
- 1.4.6) การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง (dimensional tolerance) คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกล (mechanical properties) ถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM
- 1.4.7) การทดสอบแบบ 3 จุด (three-points loading test) ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบงาย และจุดรองรับแบบยึดแน่น ส่วนการทดสอบแบบคานยื่น (cantilever test) ใช้สำหรับตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น
- 1.4.8) การให้แรงกระทำจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัดรูปร่างน้ำ
- 1.4.9) การจำลองและวิเคราะห์การตอบสนองทางโครงสร้างของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 10.0

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1) เข้าใจพฤติกรรมการรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ ภายใต้สภาวะของจตุรกรรับชนิดต่าง ๆ
- 1.5.2) ได้รับสมการออกแบบมาตรฐาน (standard design equations) และขั้นตอนสำหรับการออกแบบ (design procedures) คาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำภายใต้แรงดัดที่ถูกต้อง เหมาะสม และปลอดภัย
- 1.5.3) ส่งเสริมการใช้งานวัสดุ FRP สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้าง ส่งผลให้เกิดการผลิตเชิงพาณิชย์เพื่อตอบสนองความต้องการต่อการใช้งานที่มากขึ้น เนื่องจากมีกระบวนการออกแบบที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ
- 1.5.4) สามารถนำผลงานวิจัยนี้ เป็นองค์ความรู้พื้นฐานสำหรับการพัฒนาและวิจัยเกี่ยวกับวัสดุ FRP ภายใต้หน้าตัดและแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ต่อไป



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

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

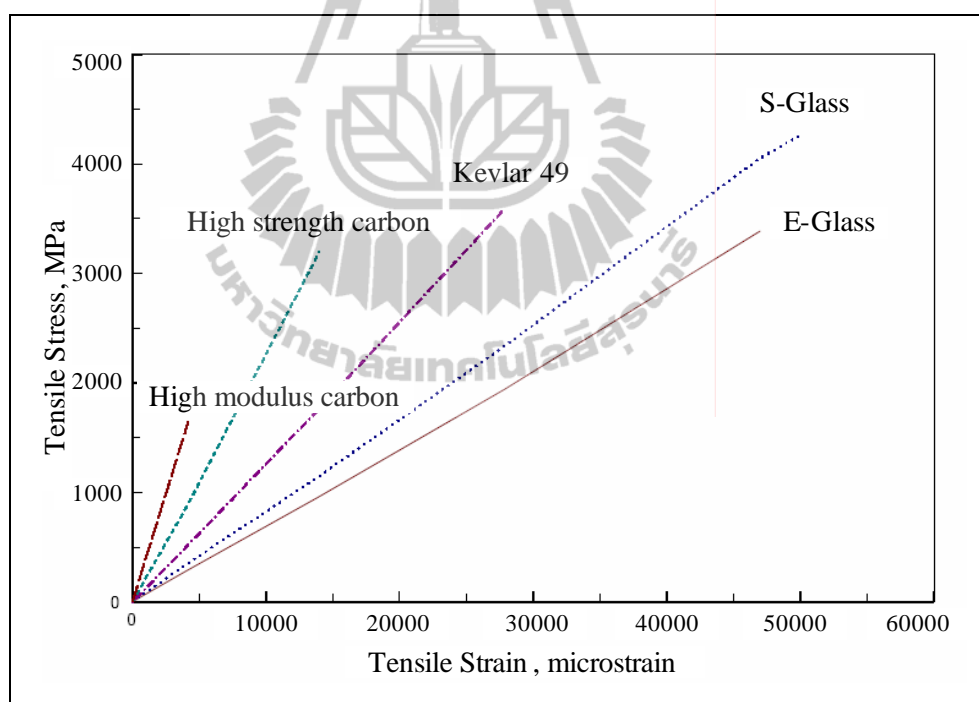
ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP ในส่วนประวัติความเป็นมา และการใช้งาน ส่วนประกอบของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตวัสดุโดยวิธี Pultrusion โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อทำความรู้จักและเข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้ จะกล่าวถึง การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างเหล็ก รูปพรรณ และวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด รวมทั้งทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาและมีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ศึกษา ตลอดจนการวิเคราะห์ พฤติกรรมการรับแรงดัดของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างนี้ โดยสมการคำนวณทางทฤษฎี และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

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) หรือกราไฟท์ (graphite fiber)

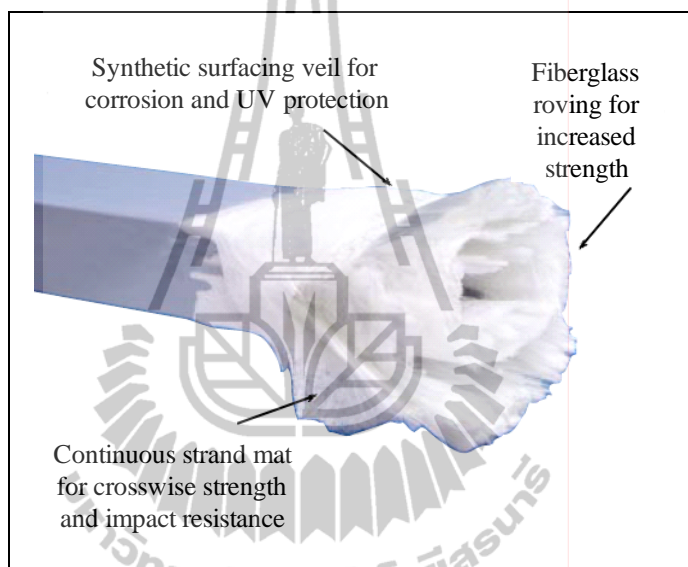
เส้นใยอาราไมด์ (aramid fiber) หรือเคฟลาร์ (Kevlar) และเส้นใยโบรอน (boron fiber) เป็นต้น (Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006) รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ภายใต้แรงดึง จากรูปเห็นได้ว่า เส้นใยมีกำลังรับแรงดึงที่สูงมาก (มากกว่า 1,500 MPa) เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณ 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) และ โพลีเอทิลีน (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) และวัสดุแบบออร์โทโทรปิก (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 ประวัติความเป็นมาและการใช้งานวัสดุ FRP

วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion ได้ถูกพัฒนาและเริ่มใช้งานเชิงอุตสาหกรรมก่อสร้างในปี ค.ศ. 1950 ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา (Bank, 2006) ช่วงแรก ชิ้นส่วนของวัสดุ FRP ถูกนำไปใช้ในโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) และส่วนของโครงสร้างที่มีสภาวะการกัดกร่อนสูง (high corrosion) เช่น โรงงานอุตสาหกรรมเคมี และโรงงานบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น (Goldsworthy, 1954) ในปี ค.ศ. 1960 บริษัทผู้ผลิตหลายรายเริ่มผลิตชิ้นส่วน FRP ที่ได้มาตรฐานขึ้น โดยแต่ละบริษัทได้ทำการวิจัยและคิดค้นเทคโนโลยีการผลิตชิ้นส่วน FRP ของตนเอง โดยหน้าตัดที่นิยมผลิตใช้งานในช่วงนั้น ได้แก่ หน้าตัดรูป I และวงกลม และในปีเดียวกันบริษัท Composites Technology, Inc (CTI) ได้พัฒนาระบบโครงสร้าง (building system) สำหรับชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ขึ้น (Smallowitz, 1985)

Green, Bisarsin, and Love (1994) กล่าวว่าในปี ค.ศ. 1980 ระบบโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ได้ถูกพัฒนาและนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างอาคารสำหรับอุตสาหกรรมทำความเย็น ตัวอย่างเช่น Cooling tower ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ชิ้นส่วน FRP ได้ถูกเริ่มนำมาใช้เป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา อาทิเช่น คาน เสา ผนัง และ แผ่นพื้นสำเร็จรูป เป็นต้น ต่อมาในปี ค.ศ. 1985 บริษัท Strongwell Corporation ได้ออกแบบและดำเนินการก่อสร้างห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า Electromagnetic Interference (EMI) โดยแนวคิดหลักของโครงสร้างดังกล่าวคือ ภายในอาคารจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงการรบกวนสัญญาณเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic) ส่งผลให้วัสดุ FRP ที่มีคุณสมบัติเด่นด้านความโปร่งใสต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic transparency) เมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างอื่น ๆ ถูกนำมาใช้ในการก่อสร้าง รูปที่ 2.4 แสดงการติดตั้งโครงข้อแข็งของห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า Electromagnetic Interference (EMI)

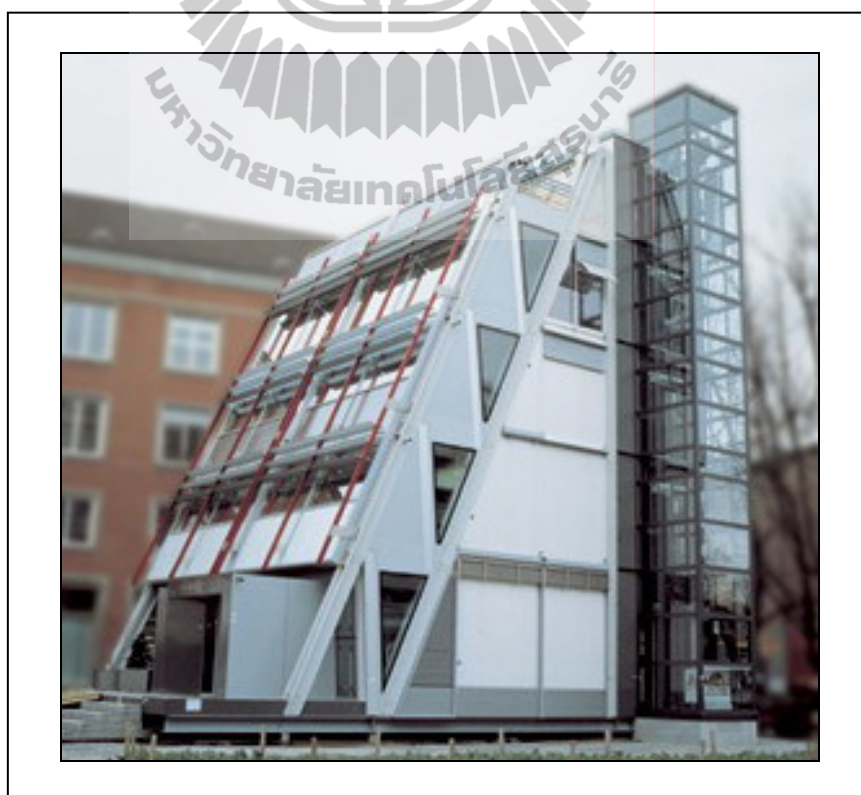


รูปที่ 2.3 Cooling tower ที่ทำจากวัสดุ FRP (Creative Pultrusions, 2004)



รูปที่ 2.4 การติดตั้งโครงข้อแข็งที่ทำจากวัสดุ FRP ระหว่างการก่อสร้าง
(Strongwell, 2002)

อย่างไรก็ตาม ระหว่างปี ค.ศ. 1950 ถึง ค.ศ. 1990 อาคารที่มีความสูงหลายชั้น (multistory building) ซึ่งทำจากวัสดุ FRP อาจยังไม่พบเห็น เนื่องจากมีความซับซ้อนบริเวณ จุดเชื่อมต่อ (connection) ของแต่ละชั้นส่วนภายในโครงสร้าง รวมทั้งวิศวกรยังขาดความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมทางโครงสร้างบริเวณจุดเชื่อมต่อดังกล่าว ต่อมาหลังจาก ปี ค.ศ. 1990 ได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของจุดเชื่อมต่อ (connection behaviors) สำหรับชิ้นส่วน FRP เพิ่มมากขึ้น โดยใช้แนวคิดและความรู้พื้นฐานสำหรับการศึกษา มาจากจุดเชื่อมต่อของโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ (structural steel connection) ดังตัวอย่างงานวิจัย ที่ถูกเสนอโดย Bank, Mosallam, and Gonsior (1990); Chen and Blandford (1995); Bank, Yin, and Moore (1996); Mottram and Zheng (1996); Nagara and Gangarao (1998); Smith, Parsons, and Hjelmstad (1999) จนในปี ค.ศ. 1999 อาคารที่มีชื่อว่า Eyecatcher ซึ่งเป็นอาคารที่มีความสูง 5 ชั้น สูง 15 m ได้ถูกสร้างขึ้นโดยบริษัท Fiberline Composites ในประเทศสวีเดน (Keller, 1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 อาคารดังกล่าวได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ซึ่งสามารถใช้ทดแทนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณได้



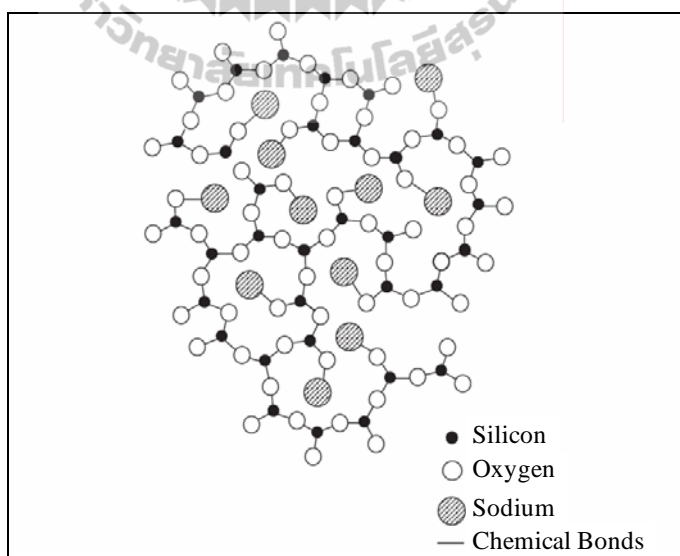
รูปที่ 2.5 อาคาร Eyecatcher ที่ทำจากวัสดุ FRP (Keller, 1999)

2.2.3 วัสดุคิบและส่วนประกอบของวัสดุ FRP

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของวัสดุคิบที่นำมาผลิตชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ในงานวิศวกรรมโยธา วัสดุคิบที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุ FRP ได้แก่ เส้นใยแก้วและเรซิน วัสดุคิบทั้งสองชนิดมีหลายประเภท สามารถเลือกและออกแบบ ให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน รูปแบบของโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุกใช้งาน

2.2.3.1 เส้นใยแก้ว

เส้นใยแก้วเป็นส่วนประกอบหลักที่ใช้รับแรงและเสริมความแกร่ง (stiffness) ตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย โดยทั่วไปวัสดุ FRP มีส่วนประกอบของเส้นใยแก้ว ประมาณ 45-75% โดยน้ำหนัก (Creative Pultrusion, 2004) เส้นใยแก้วผลิตจากการหลอม ส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสัดส่วน ประมาณ 50-70% โดยน้ำหนักของเส้นใย (Kelly and Zweben, 2000) นอกจากนี้ยังประกอบด้วย หินปูน (limestone) กรดบอริก (boric acid) ดินเหนียว (clay) ถ่านหิน (coal) และเฟลสปาร์ (fluorspar) ออกไซด์ของอลูมิเนียม และแคลเซียม เป็นต้น โดยส่วนผสมทั้งหมดถูกหลอมเหลว ที่อุณหภูมิประมาณ $1,300^\circ\text{C}$ และถูกดันผ่านช่องเล็ก ๆ แล้วทำให้เย็นตัวโดยฝอยน้ำ รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองโครงสร้างแบบ 2 มิติของเส้นใยแก้ว



รูปที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างแบบ 2 มิติของเส้นใยแก้ว (Kelly and Zweben, 2000)

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

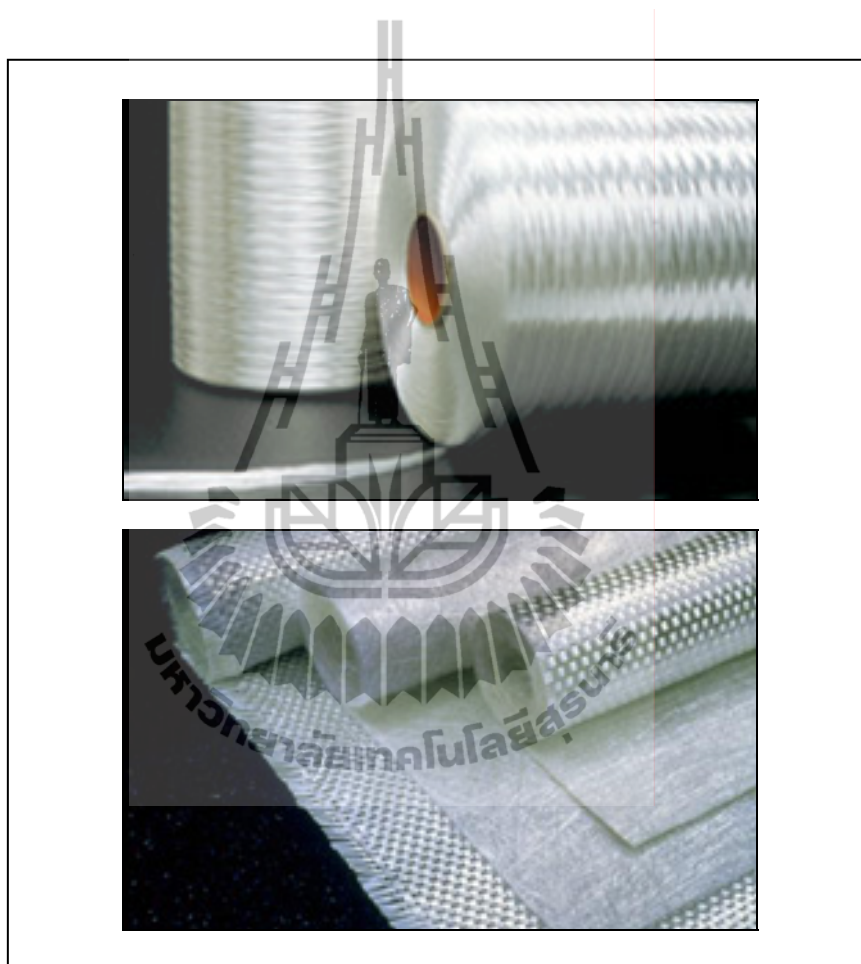
- 1) E-glass (electrical glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulation) เนื่องจากมีอัตราค่าไดอิเล็กตริกหรือเรียกอีกชื่อว่า Borosilicate glass
- 2) S-glass (high-strength glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีกำลังและโมดูลัสสูง
- 3) C-glass (corrosion glass) คือ เส้นใยแก้วที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี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

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม เส้นใยแก้วที่มีการนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างมากที่สุด 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 PFRP มีทั้งแบบเป็นเส้นต่อเนื่อง (continuous strand rovings) และแบบเป็นแผ่นต่อเนื่อง (continuous stand mat) โดยแบบแผ่นมีทั้งที่มีการสาน (woven roving mat) และแบบไม่สาน (non-woven roving mat) รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างของเส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ PFRP



รูปที่ 2.7 เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ PFRP (Owens Corning, 2008)

การเลือกชนิด รูปแบบ ลักษณะ และปริมาณของใยแก้วที่นำมาใช้งาน เป็นสิ่งสำคัญและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุ FRP (Seangathit, 1997) ได้แก่

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

2.2.3.2 เรซิน

เรซินเป็นวัสดุ โพลีเมอร์พลาสติกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสาน (binder) ส่งถ่ายแรงระหว่างเส้นใย ป้องกันเส้นใยจากการกัดกร่อนทางเคมีและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ดังนั้น เรซินต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เข้ากันได้กับเส้นใยแก้ว รูปที่ 2.8 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 2.8 เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ FRP

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

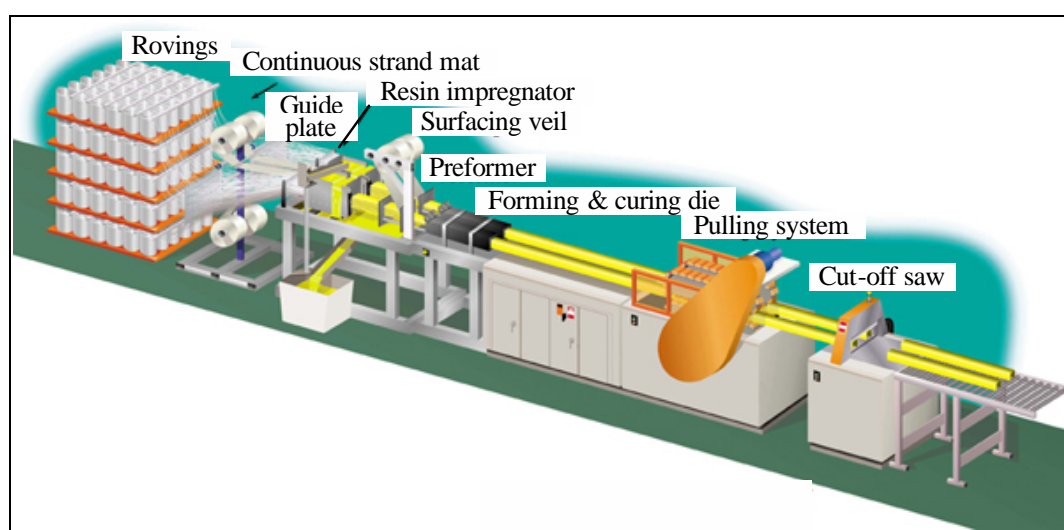
(Daniel and Isahi, 1994)

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

2.2.4 กระบวนการผลิตวัสดุ FRP

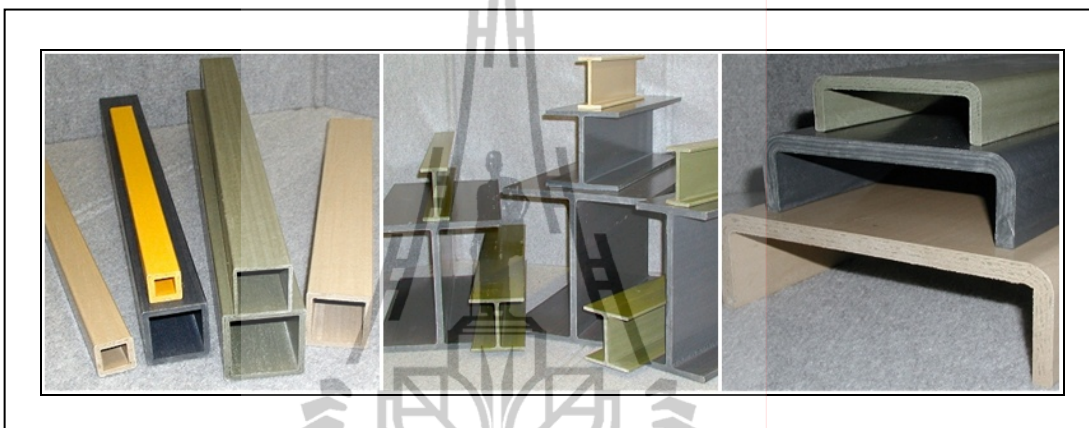
วิธีการผลิตพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ได้รับความนิยม คือ วิธี Pultrusion เนื่องจากการผลิตโดยวิธีนี้ได้ชิ้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอตรงยาว และต่อเนื่อง ในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง (Bakis et al., 2002) รูปที่ 2.9 แสดงขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

ขั้นตอนการผลิตโดยวิธี Pultrusion เริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น (continuous strand rovings) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่อ่างอาบเรซิน (resin impregnator) เพื่อให้เส้นใยแก้วอุ่มตัวด้วยเรซิน (wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบสาน (continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการรับแรงในแนวขวาง (transverse properties) ให้กับวัสดุ FRP จากนั้น ใส่แผ่นวัสดุผิวนอกรวมเข้ากับเส้นใยแก้วที่อุ่มตัวด้วยพลาสติก เพื่อความเรียบของผิววัสดุ 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 2.9 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion (Strongwell, 2002)

ชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion สามารถผลิตตามขนาด และรูปร่างที่ต้องการได้ ตั้งแต่หน้าตัดที่ใช้โดยทั่วไป เช่น WF (wide flange) L (angle) C (channel) และ box section เป็นต้น รวมทั้งหน้าตัดที่ซับซ้อน (complex geometry) ขึ้นอยู่กับแบบของแม่พิมพ์ ในกระบวนการผลิต (Strongwell, 2002) รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างหน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

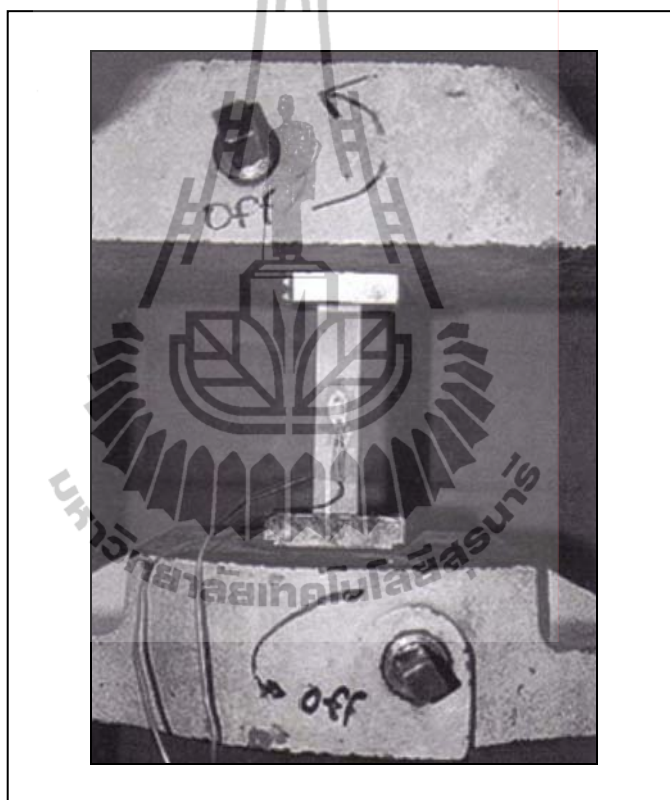


รูปที่ 2.10 หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion (Bedford, 2005)

2.2.5 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ FRP

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

การทดสอบแรงดึง (tensile test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039-95 กับตัวอย่างที่ตัดทั้งในแนวนอนกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย เพื่อทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus of elasticity) หน่วยแรงดึงประลัย (tensile ultimate stress) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และทดสอบตัวอย่างที่ตัดในทิศทางทำมุม 10° กับทิศทางการวางตัวของเส้นใย เพื่อหาโมดูลัสยืดหยุ่นเนื่องจากการเฉือนในระนาบ (in-plane shearing modulus of elasticity)



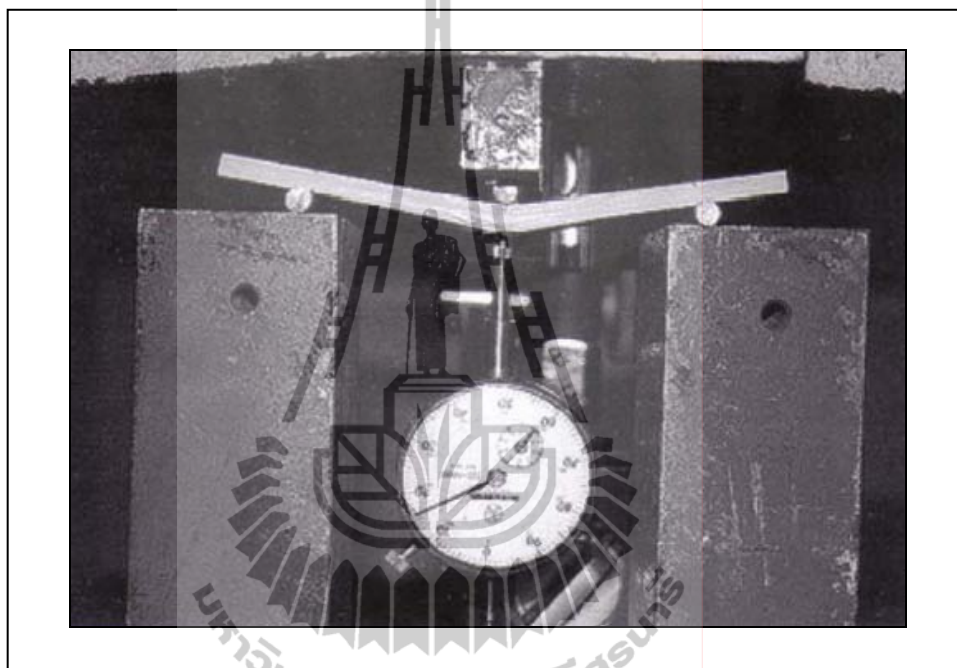
รูปที่ 2.11 การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบแรงอัด (compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695-95 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus of elasticity) และหน่วยแรงอัดประลัย (compressive ultimate stress) ทดสอบตัวอย่างถูกตัดในแนวนานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย และในแนวตั้งฉากกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย ลักษณะการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.12



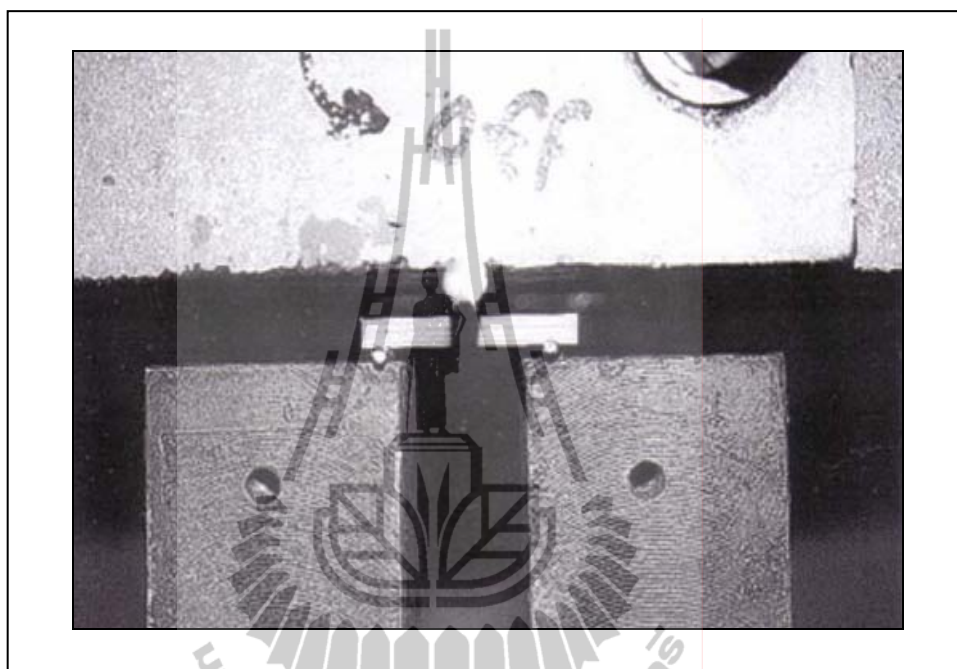
รูปที่ 2.12 การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบแรงดัด (flexural test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-92 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus of elasticity) และหน่วยแรงดัดประลัย (flexural ultimate stress) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวขนานกับทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใยเพียงทิศทางเดียว ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบ (interlaminar shear strength test)
ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2344-95 ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวนอนกับ
ทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใยเพียงทิศทางเดียว ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน PFRP
(สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

ผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRFP กับคุณสมบัติทางกลของเหล็กgrupพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRFP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกลของเหล็กgrupพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

คุณสมบัติทางกล	วัสดุ FRFP	เหล็กgrupพรรณตามมาตรฐาน 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 FRFP มีค่าใกล้เคียงกับหน่วยแรงดึงประลัยและหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กgrupพรรณ และมีค่าสูงกว่าหน่วยแรงคราก (yielding stress) ของเหล็กgrupพรรณ 40.8% แต่หน่วยแรงอัดประลัยของวัสดุ FRFP มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงอัดประลัยของเหล็กgrupพรรณ 22.9% ในทิศทาง LW และ 64.2% ในทิศทาง CW นอกจากนี้ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุ FRFP ในทิศทาง LW และ CW มีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กgrupพรรณประมาณ 7 เท่า และ 26 เท่า ตามลำดับ ยกเว้นโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตในทิศทาง LW ของวัสดุ FRFP จะมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กgrupพรรณประมาณ 15 เท่า ในทางตรงกันข้าม วัสดุดังกล่าวมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคัตที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การเสียรูปร่างเนื่องจากการแอ่นตัว (deflection) ของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมการออกแบบหน้าตัดของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRFP

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ FRP กับเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่าวัสดุ FRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กรูปพรรณประมาณ 5.3 เท่า ดังนั้น ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ควรมีการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนทุกครั้ง

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

2.3 พฤติกรรมและการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด

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

โดยทั่วไป คานมักมีหน้าตัด wide-flange (WF) หน้าตัดรูปตัวไอ (I) หน้าตัดรูปรางน้ำ (channel) และ หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (box section) เป็นต้น คานหน้าตัด wide-flange เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดที่สุด เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวมีพื้นที่ในส่วนของปีก (flange) มากกว่า หน้าตัดรูปตัว I ส่งผลให้หน้าตัด wide-flange มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment of inertia) ต่อพื้นที่หน้าตัดมากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่วนคานหน้าตัดรูปรางน้ำ มักถูกใช้เป็นการรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าไม่มากนัก เช่น โครงสร้างแป เป็นต้น เนื่องจากหน้าตัดมีความต้านทานต่อการแอ่นตัวทางด้านข้างต่ำ นอกจากนี้ คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง เป็นคานที่มีหน้าตัด

ประหยัดอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งหน้าตัดดังกล่าวมีความสามารถต้านทานต่อแรงดัดและแรงบิดได้ดี (Gaylord, Jr., E. H., Gaylord, C. N., and Stallmeyer, J. E., 1992)

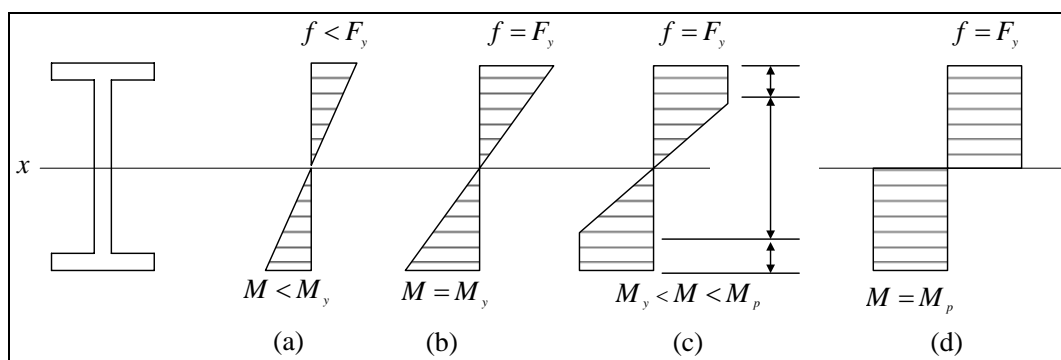
พิจารณาคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งถูกกระทำโดยโมเมนต์ดัด M รอบแกนสะเทิน (neutral axis) ของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เมื่อคานมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic) และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างน้อยมาก (small displacement) หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นจะมีการกระจายแบบเส้นตรงจากศูนย์ที่แกนสะเทินจนมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.15(a) หน่วยแรงดัด (flexural stress, f_b) สูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานหาได้จากสมการการดัด (flexural formula)

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

โดยที่ c คือ ระยะที่วัดจากแกนสะเทินถึงผิวด้านบนหรือผิวด้านล่างของคาน
 I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซียของพื้นที่หน้าตัดคานรอบแกนสะเทิน

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

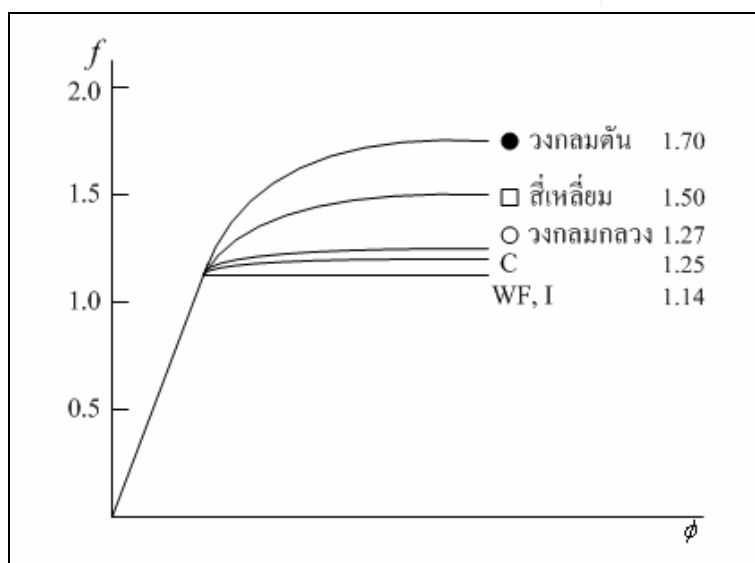
$$f_b = \frac{M}{S} \tag{2.2}$$



รูปที่ 2.15 หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน (Salmon and Johnson, 1996)

เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงดัดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคานจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากของวัสดุ และการกระจายของหน่วยแรงดัดยังคงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.15(b) ค่าโมเมนต์ดัดที่จุดนี้เรียกว่า โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (yield moment, M_y) และถ้าให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ผิวด้านบนสุดและล่างสุดที่มีหน่วยแรงดัดเท่ากับโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ยังคงรับหน่วยแรงเท่าเดิม โดยที่หน่วยแรงดัดที่เพิ่มขึ้นจะถูกต้านทานโดยส่วนของหน้าตัดที่อยู่ใกล้แกนสะเทินมากขึ้น และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดคานมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงครากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.15(c) สุดท้ายทุกตำแหน่งบนหน้าตัดคานจะมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงคราก ซึ่งเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่า Plastic hinge ดังแสดงในรูปที่ 2.15(d) และหน้าตัดของคานดังกล่าวไม่มีความสามารถในการต้านทานต่อโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นอีก ค่าโมเมนต์ที่ทำให้เกิด Plastic hinge เรียกว่า โมเมนต์พลาสติก (plastic moment, M_p)

อัตราส่วนของโมเมนต์พลาสติก (M_p) ต่อโมเมนต์คราก (M_y) ของเหล็กรูปพรรณจะเป็นค่าอัตราส่วนของกำลังต้านทานโมเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในคาน หลังจากที่หน่วยแรงที่ผิวบนและผิวล่างของคานมีค่าเท่ากับหน่วยแรงคราก และมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างหน้าตัด ดังนั้นจึงเรียกค่าอัตราส่วนนี้ว่า ตัวคูณรูปร่าง (shape factor, f) โดยที่ $f = M_p / M_y$ สำหรับคานหน้าตัดต่าง ๆ มีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยสำหรับคานหน้าตัดรูปร่างนี้มีค่า f ประมาณ 1.25 ซึ่งหมายถึง ค่าโมเมนต์สูงสุดของคานหน้าตัดรูปร่างนี้มีค่าสูงกว่าโมเมนต์ครากอยู่ประมาณ 25%



รูปที่ 2.16 ค่าตัวคูณรูปร่างของคานหน้าตัดต่าง ๆ (Gaylord, Jr. et al., 1992)

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 หรือ จากน้ำหนักบรรทุกคงที่ 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 $\lambda_p \leq \lambda \leq \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดไม่อัดแน่น

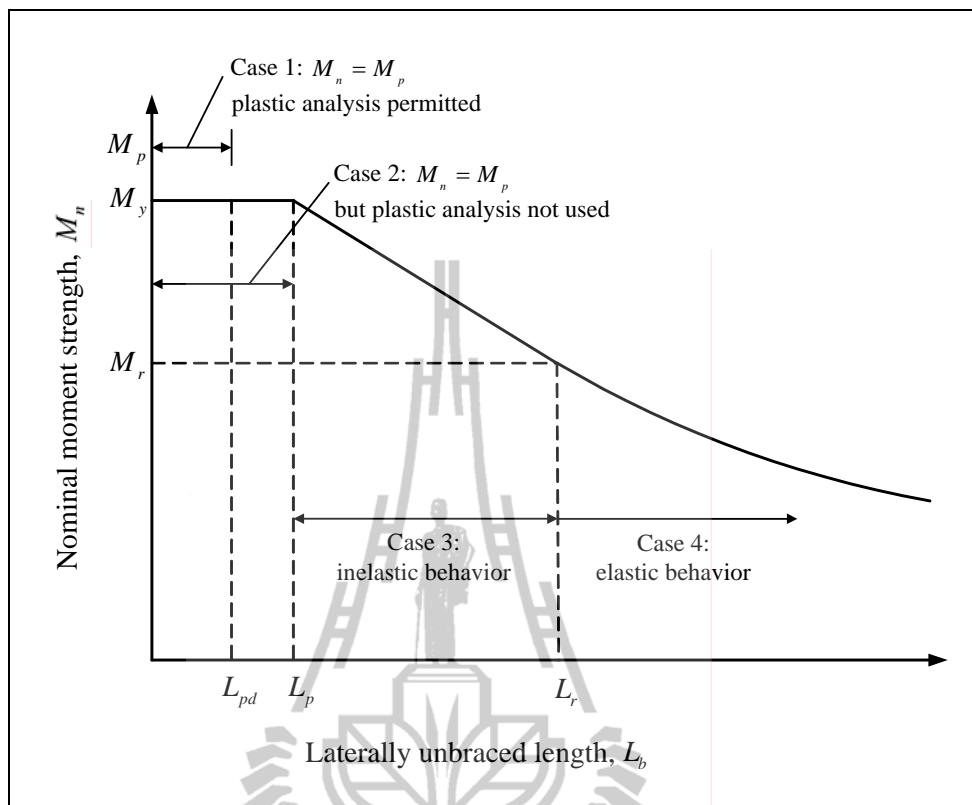
ถ้า $\lambda > \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนระหว่างความกว้างปีกต่อความหนาปีกของหน้าตัดรูปร่างสำหรับจำแนกประเภทคานเหล็กรูปพรรณ

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

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

รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน โดยไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากการโค้งเดาะเฉพาะที่ของปีกหรือเอว มาตรฐาน LRFD ได้ใช้รูปที่ 2.17 เป็นเกณฑ์ในการจำแนกพฤติกรรมของคานเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังโมเมนต์ระบุ และส่วนมากคานที่ออกแบบจะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง Inelastic (case 3) และช่วง Elastic (case 4)



รูปที่ 2.17 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)

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

โดยที่	L_b	คือ	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน
	L_{pd}	คือ	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก
	r_y	คือ	รัศมีไจเรชันรอบแกนรอง
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กgrupพรรณ
	F_y	คือ	หน่วยแรงครากของเหล็กgrupพรรณ

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

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

โดยที่ M_p คือ โมเมนต์พลาสติก

2) เมื่อ $L_b \leq L_p$ และเกิดการหมุนได้น้อย

ในกรณีนี้สามารถทำการวิเคราะห์คานด้วยวิธีอีลาสติก การวิบัติเกิดจากการครากตลอดของหน้าตัด LRFD กำหนดให้ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปรางน้ำ ดังนี้

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

โดยที่ L_p คือ ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$

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

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

เมื่อ $M_p = Z_x F_y$ (2.9)

โดยที่ Z_x คือ โมดูลัสพลาสติก

3) เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$

ในกรณีนี้คานจะมีการบิดร้งด้านข้างที่ไม่เพียงพอ เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$ 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 และรูปรางน้ำ 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	ความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอีลาสติก
F_L	คือ	ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง $(F_{yf} - F_r)$ กับ F_{yw}
F_{yf}	คือ	หน่วยแรงครากของปีก
F_{yw}	คือ	หน่วยแรงครากของเอว
F_r	คือ	หน่วยแรงคงค้างในปีก (สำหรับเหล็กรูปพรรณ $F_r = 69$ 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

ในกรณีที่ค่าโมเมนต์มีค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน (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 และรูปร่างนำ มาตรฐาน LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุ ($M_n < M_r$) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

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

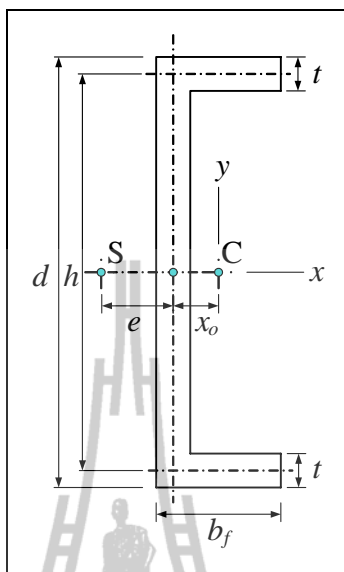
โดยที่	G	คือ	โมดูลัสแรงเฉือน
	I_y	คือ	โมดูลัสอินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด (warping constant)
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด (torsional constant)

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

สำหรับคานเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปรางน้ำ (channel section) ค่าคงที่เนื่องจากการบิด (J) และค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยว (C_w) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.18) และสมการที่ (2.19) ตามลำดับ โดยที่พิกัดฉากของหน้าตัดรูปรางน้ำอ้างอิงจากรูปที่ 2.18

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

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



รูปที่ 2.18 พิกัดของหน้าตัดรูปรางน้ำ

2.3.1.2 คานหน้าตัดไม่อัดแน่น

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

1) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีก (flange local buckling: FLB)

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

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

โดยที่ λ_f คือ ค่าสัดส่วนความชะลูดของปีกคาน

2) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของเอว (web local buckling: WLB)

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

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

โดยที่ λ_w คือ ค่าสัดส่วนความชะลูดของเอวคาน

3) การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

(lateral-torsional buckling: LTB)

ถ้า $L_p < L_b \leq L_r$ เป็นกรณีที่เกิดการวิบัติในช่วงอินอีลาสติก
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 $L_b > L_r$ เป็นกรณีที่เกิดการวิบัติในช่วงอีลาสติก เนื่องจากการ
การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Elastic lateral-torsional buckling กำลังรับโมเมนต์
ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

2.3.2 การอ่อนตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของเหล็กรูปพรรณ

การคำนวณออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับแรงดัด นอกจากพิจารณาออกแบบ
ให้มีกำลังต้านทานเพียงพอแล้ว ต้องพิจารณาให้ชิ้นส่วนขององค์อาคารไม่เกิดการอ่อนตัว
(deflection) มากเกินไปในขณะที่รับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน จนเป็นเหตุให้โครงสร้างไม่สามารถ
ใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ (functionally obsolete) ซึ่งมีผลกระทบต่อความรู้สึกของผู้ใช้อาคาร
ตลอดจนมีผลกระทบต่อชิ้นส่วนที่ไม่ใช่โครงสร้าง (non-structural element) และที่เป็นชิ้นส่วน
โครงสร้าง (structural element)

โดยทั่วไป ในการออกแบบโครงสร้างควรมีการจำกัดการแอ่นตัวของโครงสร้างไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไปเนื่องจาก

- 1) การแอ่นตัวที่มีค่าสูงเกินไป อาจทำให้วัสดุขาดหรือส่วนของโครงสร้างที่ถูกรองรับโดยโครงสร้างดังกล่าว เช่น ผนังที่กั้นห้องหรือเพดานเกิดการแตกร้าวเสียหาย
- 2) การแอ่นตัวที่มีค่าสูงเกินไปอาจทำให้รูปร่างของโครงสร้างเสียหายและขาดความสวยงาม
- 3) โครงสร้างที่มีการแอ่นตัวที่สูงเกินไป เป็นโครงสร้างที่เกิดการสั่นสะเทือน (vibration) ได้ง่าย และทำให้ผู้ใช้อาคารดังกล่าวรู้สึกถึงความไม่ปลอดภัย

การคำนวณหาระยะการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของโครงสร้างหรือค่าระยะการแอ่นตัวที่มากที่สุด ขึ้นกับค่าความโค้ง (curvature, ϕ) ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่สอดคล้องกับโมเมนต์ดัดภายใต้สภาวะนั้น ๆ โดยที่ค่าความโค้งมีค่าเท่ากับ M / EI ตามทฤษฎีอิลาสติก ซึ่งค่า EI เป็นค่าสติฟเนสของส่วนโครงสร้าง ดังนั้น จากทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli (Euler-Bernoulli beam theory) ระยะการแอ่นตัวดังกล่าวขึ้นกับไดอะแกรมของ M / EI หรือขึ้นกับรูปแบบน้ำหนักที่กระทำ ความยาวช่วงคาน และลักษณะของจุดรองรับ ซึ่งสมการเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่	Δ	คือ	ระยะการแอ่นตัว
	α	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจุดรองรับ ดังแสดงในตารางที่ 2.5
	W	คือ	น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน
	I	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซีย

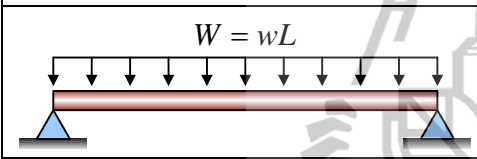
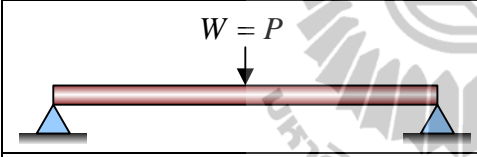
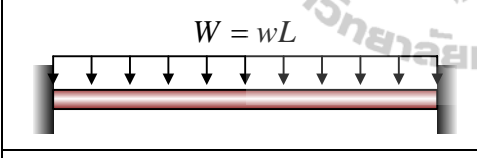
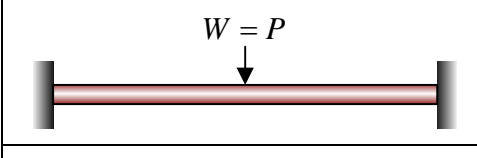
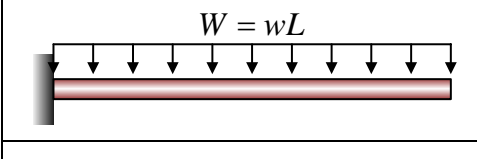
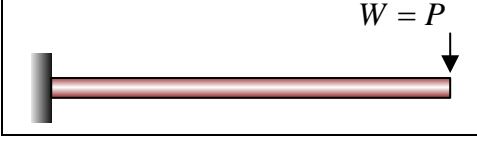
มาตรฐาน LRFD กล่าวว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างขององค์อาคารภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน ต้องไม่มีผลกระทบต่อลักษณะการใช้งานของโครงสร้าง (AISC 350, 1999) โดยกำหนดระยะการแอ่นตัวสูงสุดที่ยอมให้ (Δ_{allow}) ดังต่อไปนี้

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

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

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

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์ α และระยะการเอนตัวสูงสุด

แรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับ	α	Δ_{max}
	$\frac{5}{384}$	$\frac{5wL^4}{384EI}$
	$\frac{1}{48}$	$\frac{PL^3}{48EI}$
	$\frac{1}{384}$	$\frac{wL^4}{384EI}$
	$\frac{1}{192}$	$\frac{PL^3}{192EI}$
	$\frac{1}{8}$	$\frac{wL^4}{8EI}$
	$\frac{1}{3}$	$\frac{PL^3}{3EI}$

2.3.3 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน

คู่มือการออกแบบ โครงสร้างพลาสติก (structural plastic design manual) โดยสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน (American Society of Civil Engineers: ASCE) (ASCE, 1984) ได้นำเสนอสมการสำหรับการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดทำจากวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใย โดยคู่มือออกแบบดังกล่าวได้อ้างอิงจากมาตรฐานการออกแบบ โครงสร้างเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD อย่างไรก็ตาม จากการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะการวิบัติชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัด wide-flange ภายใต้แรงดัดของ Davalos, Qiao, and Salim (1997); Qiao et al. (1999) พบว่าโดยส่วนมาก คานและชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากวัสดุ CFRP จะเกิดการวิบัติแบบ โกงเดาะ (buckling failure) ก่อนการวิบัติเนื่องจากการล้มตัวของวัสดุ (material failure) สาเหตุเนื่องจาก วัสดุ CFRP มีคุณสมบัติแบบ Orthotropic material ซึ่งต่างจากเหล็กรูปพรรณที่มีพฤติกรรม แบบ Isotropic material ตลอดจนวัสดุ CFRP มีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน อยู่ในช่วงประมาณ 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่น ต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 2.6 (Omidvar, 1998) ส่งผลให้การตอบสนองทางโครงสร้างของคาน และชิ้นส่วนรับแรงดัดที่ทำจากวัสดุ CFRP เกิดการ โกงเดาะได้ง่าย (Kim et al., 2007)

ASCE (1984) ได้นำเสนอสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัด สำหรับคาน ที่วิบัติเนื่องจากการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) กำลังรับโมเมนต์ ดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ (2.27) นอกจากนี้ พบว่าสมการดังกล่าวเป็นสมการเดียวกับ สมการออกแบบคานเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD ดังแสดงในสมการที่ (2.17)

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

2.3.4 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน CFRP

จากคู่มือการออกแบบ (design manual) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน โครงสร้าง ที่ทำจากวัสดุ CFRP ที่เผยแพร่ออกมา ในส่วนของสมการออกแบบที่มีลักษณะเกี่ยวข้องกับหน้าตัด รูปรางนํ้าภายใต้แรงดัดยังมีจำนวน ไม่มากนัก อาจเป็นเพราะเหตุผลด้านกลยุทธ์ทางการค้า ของแต่ละบริษัท เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน CFRP ส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมที่เน้น ด้านเชิงพาณิชย์มากกว่างานด้านวิจัยและตีพิมพ์เผยแพร่ สืบเนื่องจากการที่ยังไม่มีมาตรฐาน ขององค์กรหรือหน่วยงานใด ๆ นำเสนอข้อกำหนดหรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบ ชิ้นส่วนโครงสร้างต่าง ๆ ของวัสดุ CFRP อย่างชัดเจน

1) Creative Pultrusions

Creative Pultrusions (2004) ได้เสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ หรือน้ำหนักวิกฤต (P_{cr}) สำหรับคานยื่น (cantilever beam) โดยมีน้ำหนักกระทำที่ด้านปลาย (tip-load) ของคาน ดังแสดงในสมการที่ (2.28)

$$P_{cr} = \gamma \frac{\sqrt{EI_y GJ}}{L^2} \quad (2.28)$$

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

$$\kappa = \frac{GJL^2}{I_w} \quad (2.30)$$

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

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

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

น้ำหนักโคงเคาะดังกล่าวสามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน และใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ของโมเมนต์สำหรับทำนายความสามารถในการต้านทานการโคงเคาะด้านข้างของหน้าตัดรูปร่างสำหรับจูดรองรับในแบบต่าง ๆ

2) Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG)

MMFG (1994) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโคงเคาะ (F_u) ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่าง ดังสมการ

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

ดังนั้นหน่วยแรงคดที่ยอมให้ (F_b) มีค่าดังสมการ

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

โดย MMFG กำหนดให้คานมีค่าตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2.5

3) Bedford Reinforced Plastics

Bedford Reinforced Plastics (2006) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโคงเคาะที่ยอมให้ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่าง ดังสมการ

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

โดยที่ b_c คือ ความกว้างปีกลบด้วยความหนาของปีก ($b_f - t_f$)

อย่างไรก็ตาม สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงคดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน PFRP ตามที่ได้เสนอมานี้ อาจไม่มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประมาณค่าน้ำหนักโคงเคาะของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่าง เหตุเนื่องจากสมการที่ (2.28) เป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโคงเคาะสำหรับคานยื่น (cantilever beam) หน้าตัดของรูปร่างของ Creative

Pultrusions (2004) โดยสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pandey, Kabir, and Sherbourne (1995) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะของคานยื่น (cantilever beam) ที่มีหน้าตัดรูปตัว I นอกจากนี้ สมการที่ (2.33) และสมการที่ (2.35) เป็นสมการสำหรับประมาณหน่วยแรงโก่งเดาะที่ยอมให้ (F_y) ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างของบริษัท MMFG (1994) และ Bedford Reinforced Plastics (2006) ตามลำดับ โดยทั้งสองสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากสมการสำหรับการคำนวณหน่วยแรงวิกฤต (critical stress) ที่ทำให้คานเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกเท่านั้นซึ่งอยู่ในทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ (Gaylord et al., 1992)

2.3.5 การแอ่นตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดสำหรับวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัด

โดยทั่วไป วัสดุ PFRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง (Bank, 1989a) โดยมีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วงระหว่าง 8-27 เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กรูปพรรณซึ่งมีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนประมาณ 2.6 (Omidvar, 1998) ส่งผลให้การออกแบบคาน PFRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) (Bank, 1987; Mallick, 1988)

ระยะการแอ่นตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดสำหรับวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของวัสดุ โดยระยะการแอ่นตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) (Timoshenko, 1921) ในทฤษฎีคานของ Timoshenko กล่าวว่าความโค้งขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ 2 ส่วน ได้แก่ การแอ่นตัวตามขวาง (transverse deflection, δ) ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของแรงดัดร่วมกับแรงเฉือน (bending and shearing) และความชัน (slope, ϕ) ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของแรงดัด โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ได้ดังนี้

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

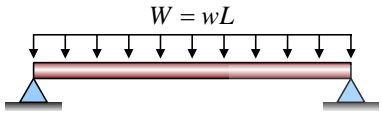
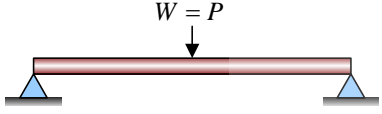
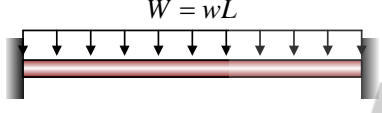
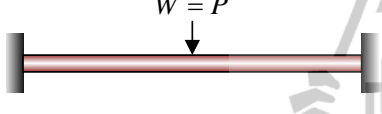
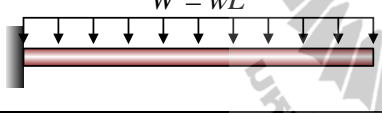
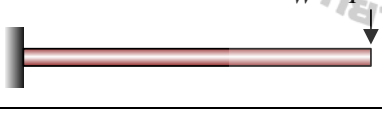
$$\frac{dy}{dz} - \phi = -\frac{V_y}{KAG} \quad (2.37)$$

โดยทั่วไป สภาวะเงื่อนไขของจตุรรองรับ (boundary condition) สำหรับการแอ่นตัว และความชันที่ใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko จะเหมือนกับที่ใช้ในทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli (Euler-Bernoulli beam theory) โดยรูปแบบผลเฉลยของสมการที่ (2.36) และสมการที่ (2.37) สามารถเขียนได้เป็นสมการที่ (2.38) และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวเห็นได้ว่าการแอ่นตัวโดยรวม (total deflection) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของการแอ่นตัวเนื่องจากแรงคด (bending deflection) และการแอ่นตัวจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งระยะการแอ่นตัวดังกล่าวขึ้นอยู่กับรูปแบบน้ำหนักบรรทุกที่กระทำ ความยาวช่วงคานและลักษณะเงื่อนไขของจตุรรองรับ

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

โดยที่	y	คือ	ระยะการแอ่นตัว (Δ)
	α	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงคด ดังแสดงในตารางที่ 2.6
	β	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงกระทำภายนอกและลักษณะของจตุรรองรับจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ดังแสดงในตารางที่ 2.6
	EI	คือ	Flexural rigidity
	KAG	คือ	Transverse shear rigidity

ตารางที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์ α และ β และระยะการแอ่นตัวสูงสุด

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

สำหรับการคำนวณหาระยะการแอ่นตัวในสมการที่ (2.38) ให้พิจารณาว่าคุณสมบัติของส่วนปีกและเอวมี่ค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน โดยที่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของคาน CFRP หาได้จากสมการที่ (2.39) และสมการที่ (2.40) ตามลำดับ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

โดยที่ A_{web} คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว
 $G_{LT(web)}$ คือ โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของเอว

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

2.4 การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงดัด

Mottram (1992) ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) หรืออาจเรียกว่า การโก่งเคาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I โดยผลการทดสอบที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองสำหรับการประมาณน้ำหนักบรรทุกโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิดโดยใช้วิธี Finite Difference นอกจากนี้ได้เสนอว่า เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน การวิเคราะห์และออกแบบคานหรือชิ้นส่วนรับแรงดัดของพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือนเสมอ เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง

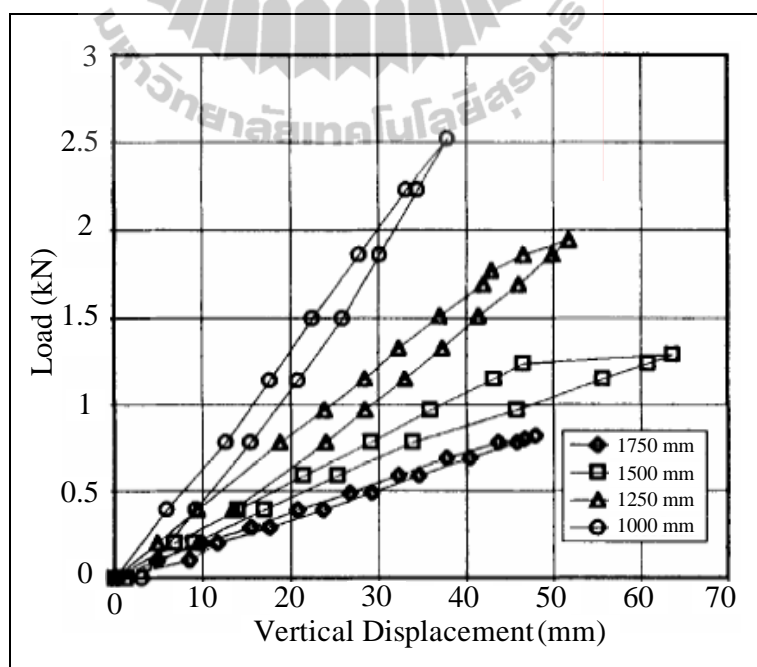
Brooks and Turvey (1995) นำเสนอผลการทดสอบและสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเคาะ (buckling load) สำหรับการโก่งเคาะด้านข้างของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัด ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัว I ที่ใช้มีขนาดลึก 102 mm กว้าง 51 mm และหนา 6.4 mm รหัส EXTRENTM 500 series ซึ่งผลิตโดยบริษัท

Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG) ความยาวของตัวอย่างคานมีค่าเท่ากับ 1000 1250 1500 และ 1750 mm จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I มีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงค่าน้ำหนักโก่งเดาะของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ลักษณะการวิบัติของคานเป็นแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ น้ำหนักโก่งเดาะหรือน้ำหนักบรรทุกวิกฤต (P_{cr}) สำหรับการโก่งเดาะด้านข้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.46) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกโก่งเดาะที่ทดสอบได้

$$P_{cr} = \gamma_2 \frac{\sqrt{E_L I_y GJ}}{L^2} \quad (2.46)$$

เมื่อ

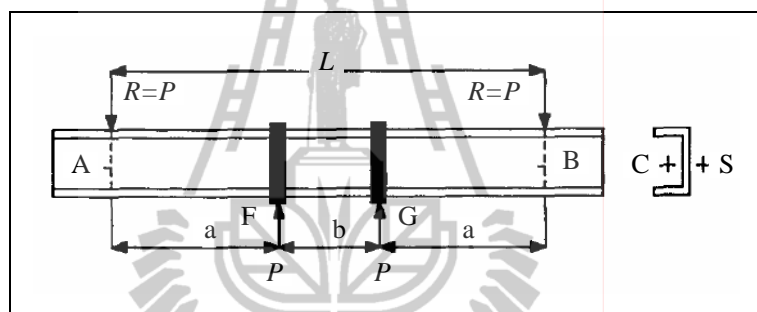
$$\gamma_2 = \frac{4.013}{\left(1 - \sqrt{\frac{(E_L t_f h^2 b^3 / 24)}{L^2 GJ}}\right)^2} \quad (2.47)$$



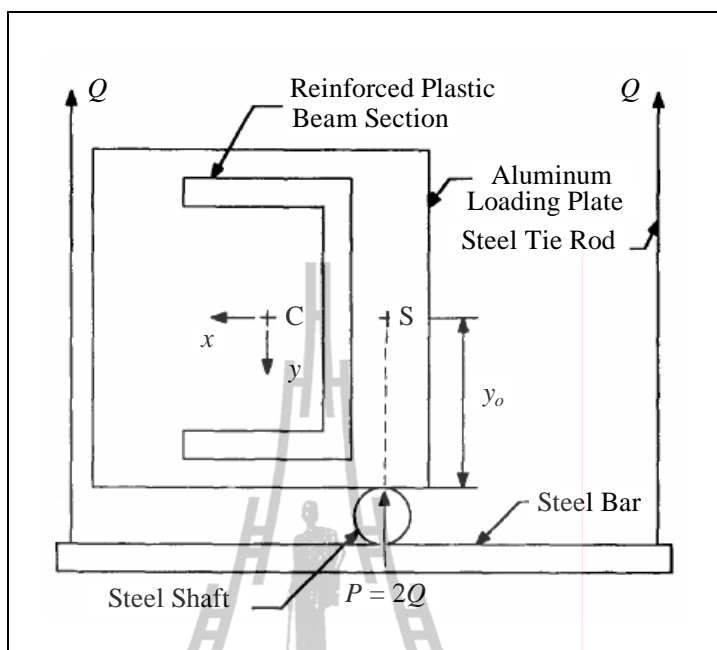
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคาน

(Brooks and Turvey, 1995)

Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani (1996) นำเสนอผลการทดสอบและสมการคำนวณทางทฤษฎีของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel section) โดยเน้นพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 4 จุด (four-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แรงกระทำจะกระทำผ่านจุด Shear center โดยผ่านแผ่นอลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยมีจุดรองรับแบบ Simply supported ตัวอย่างคานหน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ทดสอบมีขนาดลึก 152.4 mm กว้าง 41.3 mm และหนา 6.35 mm ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion และมีความยาวเท่ากับ 1520 1830 2130 2440 และ 2740 mm



รูปที่ 2.20 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปร่างน้ำภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด (Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)



รูปที่ 2.21 ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ
(Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)

จากผลการทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปร่างนี้มีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงน้ำหนักโก่งเดาะของคาน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทั้งหมดเป็นการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ในงานวิจัยได้นำเสนอสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ (approximate buckling load formula, P_{cr}) ของคานซึ่งแรงกระทำที่กระทำผ่านจุด Shear center โดยใช้วิธี Rayleigh-Ritz method ดังแสดงในสมการที่ (2.48) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ค่าของน้ำหนักโก่งเดาะสอดคล้องกับน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้

$$P_{cr} = \frac{0.5[-f_2 + f_2^2 + 4f_1f_3]}{f_1} \quad (2.48)$$

$$\text{เมื่อ} \quad f_1 = \frac{1}{16} \left[f(a) - \frac{\pi^2 a^2}{L^2} - \frac{2\pi a}{L} g(a) \right]^2 \quad (2.49)$$

$$f_2 = \frac{\pi^4 E_{11} I_y}{4L^3} y_0^* \sin^2\left(\frac{\pi a}{L}\right) \quad (2.50)$$

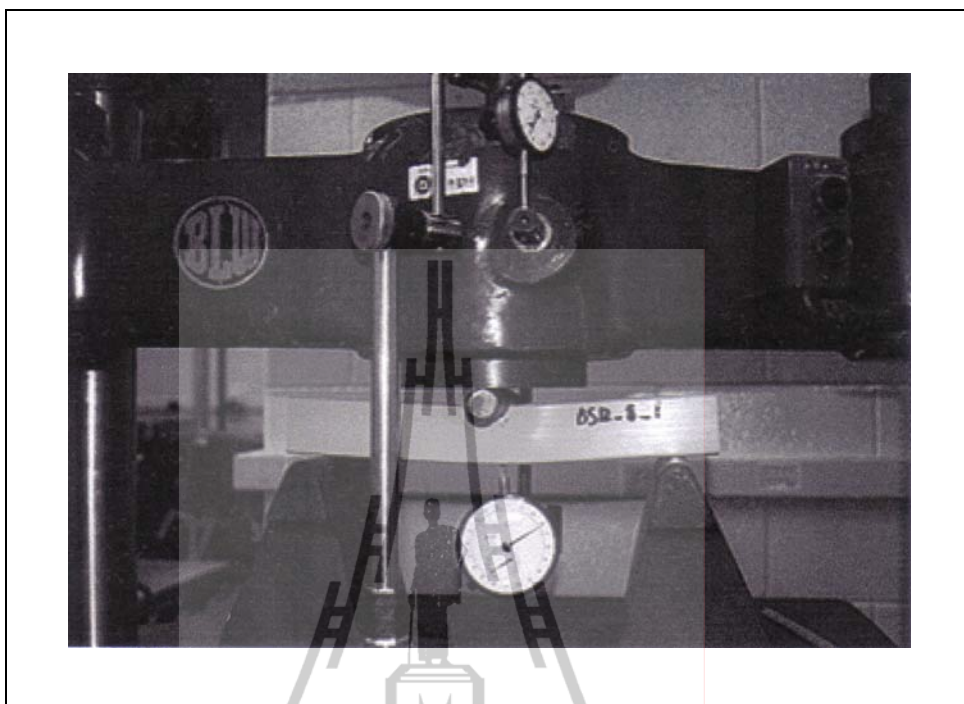
$$f_3 = \frac{\pi^6 E_{11} I_y}{16L^4} \left[\frac{\pi^2 E_{11} C_w}{L^2} + G_{12} J \right] \quad (2.51)$$

$$f(a) = \frac{\pi a}{L} \sin\left(\frac{2\pi a}{L}\right) - \sin^2\left(\frac{\pi a}{L}\right) \quad (2.52)$$

$$g(a) = \frac{1}{2} \left[\pi \left(1 - \frac{2a}{L}\right) - \sin \pi \left(1 - \frac{2a}{L}\right) \right] \quad (2.53)$$

โดยที่	a	คือ	ระยะห่างระหว่างแรงกระทำและจุดรองรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.20
	E_{11}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย
	G_{12}	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย
	y_0^*	คือ	ระยะห่างระหว่างแรงกระทำถึงแกนสะเทิน ดังแสดงในรูปที่ 2.21
	I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด

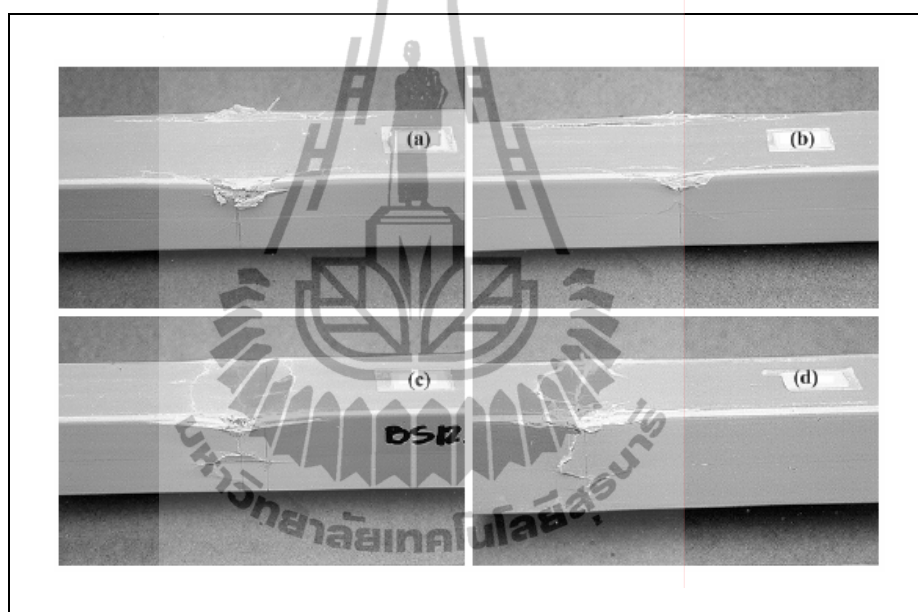
Seangatith (2002) ศึกษาพฤติกรรมทางกลและลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกต่ำ (low span-to-depth ratio) ที่มักถูกนำไปใช้ในกรณีของราวกันตก (guard rail) และราวสะพาน (bridge rail) การทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D198-99 ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อหาความสามารถและการตอบสนองของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลางภายใต้แรงดัด ได้แก่ กำลังรับแรงดัดประลัย (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (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 2.22 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง
ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

จากผลการทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกค้ำสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมเชิงเส้นตรง (linear) พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear) และพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้า (progressive failure) ในส่วนของพฤติกรรมเชิงเส้นตรงมีค่าถึง 35-75% ของน้ำหนักบรรทุกทุกประลัย สำหรับอัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำของหน้าตัดต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าของคานเหล็กรูปพรรณ ดังนั้น อิทธิพลเนื่องจากการแ่นตัวเนื่องจากแรงเฉือนจะมีค่าสูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำของหน้าตัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดคานพลาสติกเสริมเส้นใยไม่ได้พิจารณาเป็นคุณสมบัติของตัวเนื้อวัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของหน้าตัด ตลอดจนลักษณะการจัดวางเส้นใย โดยโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าน้อยกว่าเหล็กรูปพรรณอยู่ 7 ถึง 9 เท่า ดังนั้น การแ่นตัวของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมหลักในการการออกแบบหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใย

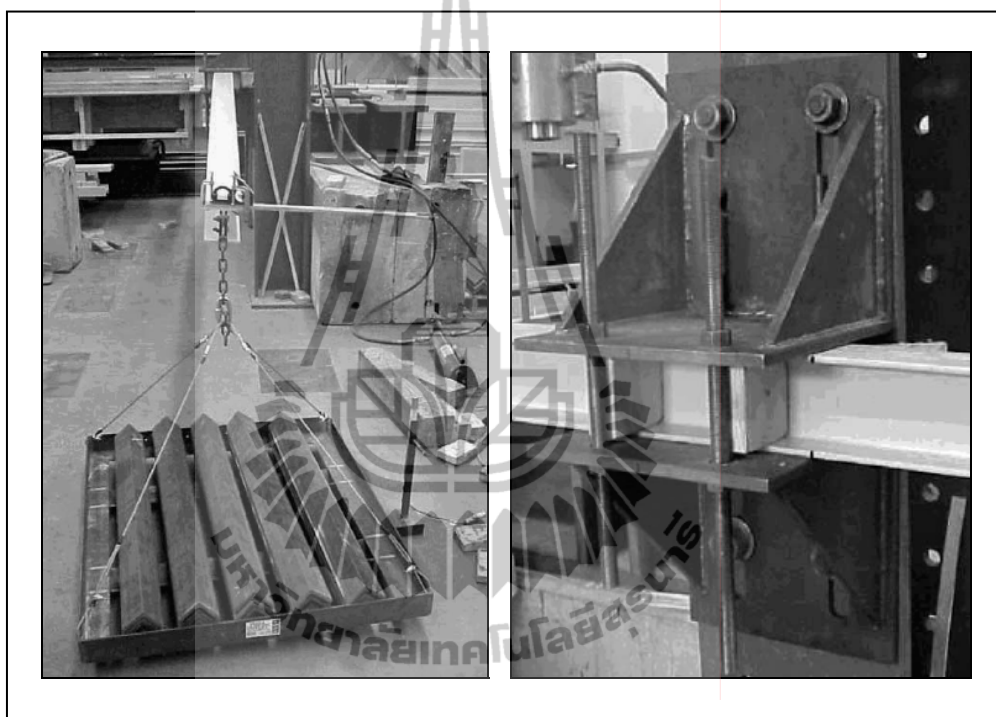
ในช่วงที่พฤติกรรมไม่เป็นเชิงเส้นตรง การวิบัติของคานเริ่มจากการบดแตกของส่วนเอว (web crushing) ที่บริเวณจุดที่น้ำหนักกระทำ ตามด้วยการแตกตามแนวยาวตลอดแนวของรอยต่อระหว่างส่วนปีกตอนบนและส่วนเอวในลักษณะของพฤติกรรมการวิบัติแบบก้ำวหน้า ซึ่งแตกต่างจากการวิบัติของวัสดุเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 2.23 พฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงที่นำมาทดสอบตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของหน่วยแรงเข้มข้น (stress concentration) บริเวณจุดที่น้ำหนักบรรทุกกระทำ ซึ่งควรให้ความสนใจและคำนึงถึงในการออกแบบ อาทิเช่น ราวกันตกและราวสะพาน



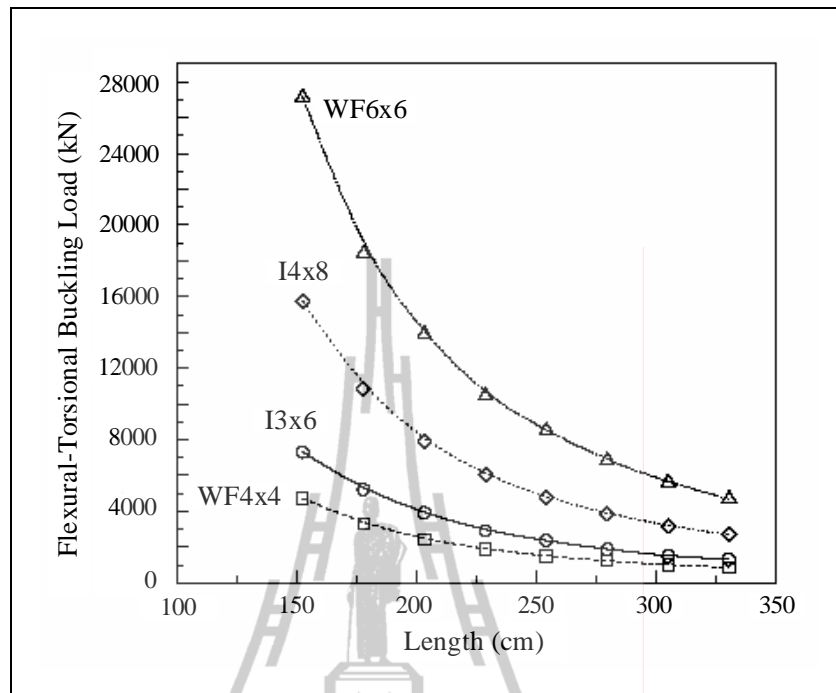
รูปที่ 2.23 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวง ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

Qiao, Zou, and Davalos (2003) นำเสนอผลการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I โดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งคานเนื่องจากการตัดร่วมนกับการบิด 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 2.24 จากผลการทดสอบพบว่าน้ำหนักโก่ง

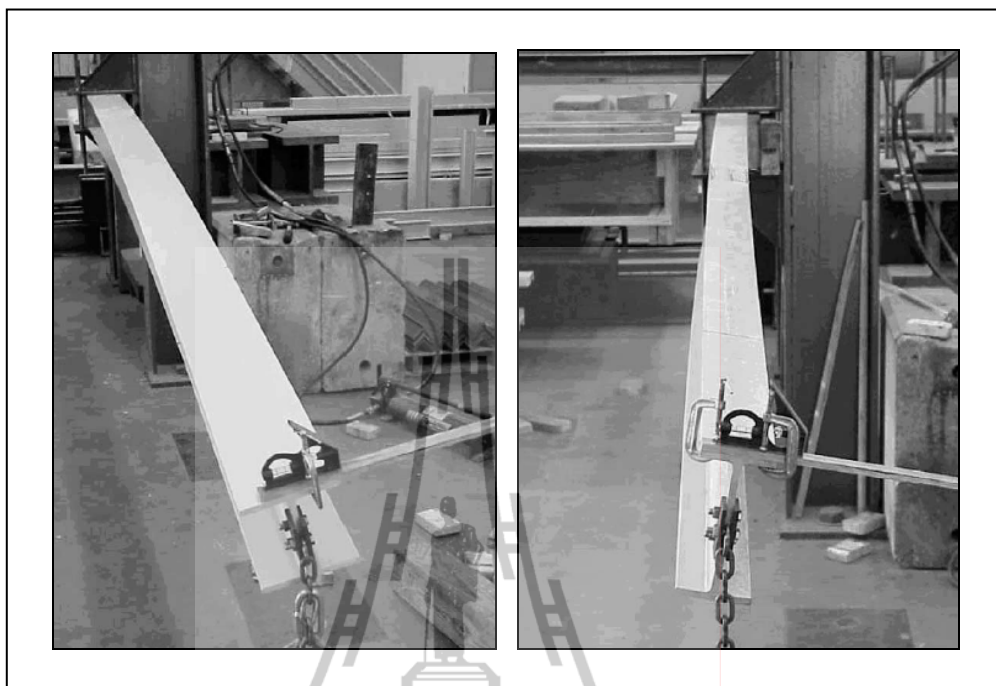
เดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling load, P_{cr}) มีค่าลดลงเมื่อคานมีความยาวเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.25 และตัวอย่างหน้าตัดรูป wide-flange มีความสามารถต้านทานแรงกระทำสูงกว่าคานหน้าตัดรูปตัว I โดยขึ้นโมเมนต์อินเนอร์เซียรอบแกนรองและความยาวของตัวอย่างทดสอบ นอกจากนี้ ลักษณะการวิบัติของคานทุกตัวอย่างเป็นแบบการโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.24 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I
(Qiao, Zou, and Davalos, 2003)

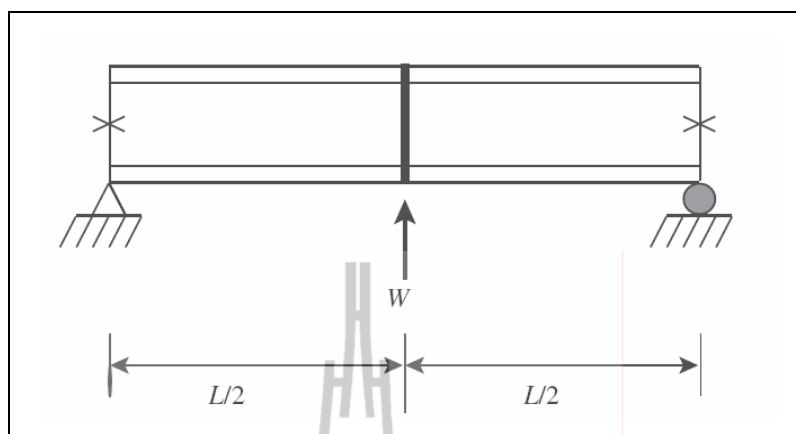


รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด และความยาวของตัวอย่างทดสอบ (Qiao, Zou, and Davalos, 2003)



รูปที่ 2.26 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 2.27 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) สำหรับการออกแบบโครงสร้างเหล็กโดยวิธีคุณสมบัติความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design: LRFD) (AISC 350, 1999) โดยการดัดแปลงดังกล่าวใช้หลักการสมดุล (equilibrium approach) สำหรับแก้สมการอนุพันธ์ (differential equation)



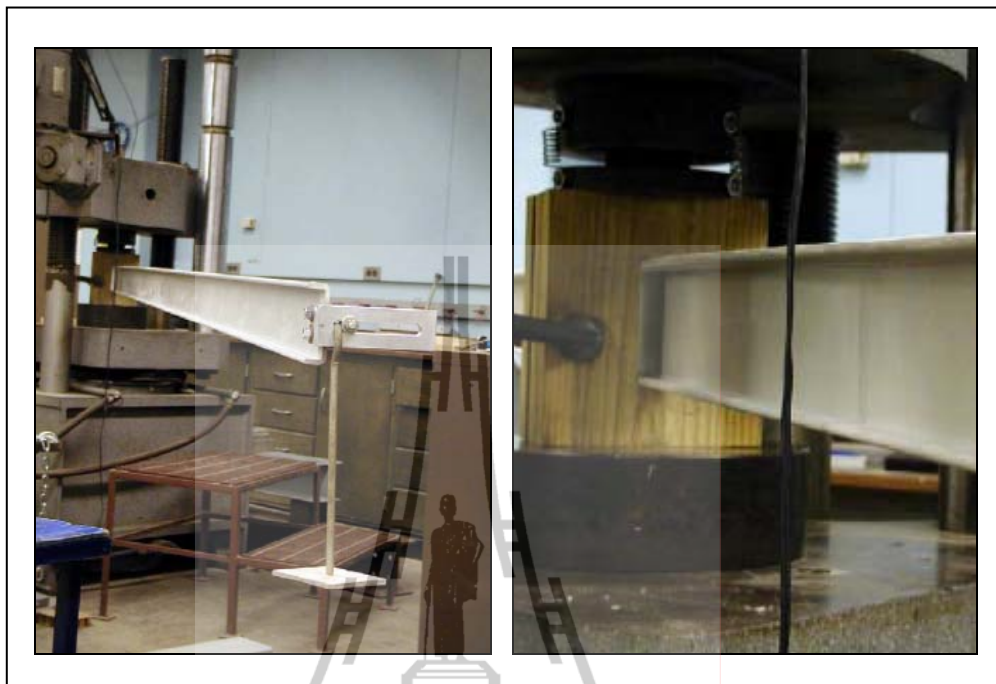
รูปที่ 2.27 แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Sirjani and Razzaq, 2005)

จากผลการศึกษา พบว่าตัวอย่างทดสอบมีลักษณะวิบัติแบบโก่งเดาะด้านข้าง โดยปราศจากการแตกหักของเนื้อวัสดุ หรือการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) ตลอดจนผลทดสอบที่ได้ให้ผลสอดคล้องกับสมการดัดแปลง (modified equation) ที่ปรับปรุงจากวิธี LRFD โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ (2.54)

$$M_{\max} = \Gamma \frac{\pi}{L_b} C_b \sqrt{EI_y GJ + \left(\frac{\pi E}{L_b}\right)^2 I_y C_w} \quad (2.54)$$

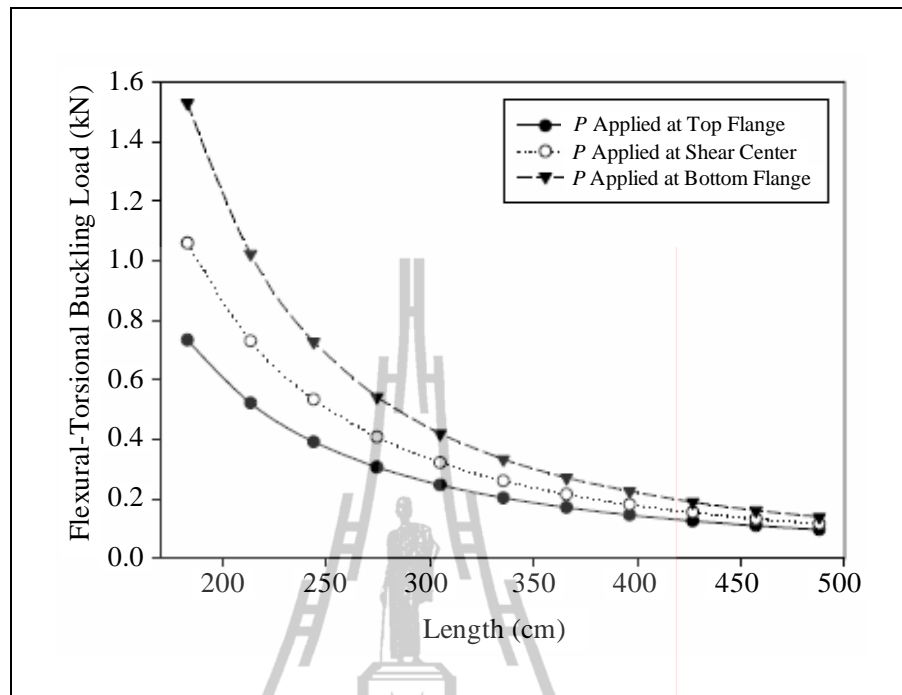
$$\text{เมื่อ} \quad \Gamma = \frac{L}{175} + 0.5715 \quad (2.55)$$

Shan and Qiao (2005) นำเสนอผลการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างนำโดยเน้นศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ตัวอย่างหน้าตัดรูปร่างนำที่ใช้ทดสอบมี 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) เรซินชนิด โพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion ตัวอย่างถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Shear center ของหน้าตัด เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.28

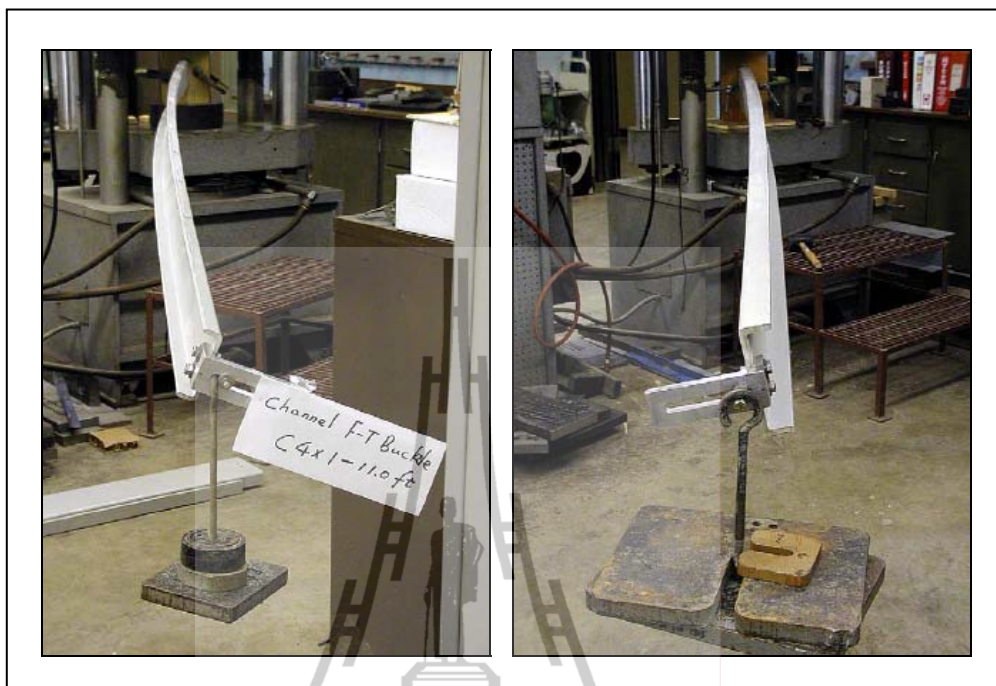


รูปที่ 2.28 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ
ที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำที่ปลายคาน (Shan and Qiao, 2005)

จากผลการทดสอบ พบว่าน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด (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 2.29 นอกจากนี้ ที่น้ำหนักโก่งเดาะ (P_{cr}) ลักษณะการวิบัติของคานทั้งหมดเป็นแบบการโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการตัดร่วมกับการบิด และความยาวของคาน CFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ (Shan and Qiao, 2005)



รูปที่ 2.30 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ (Shan and Qiao, 2005)

2.5 การวิเคราะห์คานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element) เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์กันอย่างกว้างขวาง สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (mechanics of solid) เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล โครงสร้างเครื่องบิน โครงสร้างอาคาร สะพานและโครงสร้างอื่น ๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (elastic) หรืออยู่ในสภาพพลาสติก (plastic) นอกจากการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตย์ศาสตร์ (static) ตามที่กล่าวมาแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ (dynamic) เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล หรือโครงสร้าง รวมทั้งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) การไหลของของไหล (fluid flow) การถ่ายเทมวลและปัญหาทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

การวิเคราะห์โครงสร้างโดยทั่วไปที่ไม่ซับซ้อนมากนัก สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การเปลี่ยนตำแหน่ง (displacements) ที่ตำแหน่งใด ๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ ผลเฉลยที่ได้เรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่ในความ

เป็นจริง ชิ้นส่วนของโครงสร้างจำนวนมากมีรูปร่างลักษณะและแรงที่กระทำซับซ้อนบางบริเวณ โดยอาจมีการเปลี่ยนแปลงของแรงที่กระทำอย่างฉับพลันหรือใช้วัสดุต่างชนิดกัน ทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์สามัญหรือจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการอื่น ๆ เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ อย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วนนั้น ๆ โดยเรียกชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่า อิลลิเมนต์ (element) ผลเฉลยที่ได้รับเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (node) ของแต่ละอิลลิเมนต์ การวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะไม่วิเคราะห์ปัญหาในครั้งเดียวทั้งระบบเช่นวิธีโดยทั่วไปแต่เป็นการวิเคราะห์หาค่าที่ละอิลลิเมนต์แล้วนำผลที่ได้มารวมกันเป็นผลเฉลยของระบบ

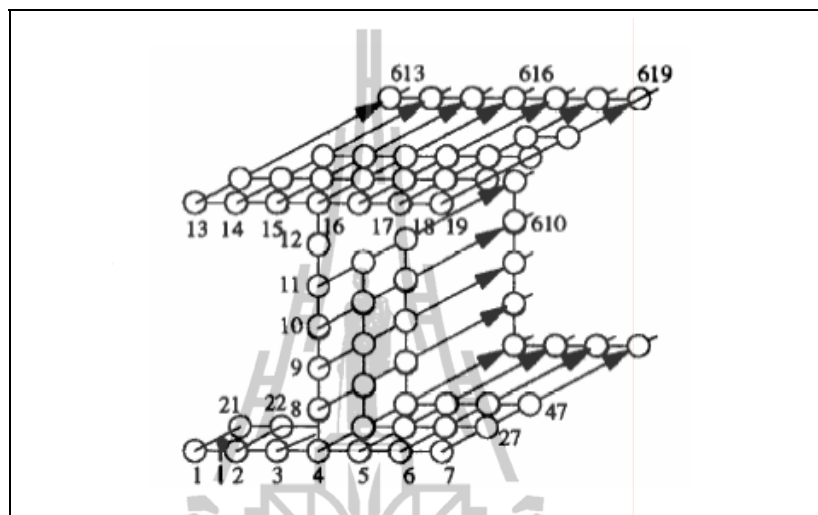
2.5.2 โปรแกรม ANSYS

Moaveni (1999) กล่าวว่าโปรแกรม ANSYS เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปใช้ทางด้านการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของบริษัท ANSYS, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถใช้ได้บนระบบเน็ตเวิร์ก (local area network) หรือบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer: PC) และบนคอมพิวเตอร์แบบกระเป๋าหิ้ว (notebook computer) โปรแกรม ANSYS ออกจำหน่ายครั้งแรกในปี ค.ศ. 1971 ANSYS เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้งานทางด้านการวิเคราะห์ปัญหาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้หลายวัตถุประสงค์อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ในอุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และงานทางด้านนิวเคลียร์ สามารถใช้คำสั่งในการคำนวณได้กว่า 100,000 บรรทัด โปรแกรม ANSYS มีความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านสถิตยศาสตร์ พลศาสตร์ การส่งถ่ายความร้อน การไหลของของไหล และทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetism) สามารถใช้งานได้พร้อมกันหลายหน้าต่างร่วมกัน (multiple window) การใช้งานโปรแกรมจากกราฟิกหน้าจอ (graphic user interface: GUI)

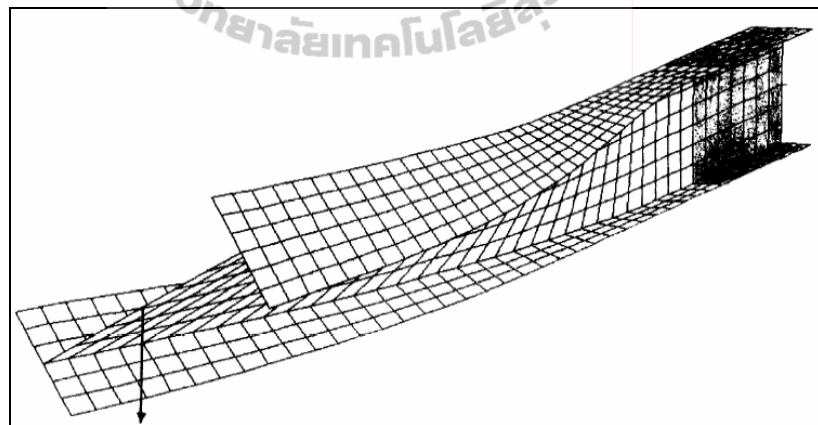
2.5.3 การวิเคราะห์คานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงดัดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Brooks and Turvey (1995) ได้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัว I โดยใช้โปรแกรม ABAQUS แบบจำลองคานถูกจำลองให้มีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.31 แบบจำลองตัวอย่างคานหน้าตัดรูปตัว I มีขนาดลึก 102 mm กว้าง 51 mm และหนา 6.4 mm อิลลิเมนต์ที่ใช้เป็นแบบแผ่น โคง 4 จุด (4 node shell element) ดังแสดงในรูปที่ 2.32 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling เพื่อคำนวณหาหน้าหนักโก่งเดาะ (buckling load) ของตัวอย่างทดสอบ จากการเปรียบเทียบ

ผลที่วิเคราะห์ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทดสอบ พบว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่วิเคราะห์ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าตํ่ากว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบเล็กน้อย นอกจากนี้ ลักษณะของการวิบัติที่วิเคราะห์ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับผลการทดสอบ

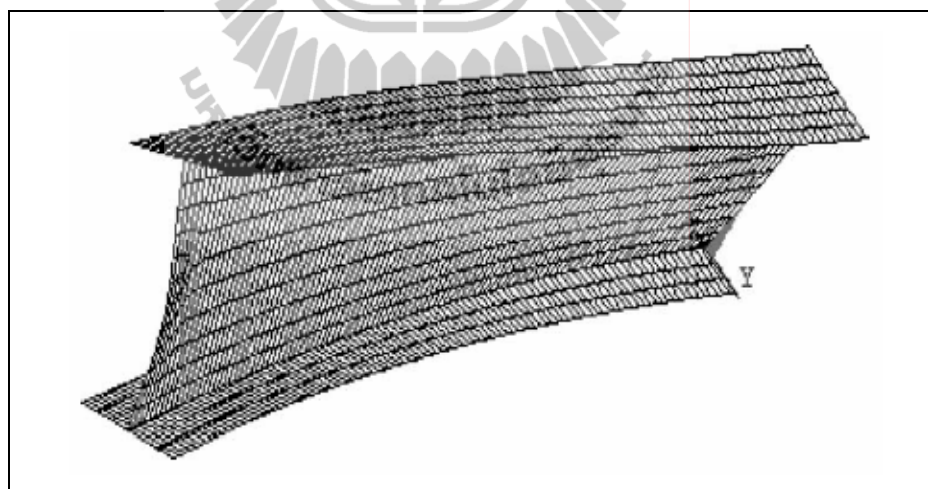


รูปที่ 2.31 แบบจำลองอิลิเมนต์แบบแผ่น โคงง 4 จุด (Brooks and Turvey, 1995)



รูปที่ 2.32 แบบจำลองลักษณะการโก่งเดาะสำหรับคานยื่น (Brooks and Turvey, 1995)

Qiao, Zou, and Davalos (2003) นำเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบและการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I โดยใช้โปรแกรม ANSYS แบบจำลองคานถูกจำลองให้มีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัดตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษามีจำนวน 4 ขนาด ได้แก่ (1) I101.6×203.2×9.5 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 วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นแผ่นโค้ง (shell) แบบ Mindlin 8 node isoparametric (SHELL 99) โดยเอลิเมนต์ดังกล่าวได้คำนึงถึงผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) จากผลการเปรียบเทียบที่ได้รับจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบพบว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้ในห้องปฏิบัติการ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้มีลักษณะแบบ โกงเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แบบจำลองลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I (Qiao, Zou, and Davalos, 2003)

Shan and Qiao (2005) นำเสนอผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบและการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ โดยใช้โปรแกรม ANSYS แบบจำลองคานถูกจำลองให้มีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Shear center ของหน้าตัด ตัวอย่างทดสอบที่ใช้มี 3 ขนาด ได้แก่ (1) C101.6×28.6×6.35 mm (2) C152.4×41.2×6.35 mm และ (3) C152.4×42.8×9.52 mm วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้เป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling เอลิเมนต์ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นแผ่นโค้ง (shell) แบบ Mindlin 8 node isoparametric (SHELL 99) จากผลการเปรียบเทียบที่ได้รับจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบพบว่าน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้มีลักษณะแบบโก่งเดาะเนื่องจากการค้ำร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แบบจำลองลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปรางน้ำ

(Shan and Qiao, 2005)

ดังนั้นงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แสดงให้เห็นว่า การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองพฤติกรรมของคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP ภายใต้แรงค้ำ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์หาค่าน้ำหนักโก่งเดาะของชิ้นส่วนรับแรงค้ำ และลักษณะของการวิบัติ (modes of failure) ได้ใกล้เคียงกับการทดสอบจริง

2.6 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสมการที่ใช้ออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP ภายใต้แรงค้ำส่วนใหญ่มาจากสมการออกแบบเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD และส่วนหนึ่งถูกพัฒนาสมการจากการทดสอบ (empirical formula) รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงค้ำ โดยมีสถานะของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ Cantilever supported Simply supported และ Fixed-end supported อย่างจริงจัง ตลอดจนสมการออกแบบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่มียังไม่มีความสมบูรณ์เพียงพอ จึงเห็นสมควรทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะในการรับแรงค้ำของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ โดยทำการทดสอบความสามารถและการตอบสนองของโครงสร้างในการรับแรงค้ำของคาน FRP ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นนำผลการทดสอบที่ได้มาพัฒนาสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำ และสุดท้ายเปรียบเทียบผลการทดสอบและสมการออกแบบ ที่ได้กับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อเกิดประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



บทที่ 3

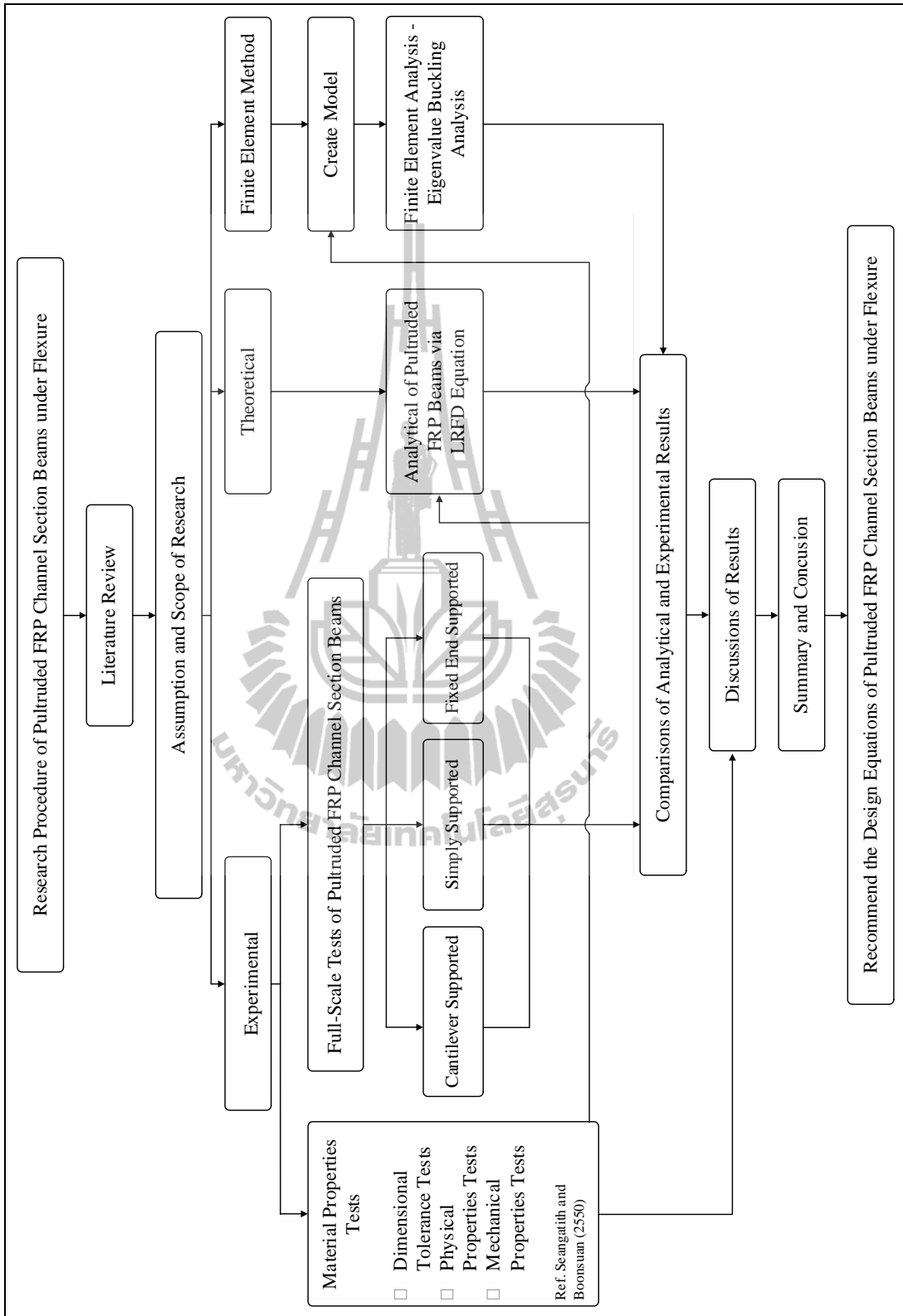
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

บทนี้กล่าวถึงแนวคิด ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัยชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด การศึกษาประกอบด้วย (1) การทดสอบคุณสมบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่าง (2) การทดสอบการรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด และ (3) การวิเคราะห์การกำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างโดยใช้สมการออกแบบโดยวิธี LRFD และวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

การศึกษาประกอบด้วย การทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของวัสดุ FRP และเหล็กgrupพรรณ ขั้นตอนต่อมาทำการเลือกวัสดุที่ผลิตเป็นวัสดุ FRP และเลือกขนาดของหน้าตัดที่ทำการศึกษา จากนั้นจัดหาวัสดุ FRP และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เริ่มทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ และกำลังรับแรงดัดของคานที่ทำจากวัสดุ FRP ในห้องปฏิบัติการ ตัวอย่างคาน FRP หน้าตัดรูปร่างจำนวน 244 ตัวอย่าง ถูกทดสอบ โดยมีจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ (1) จุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) (2) จุดรองรับแบบง่าย (simply supported) และ (3) จุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) จากนั้นนำข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ที่ทดสอบได้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับคำนวณความสามารถในการรับแรงดัดโดยสมการออกแบบของ LRFD และวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling

สุดท้ายเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยสรุปขั้นตอนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP

ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างและการคำนวณทางทฤษฎี ผลการทดสอบวัสดุ มีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการคำนวณทางทฤษฎีได้ถูกนำมาใช้ในการหาสมการสำหรับ ทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) อย่างไรก็ตาม สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้งานได้ ถ้าหากไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ซึ่งได้จากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นขั้นตอน และผลทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุดังกล่าวได้อ้างอิงจากรายงานฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรอด หน้าตัดรูปตัวซี” (สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ หวังแก้ว บุญสวน, 2550) การศึกษาประกอบด้วย การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐาน (basic properties) และ คุณสมบัติทางกลของวัสดุ โดยการทดสอบดังกล่าวถูกกระทำตามมาตรฐาน ASTM และมี รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก.

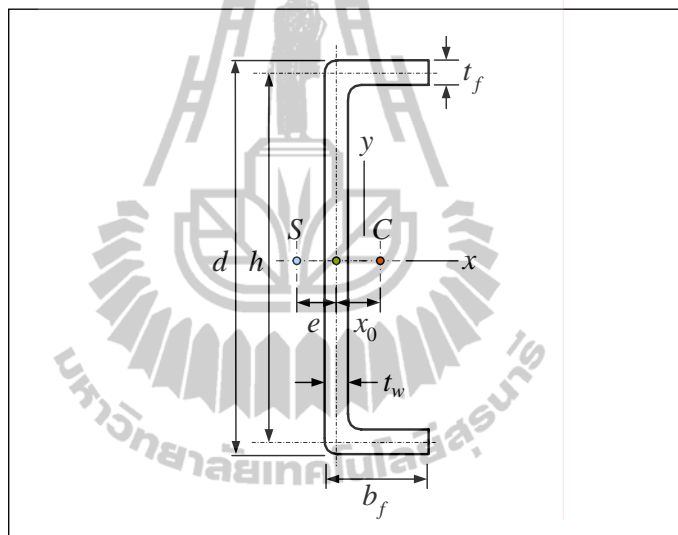
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

จากการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจาก วัสดุ FRP และเหล็กรูปพรรณที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ ได้บทสรุปเกี่ยวกับการให้แรงกระทำ ต่อหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ โดยการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างจะกระทำผ่านจุดศูนย์กลาง แรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัดรางน้ำ เนื่องจากในการคำนวณเชิงทฤษฎี หน้าคานบรรทุก ที่กระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัด ส่งผลให้การวิเคราะห์สมการ ของการโก่งเดาะสำหรับคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำมีความซับซ้อนลดลง โดยที่การวิเคราะห์ ดังกล่าวไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากแรงบิด (torsion) ที่เกิดขึ้นร่วมกับแรงดัด (bending) ระหว่าง ที่โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนตำแหน่ง (displacements) ดังนั้นการทดสอบดังกล่าวจึงมีลักษณะ แบบ Pure bending

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการออกแบบของคานภายใต้แรงดัดของ AISC/ASD (AISC 316-89) และ AISC/LRFD (AISC 350-99) พบว่าสำหรับหน้าตัดที่สมมาตรรอบแกนเดียว (monosymmetric section) เช่น หน้าตัดรูปรางน้ำ สมการของการโก่งเดาะด้านข้าง (lateral buckling) ภายใต้แรงดัดดังกล่าวได้ถูกพิสูจน์ (proof) จากสมมติฐานเบื้องต้นว่า หน้าคานบรรทุกที่กระทำ ต้องกระทำในแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) เท่านั้น (Salmon and Johnson, 1996) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้แรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด ตามเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดรูปร่างน้ำ โดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm รูปที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดหน้าตัดของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างน้ำที่ใช้ในงานวิจัย จากรูปพบว่าจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (จุด S) ของหน้าตัดรูปร่างน้ำอยู่ภายนอกหน้าตัดที่ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางแนวตั้งของหน้าตัดเป็นระยะเยื้อง e โดยระยะดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) (Cook and Young, 1999)

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



รูปที่ 3.2 ลักษณะหน้าตัดรูปร่างน้ำของคาน FRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของหน้าตัดรูปร่างน้ำของคาน FRP

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

3.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิด โพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ (1) $76 \times 22 \times 6$ mm (2) $102 \times 29 \times 6$ mm และ (3) $152 \times 43 \times 10$ mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 5-46 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

ตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 72 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-C-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึง ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำที่มีความลึกจำนวน 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm C หมายถึงลักษณะของจุดรองรับแบบคานยื่นสุดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบโดยมีหน่วยเป็น m ยกตัวอย่าง เช่น C102-C-3.0 หมายถึงคานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น โดยมีขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm และยาว 3.0 m

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C76-C-0.5	$76 \times 22 \times 6$	0.5	6.6	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-0.6	$76 \times 22 \times 6$	0.6	7.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-0.7	$76 \times 22 \times 6$	0.7	9.2	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-0.8	$76 \times 22 \times 6$	0.8	10.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-0.9	$76 \times 22 \times 6$	0.9	11.8	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	13.2	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-1.5	$76 \times 22 \times 6$	1.5	19.7	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-2.0	$76 \times 22 \times 6$	2.0	26.3	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-2.5	$76 \times 22 \times 6$	2.5	32.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-3.0	$76 \times 22 \times 6$	3.0	39.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-C-3.5	$76 \times 22 \times 6$	3.5	46.1	21812	8208	2.660×10^7	2

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C102-C-0.5	$102 \times 29 \times 6$	0.5	4.9	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-0.7	$102 \times 29 \times 6$	0.7	6.9	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-0.8	$102 \times 29 \times 6$	0.8	7.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-0.9	$102 \times 29 \times 6$	0.9	8.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	9.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-1.1	$102 \times 29 \times 6$	1.1	10.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-1.3	$102 \times 29 \times 6$	1.3	12.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	14.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	19.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	24.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	29.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	34.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-C-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	39.2	53996	11088	1.161×10^8	2

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

Specimens	$(d \times b \times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm ⁴)	J (mm ⁴)	C_w (mm ⁶)	Number
C152-C-1.0	$152 \times 43 \times 10$	1.0	6.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.2	$152 \times 43 \times 10$	1.2	7.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.3	$152 \times 43 \times 10$	1.3	8.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.4	$152 \times 43 \times 10$	1.4	9.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.5	$152 \times 43 \times 10$	1.5	9.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.6	$152 \times 43 \times 10$	1.6	10.5	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-1.8	$152 \times 43 \times 10$	1.8	11.8	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-2.0	$152 \times 43 \times 10$	2.0	13.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-2.5	$152 \times 43 \times 10$	2.5	16.4	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	19.7	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-3.5	$152 \times 43 \times 10$	3.5	23.0	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-C-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	26.3	285281	76000	1.379×10^9	2

ขั้นตอนการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

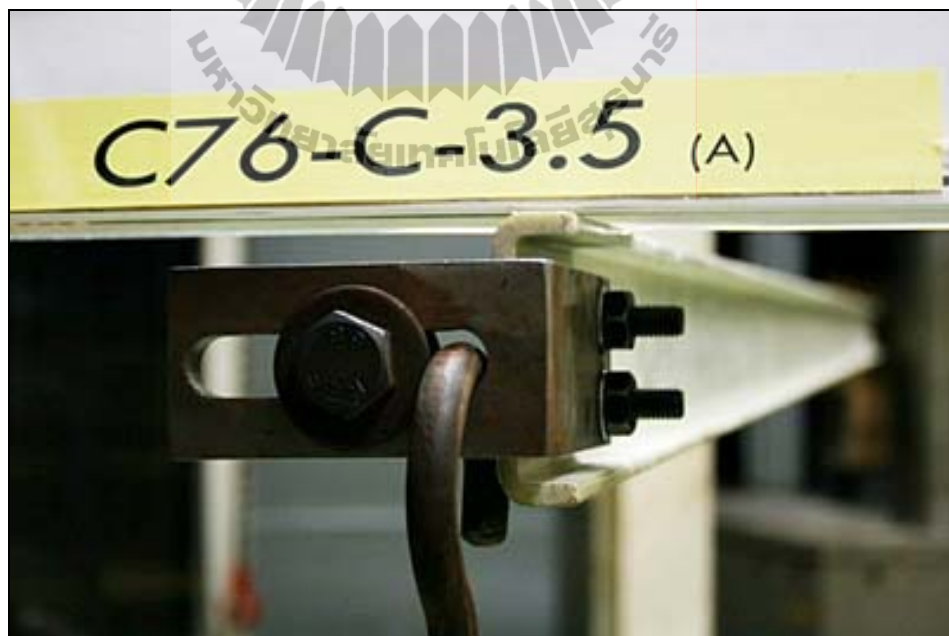
1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ ปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.3

2) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยชุดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นเหล็กฉากถูกแบกรองตามยาว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด

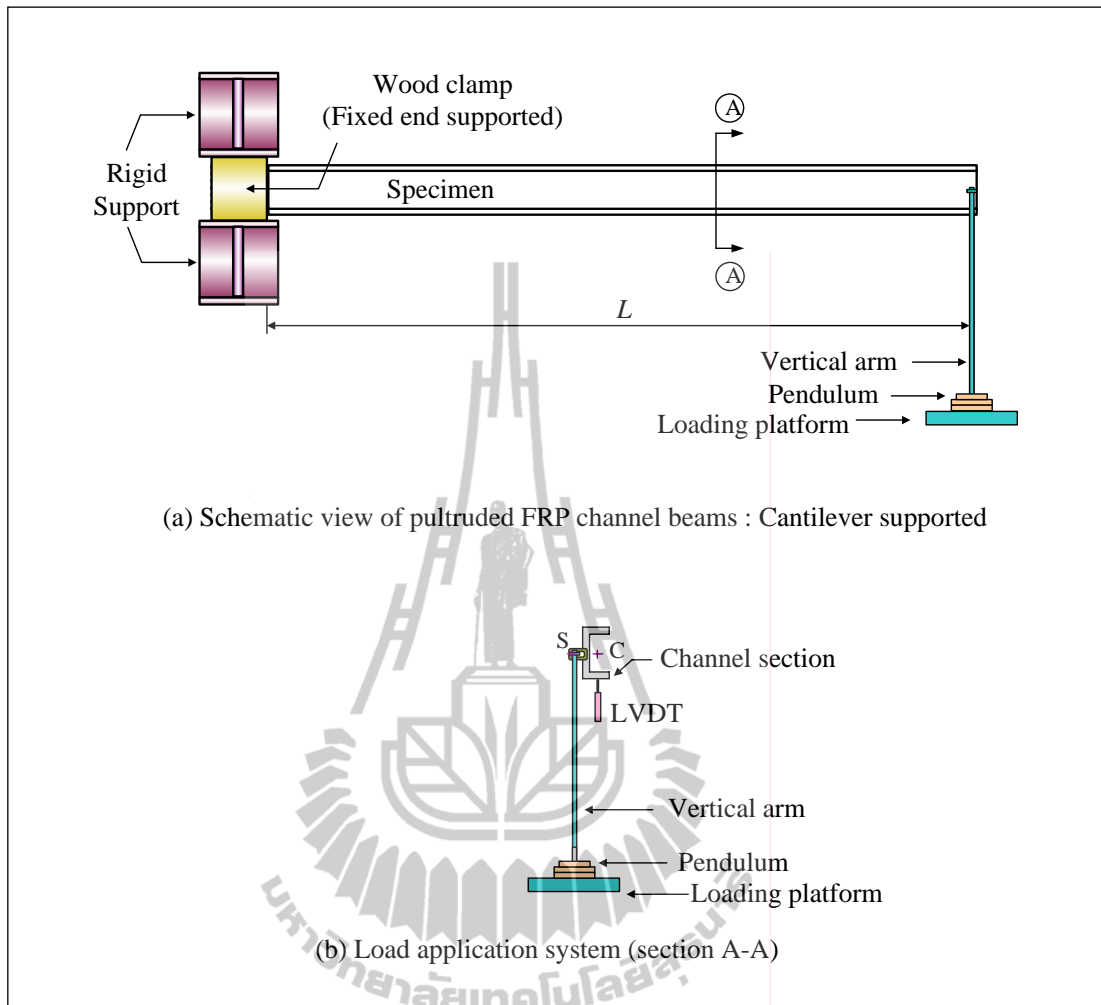
3) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับ โดยปลายด้านหนึ่งของตัวอย่างถูกทำให้ยึดแน่น โดยกล่องไม้เนื้อแข็งสำหรับจับตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการยึดจุดรองรับดังกล่าวโดยให้แรงกดอัดจากเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รูปที่ 3.5 ถึงรูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 3.3 การเจาะรูบริเวณปลายคานเพื่อติดตั้งชุดทดสอบ



รูปที่ 3.4 การติดตั้งชุดให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.5 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรองรับแบบคานยื่น (ปลายยื่น)



รูปที่ 3.7 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรองรับแบบคานยื่น (ด้านยึดแน่น)

4) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำเพื่อเตรียมความพร้อม ดังแสดงในรูปที่ 3.8

5) การอ่านตัวแนวตั้งที่ปลายคาน (vertical tip deflection) ของตัวอย่างถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) โดยติดตั้งที่ปลายบริเวณปีกบน (top flange) ของหน้าตัดรางน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

6) การทดสอบเริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ โดยตุ้มน้ำหนัก (pendulum) และตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.8 การตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ



รูปที่ 3.9 การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งที่ปลายคาน

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของคาน PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำ ภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ 1) $76 \times 22 \times 6$ mm 2) $102 \times 29 \times 6$ mm และ 3) $152 \times 43 \times 10$ mm ตัวอย่างทดสอบมีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) อยู่ระหว่าง 10-53 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 3.5 ถึงตารางที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-S-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำที่มีความลึก 3 ขนาดได้แก่ 76 102 และ 152 mm S หมายถึงลักษณะของจุกรองรับแบบง่าย สุกท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C76-S-2.0 หมายถึงคานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่มีจุกรองรับแบบง่าย ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm และยาว 2.0 m

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

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 3.6 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 3.7 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 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10

2) ติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ ชุดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กถูกเจาะรูสำหรับสลักเกลียว 16 mm (M16) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด

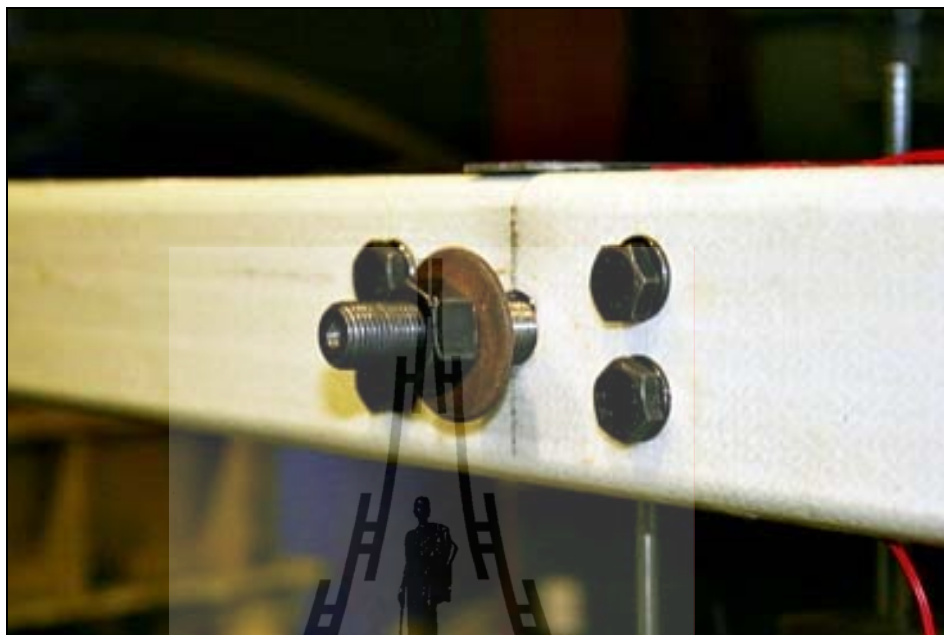
3) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย โดยออกแบบให้จตุรรองรับดังกล่าวเป็นจตุรรองรับแบบไร้แรงเสียดทาน (frictionless) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) รูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.14 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบง่าย

4) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

5) ระยะเวลาแอ่นตัวแนวดิ่ง (vertical deflection) และระยะเวลาแอ่นตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.15

6) ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว บริเวณส่วนปีกบนและปีกล่างของตัวอย่างหน้าตัดรูปร่างนาเพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 3.16

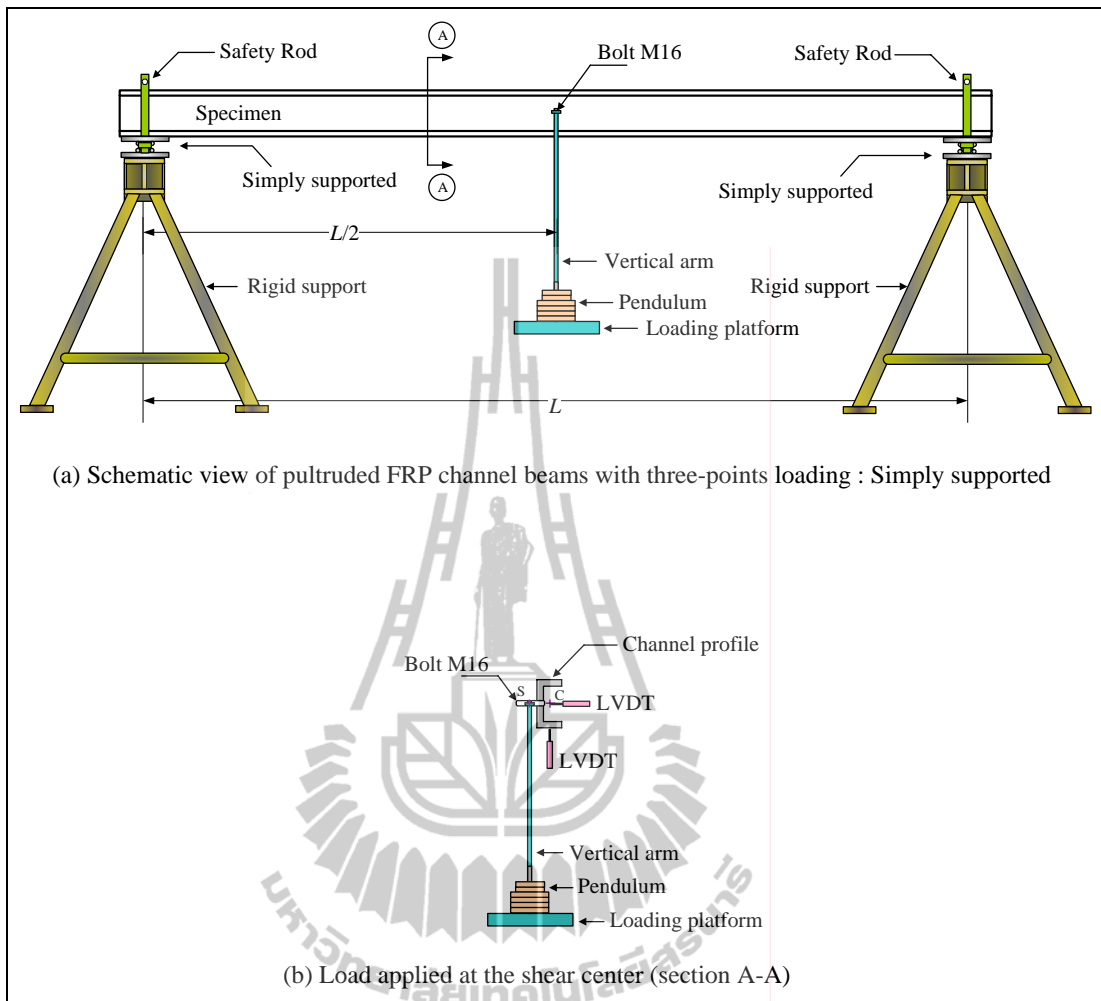
7) เริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกอย่างช้า ๆ โดยตุ้มน้ำหนัก (pendulum) ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.10 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจุดรองรับแบบง่าย



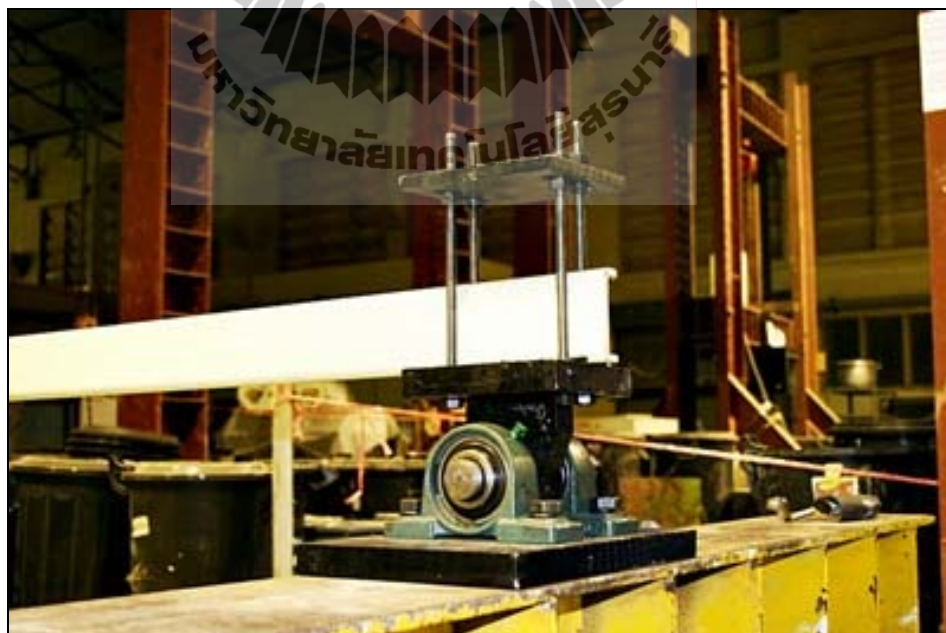
รูปที่ 3.11 การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.12 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.13 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.14 จุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.15 การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.16 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.17 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้าง และลักษณะการวิบัติของคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงดัดที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปรางน้ำ 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 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 3.8 ถึงตารางที่ 3.10 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 82 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-F-ZZ ถูกตั้งขึ้น โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปรางน้ำที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm F หมายถึงลักษณะของจตุรรองรับแบบยึดแน่น ชุดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C152-F-4.0 หมายถึง คานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น ขนาด 152×43×10 mm และยาว 4.0 m

ตารางที่ 3.8 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 3.9 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 3.10 รายละเอียดตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ 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
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

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบ จากนั้นติดตั้งชุดให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบ โดยชุดให้แรงกระทำมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กถูกเจาะรูสำหรับสลักเกลียว 16 mm (M16) ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทดสอบคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด และตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test)

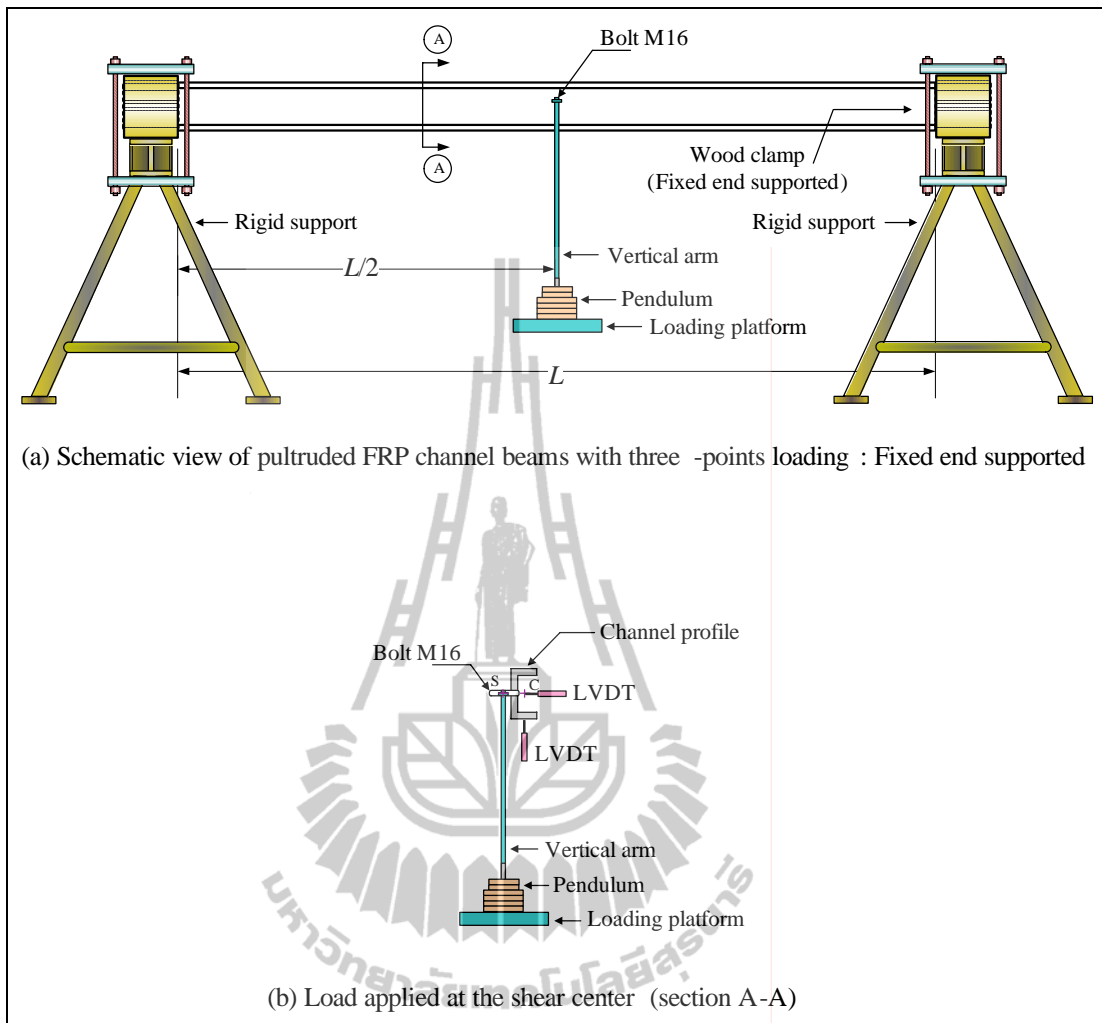
2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับ โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกทำให้ยึดแน่นโดยกล่องไม้เนื้อแข็งสำหรับจับตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการยึดจุดรองรับดังกล่าวโดยใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่นบีบรัดด้านบนและด้านล่างของกล่องไม้ รูปที่ 3.18 ถึงรูปที่ 3.20 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบยึดแน่น

3) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

4) ระยะเวลาแอนตัวแนวตั้ง (vertical deflection) และระยะเวลาแอนตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัด โดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.21

5) ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว บริเวณส่วนปีกบนและปีกล่างของตัวอย่างหน้าตัดรูปร่างนี้เพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 3.22

6) เริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ โดยคีมน้ำหนัก (pendulum) ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



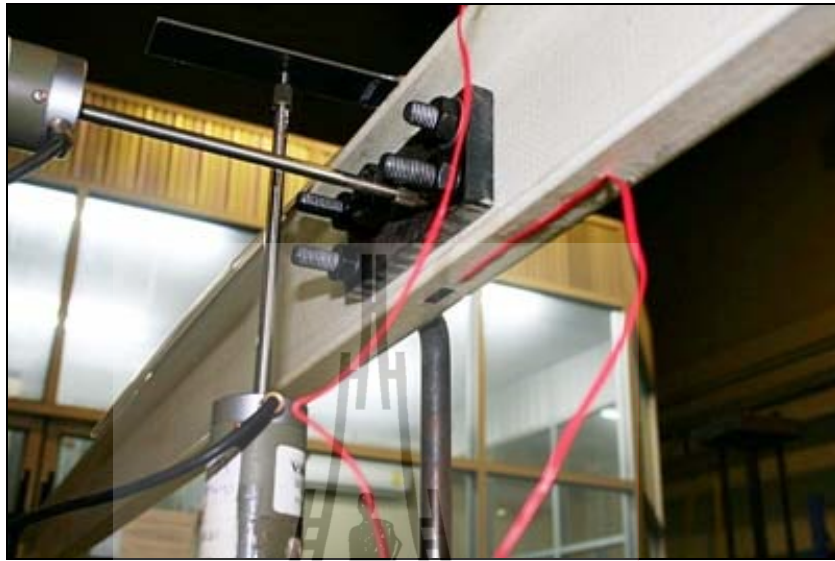
รูปที่ 3.18 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างกาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.19 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจตุรรองรับแบบยึดแน่น



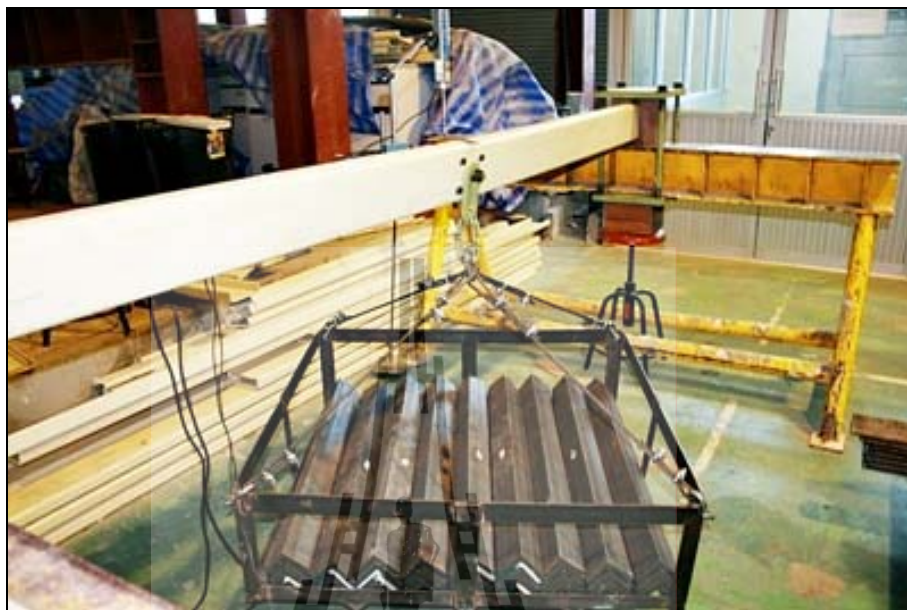
รูปที่ 3.20 จตุรรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.21 การวัดระยะแอนตัวแนวตั้งและด้านข้างของตัวอย่าง
คาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.22 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.23 การทดสอบตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

3.4 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ โดยสมการออกแบบ

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

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

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

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

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

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

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

ดังนั้น จากผลการคำนวณตามสมการที่ 3.2 พบว่ากรณีจตุรรองรับแบบคานยื่น จตุรรองรับแบบง่าย และจตุรรองรับแบบยึดแน่น C_b เท่ากับ 1.0 1.32 และ 1.92 ตามลำดับ

โดยปกติวัสดุ CFRP จะถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบ Orthotropic material ซึ่งคุณสมบัติทางกลขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นคุณสมบัติทางกลในสมการที่ (3.1) (E, G) สามารถถูกแทนที่ด้วยค่า E_L และ G_{LT} ดังนั้น สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเคาะของวัสดุ CFRP ที่วิบัติโดยการโก่งเคาะด้านข้างเนื่องจากการบิด ($M_{cr,LRFD}$) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.3)

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

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

ค่า E_L และ G_{LT} สำหรับสมการที่ (3.3) ถูกหาจากมาตรวัดความเครียด (strain gauge) ที่ถูกติดบนตัวอย่างคาน และการทดสอบคานแบบ Full scale ซึ่งผลทดสอบที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ย้อนกลับ (back analysis) โดยใช้หลักการทฤษฎีคานของ Timoshenko เพื่อหาค่า E_L และ G_{LT} ที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์ดังกล่าวได้ค่าเฉลี่ยโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบมีค่าเท่ากับ 33.1 และ 2.01 GPa (ภาคผนวก ข. แสดงหลักการวิเคราะห์เพื่อหาค่า E_L และ G_{LT}) นอกจากนี้ เนื่องจากความหนาของปีกและความหนาของเอวมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวจึงสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม หากหน้าตัดดังกล่าวมีความหนาปีกและความหนาเอวไม่เท่ากัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวอาจไม่ค่าแตกต่างกัน

3.5 การวิเคราะห์การแอ่นตัวของคาน PFRP โดยทฤษฎีคานของ Timoshenko

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

การแอ่นตัวของคานและชิ้นส่วนรับแรงคัตสำหรับวัสดุ PFRP ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ Flexural rigidity, EI และ Transverse shear rigidity, KAG ของวัสดุ โดยระยะการแอ่นตัวสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) จากทฤษฎีการแอ่นตัวโดยรวม (total deflection) มีค่าเท่ากับผลรวมของการแอ่นตัวเนื่องจากแรงคัต (bending deflection) และการแอ่นตัวจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deflection) ดังนั้นการแอ่นตัวสูงสุดสามารถหาได้จากสมการดังนี้ สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported)

$$\Delta_{\max} = \frac{PL^3}{3E_L I} + \frac{PL}{k_{\text{tim}} AG_{LT}} \quad (3.4)$$

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported)

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

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed - end supported)

$$\Delta_{\max} = \frac{PL^3}{192E_L I} + \frac{PL}{4k_{\text{tim}} AG_{LT}} \quad (3.6)$$

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

3.6 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่าง

โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

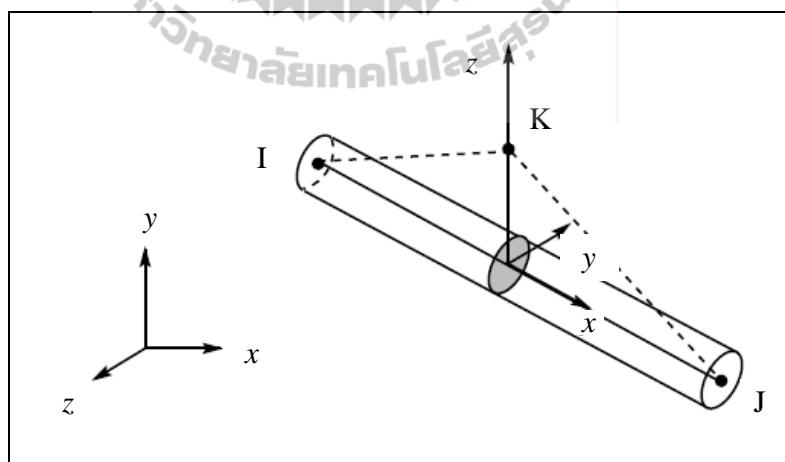
การทดสอบในห้องปฏิบัติการมีค่าใช้จ่ายสูงทั้งด้านวัสดุ อุปกรณ์และแรงงาน และสมการออกแบบที่ใช้ในการคำนวณอาจมีข้อจำกัดด้านสมมติฐานและทฤษฎี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในการจำลองพฤติกรรมของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP เนื่องจากเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถควบคุมตัวแปรได้ง่าย ตลอดจนอาจขยายผลการทดสอบไปสู่ตัวแปรอื่น ๆ การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 10.0 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อทดสอบหาหน้าหนักโก่งเดาะ (buckling load) หรือน้ำหนักวิกฤต (critical load) และลักษณะของการวิบัติของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากนั้นเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ดังกล่าวกับผลที่คำนวณได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และผลทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ตลอดจนเป็นการจำลองพฤติกรรมการโก่งเดาะของคาน CFRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัดเพื่อตรวจสอบและยืนยันผลการทดสอบดังกล่าว

การวิเคราะห์ความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP ภายใต้แรงดัดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างจากการวิเคราะห์ความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ กล่าวคือเมื่อพิจารณาแบบกลศาสตร์มหภาค (macro-mechanics) (พิจารณาขนาดหน้าตัดของวัสดุ CFRP เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยซึ่งมีขนาดเล็กมาก) วัสดุ CFRP เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และเป็นวัสดุอורתโรโทรปิก (orthotropic material) (Kollar and Springer, 2003) จึงต้องพิจารณาตัวแปรและการใช้ค่าคงที่ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามทิศทางการวางตัวของเส้นใย เช่น โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและตามแนวขวางของเส้นใย โมดูลัสแรงเฉือนในระนาบ อัตราส่วนปัวซองของหลักและรอง (major and minor Poisson's ratio) ตลอดจนแรงที่กระทำและการยึดรั้ง (constrain) ของจุดรองรับ

แบบจำลอง (model) เป็นแบบ 3 มิติ (three dimensions) ขนาดหน้าตัดของวัสดุ FRP ที่ใช้วิเคราะห์มี 3 ขนาด ได้แก่ (1) $76 \times 22 \times 6$ mm (2) $102 \times 29 \times 6$ mm และ (3) $152 \times 43 \times 10$ mm โดยเน้นเรื่องทิศทางของแบบจำลองโครงสร้างเป็นหลัก การวิเคราะห์เป็นแบบ Eigenvalue buckling เนื่องจากการสนองทางโครงสร้างของคานที่ทำจากวัสดุ FRP ภายใต้แรงดัดมีลักษณะแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีพฤติกรรมการวิบัติใกล้เคียงกับวัสดุเปราะ (Brooks and Turvey, 1995; Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996) นอกจากนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling สามารถประเมินพฤติกรรมทางโครงสร้างและน้ำหนักโก่งเดาะของคาน FRP ได้อย่างถูกต้องเพียงพอ (Qiao, Zou, and Davalos, 2003; Shan and Qiao, 2005)

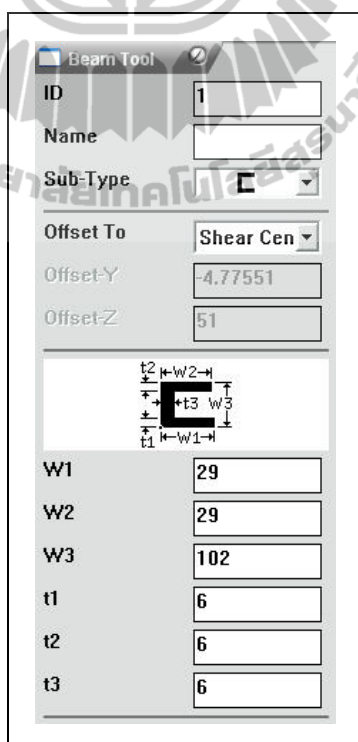
แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นชนิด Structural Beam อิลลิเมนต์แบบ BEAM188/3D linear finite strain beam ดังแสดงในรูปที่ 3.24 อิลลิเมนต์แบบ BEAM188 มี 6 degrees of freedom (DOF) ได้แก่ การเคลื่อนที่ของ node ในทิศทางแกน x , y และ z (u_x, u_y, u_z) และการหมุนรอบทิศทางแกน x , y และ z ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) นอกจากนี้ อิลลิเมนต์ดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์วัสดุประกอบ (composite material) โดยใช้ทฤษฎีของ Timoshenko beam theory และคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation)



รูปที่ 3.24 อิลลิเมนต์ BEAM188/3D linear finite strain beam

ขั้นตอนการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRFP หน้าตัดรูปร่างน้ำโดยวิธีไฟไนท์ อิลลิเมนต์มีดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดหน่วยของการวัดที่ใช้วิเคราะห์ครั้งนี้โดยใช้หน่วย N, mm
- 2) กำหนดประเภทการวิเคราะห์เป็น Static analysis
- 3) เลือกอิลลิเมนต์แบบ BEAM188/3D linear finite strain beam โดย Global stiffness matrix ที่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานของอิลลิเมนต์ได้ถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก ค.
- 4) เลือกแบบจำลองของวัสดุแบบ Orthotropic material และป้อนค่าคงที่ของวัสดุ FRFP ที่ได้จากการทดสอบลงในโปรแกรม ได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนของเส้นใย โมดูลัสยืดหยุ่นขนานเส้นใย โมดูลัสแรงเฉือนขนานเส้นใย และอัตราส่วนปัวซองของหลักและรอง ตามลำดับ
- 5) สร้างแบบจำลองตามขนาดจริง (full scale) ของคาน ขนาดหน้าตัดรูปร่างน้ำ (channel section) ของแบบจำลองประกอบด้วย 3 ขนาด ได้แก่ (1) $76 \times 22 \times 6$ mm (2) $102 \times 29 \times 6$ mm และ (3) $152 \times 43 \times 10$ mm ถูกสร้างขึ้น โดย Beam Tool ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.25 จากนั้น กำหนดความยาวคานของแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์



รูปที่ 3.25 การจำลองหน้าตัดรูปร่างน้ำโดย Beam Tool

6) ทำการ Meshing แบบจำลอง โดยกำหนดปริมาณของอีลิเมนต์ให้เหมาะสมเพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

7) กำหนดการยึดรั้ง (constrain) ของแบบจำลอง เนื่องจากงานวิจัยนี้มีลักษณะของจตุรรองรับที่ต่างกัน 3 แบบ ได้แก่ จตุรรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported) และจตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) ดังนั้น เงื่อนไขของการกำหนดจุดยึดรั้งสำหรับแต่ละจตุรรองรับจึงแตกต่างกัน โดยอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 3.26 และมีรายละเอียดดังนี้

จตุรรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported)

$$\text{ที่ } x=0 \quad ; \quad u_x = u_y = u_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

$$\text{ที่ } x=L \quad ; \quad \text{Free end}$$

จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported)

$$\text{ที่ } x=0 \quad ; \quad u_x = u_y = u_z = \theta_x = 0$$

$$\text{ที่ } x=L \quad ; \quad u_y = u_z = \theta_x = 0$$

จตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported)

$$\text{ที่ } x=0 \quad ; \quad u_x = u_y = u_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

$$\text{ที่ } x=L \quad ; \quad u_x = u_y = u_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$$

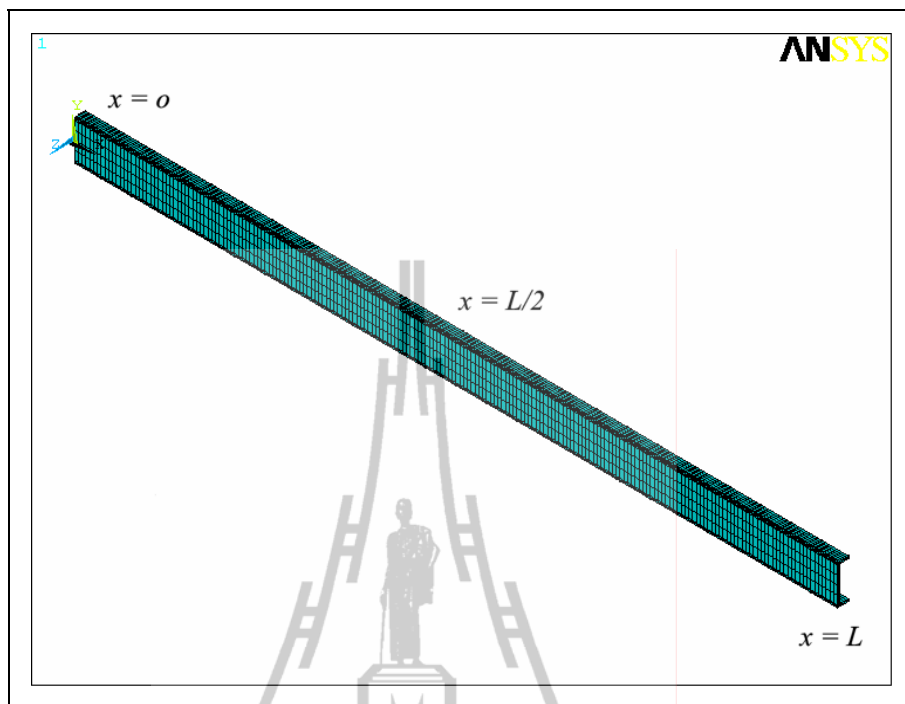
8) กำหนดแรงกระทำเป็นจุดในแนวตั้ง (concentrated vertical load) ขนาด 1 N สำหรับจตุรรองรับแบบคานยื่น แรงดังกล่าวกระทำที่ระยะ $x=L$ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.27 สำหรับจตุรรองรับแบบง่ายและจตุรรองรับแบบยึดแน่น แรงดังกล่าวกระทำที่ระยะ $x=L/2$ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.28 และรูปที่ 3.29

9) การวิเคราะห์แบบสถิตย์ (static)

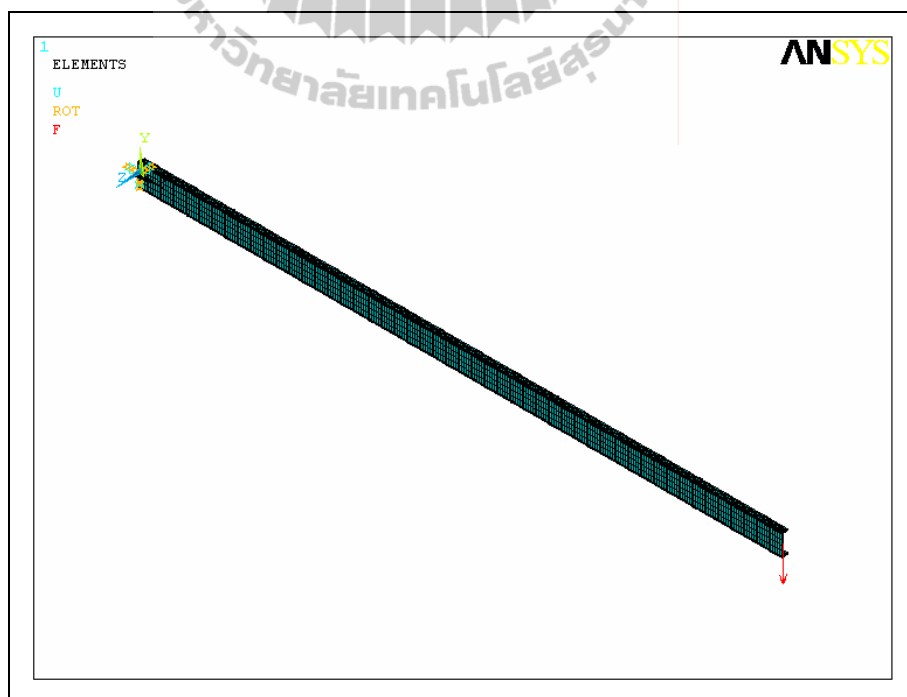
10) เปลี่ยนประเภทการวิเคราะห์เป็นแบบ Eigenvalue buckling โดยกำหนดตัวเลือกต่าง ๆ แล้วทำการวิเคราะห์อีกครั้ง โดยหลักการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์แบบ Eigenvalue buckling ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

11) ผลการวิเคราะห์ประกอบด้วย น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ซึ่งออกมาในรูปแบบของตัวคูณของน้ำหนักที่กระทำต่อแบบจำลอง และลักษณะของการเสียรูป (deformation)

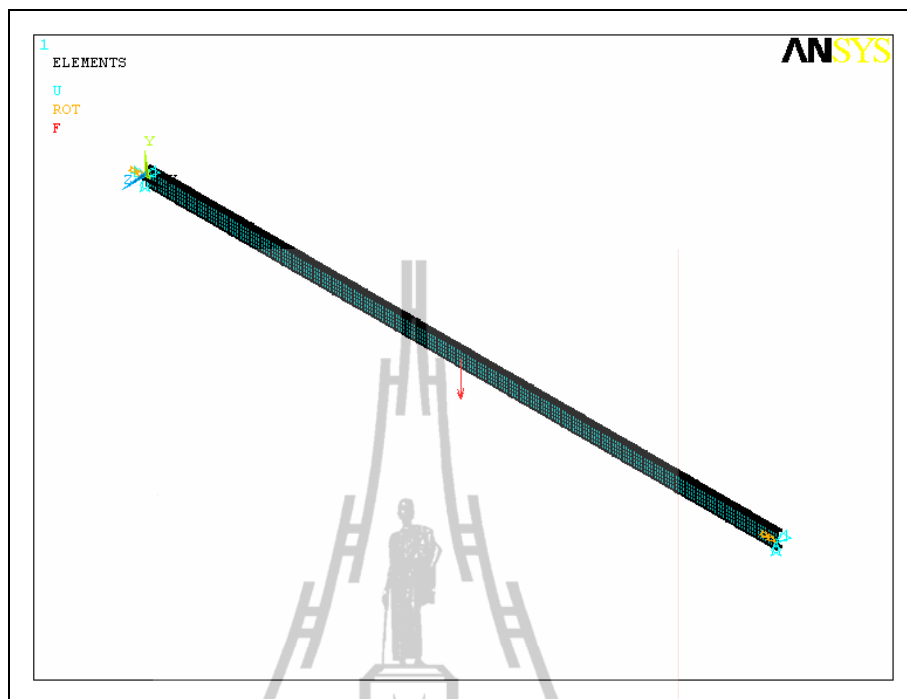
12) กระทำซ้ำจากข้อ 1 ถึงข้อ 10 โดยเปลี่ยนความยาวของคานตามที่กำหนด



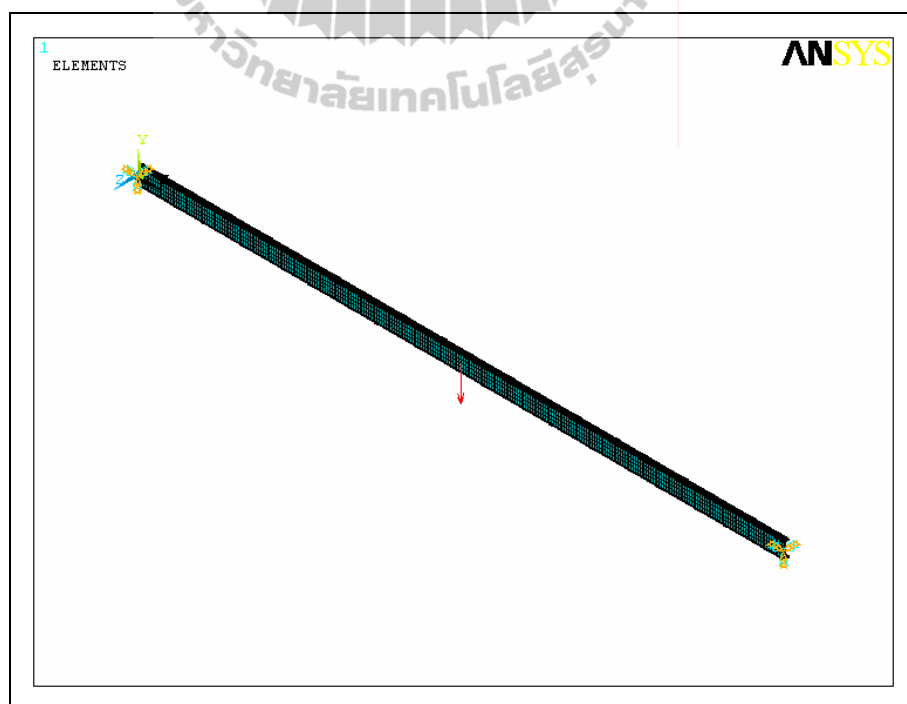
รูปที่ 3.26 ตัวอย่างแบบจำลองหน้าตัดรูปรางน้ำ



รูปที่ 3.27 แบบจำลองตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 3.28 แบบจำลองตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.29 แบบจำลองตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

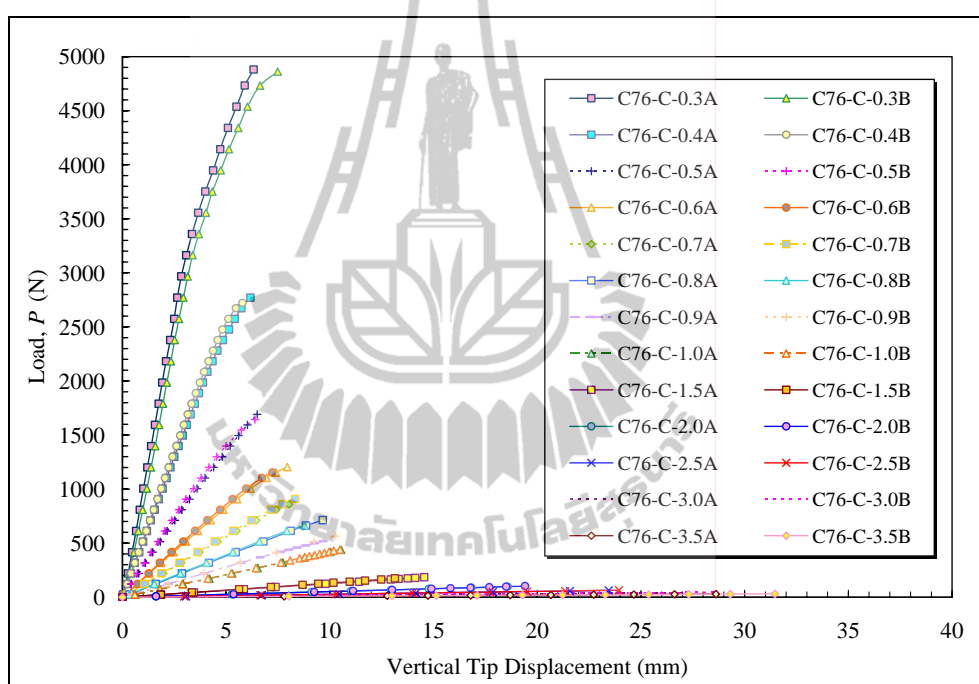
สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอ ผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคานที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปร่างในท้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการนำเสนอเป็นหัวข้อตามลักษณะของ จูกรองรับ ได้แก่ จูกรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) จูกรองรับแบบง่าย (simply supported) และ จูกรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) ผลทดสอบที่ได้ประกอบด้วย ลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปร่างภายใต้แรงดัด จากนั้น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน FRP ที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD และวิธีไฟไนท์ อิลลิเมนต์ กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

4.2 คาน FRP หน้าตัดรูปร่างที่มีจูกรองรับแบบคานยื่น

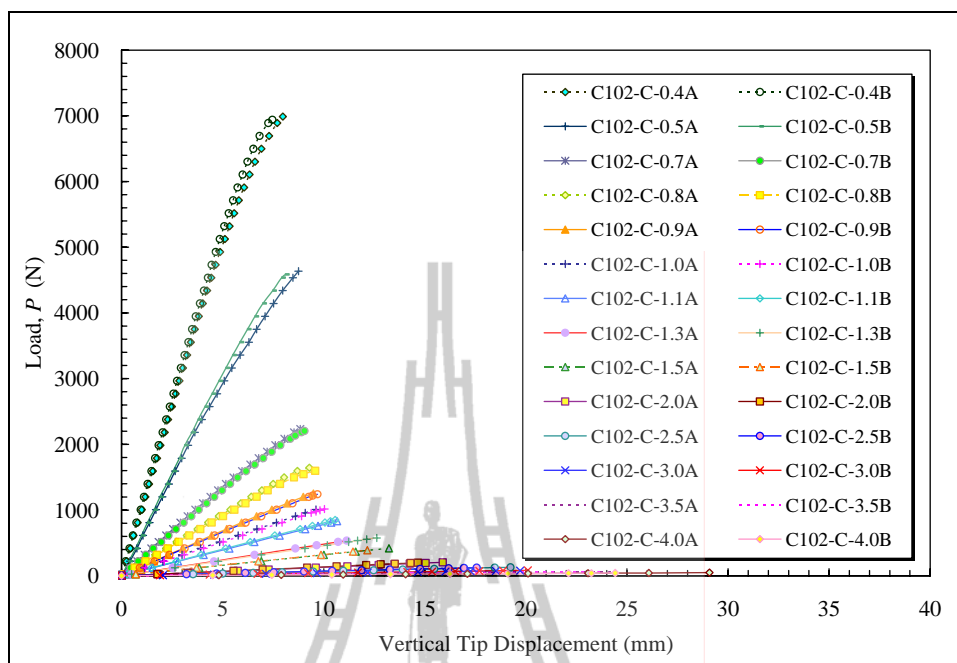
4.2.1 พฤติกรรมกำลังรับแรงดัดของคานที่มีจูกรองรับแบบคานยื่น

รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอนตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคานที่มีจูกรองรับแบบคานยื่น จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงกระทำของตัวอย่างทดสอบสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ ได้แก่ คานสั้น (short beam) และคานยาว หรืออาจเรียกว่าคานชะลูด (slender beam) สำหรับคานสั้นที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความลึก (L/d) น้อยกว่า 10 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอนตัวแนวตั้งที่ปลายของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้น (nonlinear) จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 10$ พฤติกรรมกำลังรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

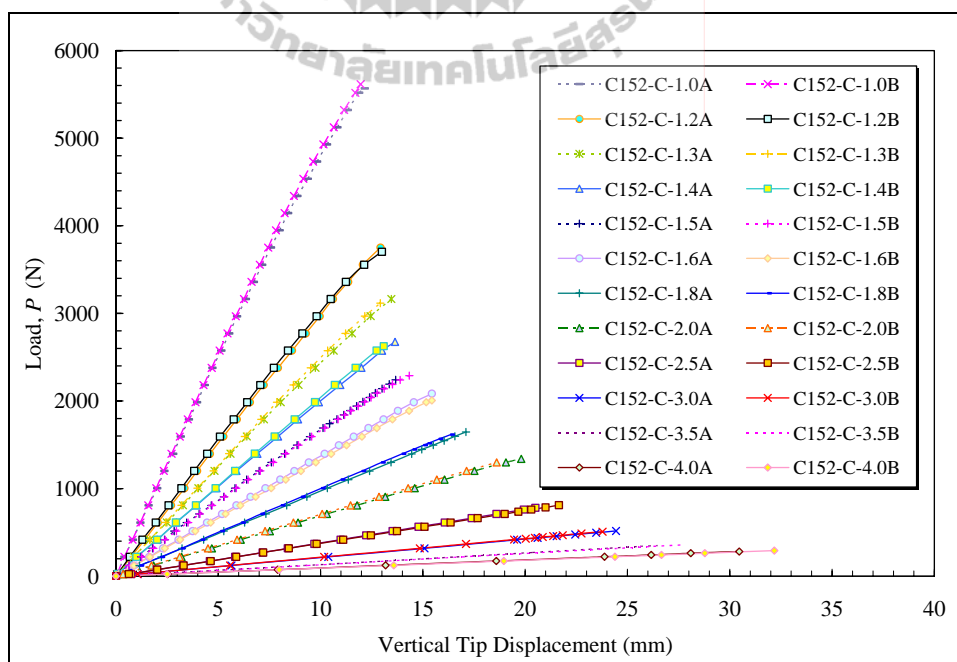
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีจุกรองรับแบบคานยื่นทั้งหมดมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาว (span) ของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน PFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



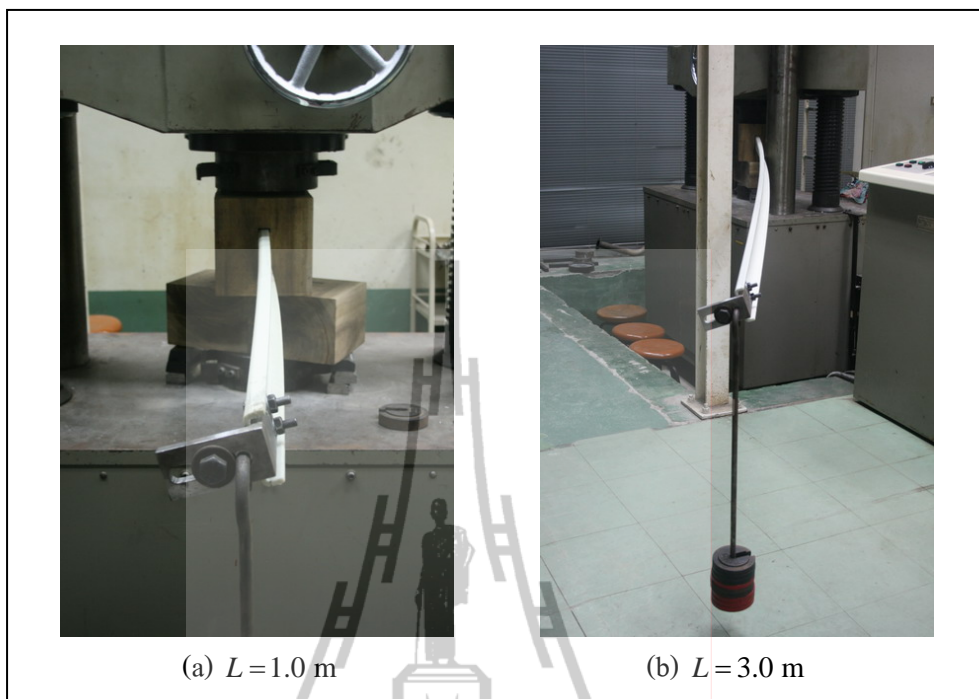
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น



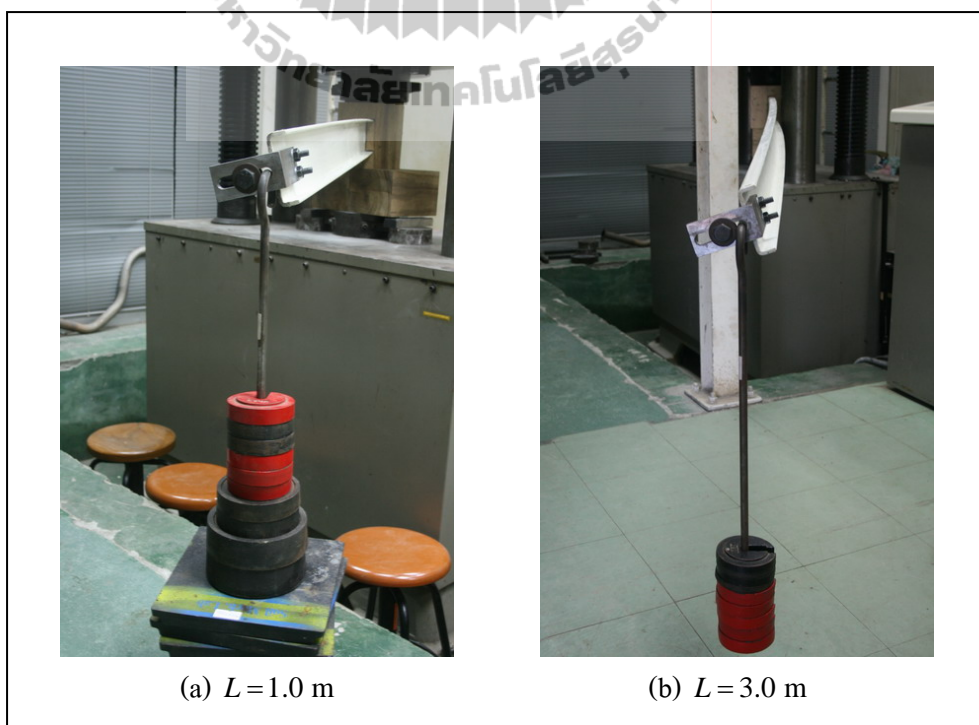
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



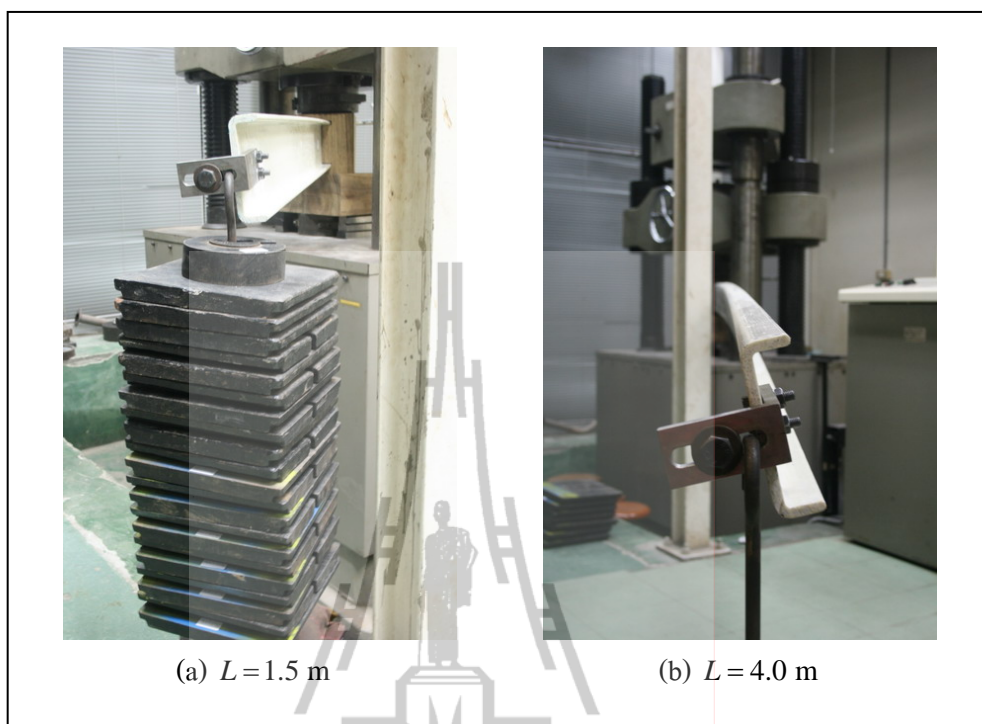
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.4 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.5 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.6 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

4.2.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

งานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) เป็นน้ำหนักบรรทุกสุดท้ายก่อนที่ตัวอย่างเกิดการโก่งเดาะ ตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่นสำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าวน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ เนื่องจากตัวอย่างที่มีหน้าตัดใหญ่กว่ามีคุณสมบัติของหน้าตัด (geometric properties) มากกว่าตัวอย่างที่มีหน้าตัดเล็ก

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

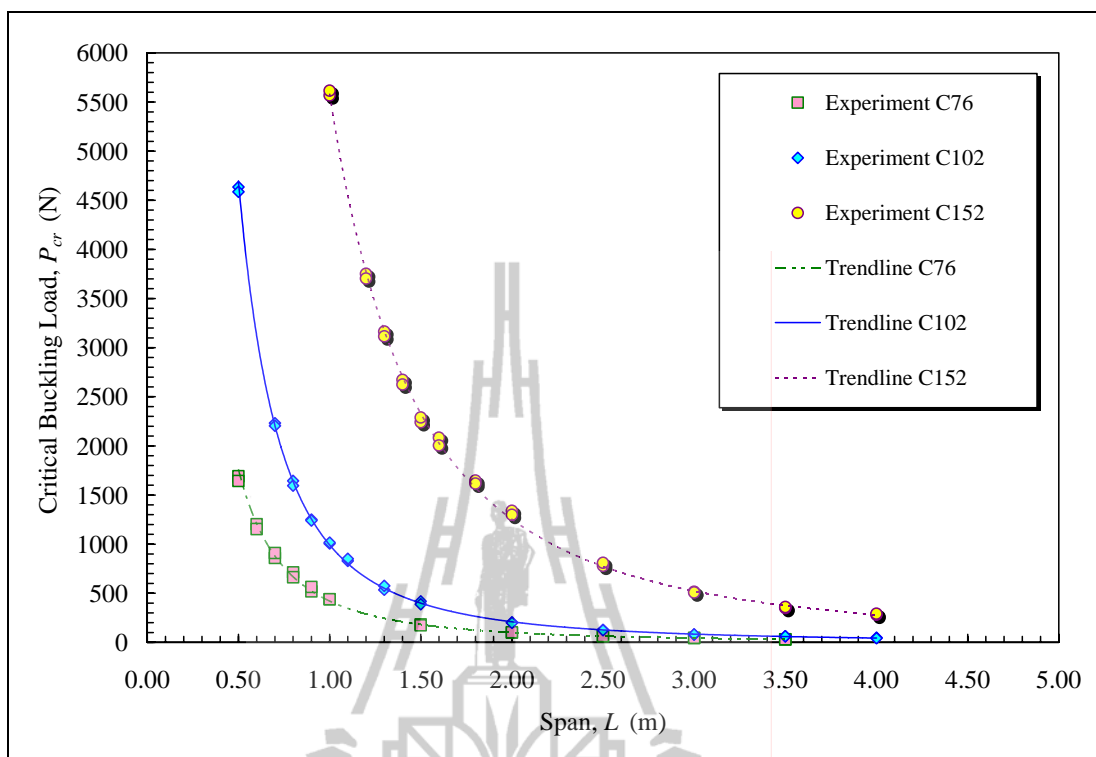
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-C-0.5	$76 \times 22 \times 6$	0.5	1691.4	1643.3	1667.4
C76-C-0.6	$76 \times 22 \times 6$	0.6	1203.7	1153.7	1178.7
C76-C-0.7	$76 \times 22 \times 6$	0.7	859.4	909.4	884.4
C76-C-0.8	$76 \times 22 \times 6$	0.8	713.2	663.2	688.2
C76-C-0.9	$76 \times 22 \times 6$	0.9	518.9	565.1	542.0
C76-C-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	438.1	439.9	439.0
C76-C-1.5	$76 \times 22 \times 6$	1.5	183.7	173.7	178.7
C76-C-2.0	$76 \times 22 \times 6$	2.0	98.0	102.6	100.3
C76-C-2.5	$76 \times 22 \times 6$	2.5	63.0	64.8	63.9
C76-C-3.0	$76 \times 22 \times 6$	3.0	43.0	46.0	44.5
C76-C-3.5	$76 \times 22 \times 6$	3.5	29.0	31.0	30.0

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

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-C-0.5	$102 \times 29 \times 6$	0.5	4634.4	4586.3	4610.4
C102-C-0.7	$102 \times 29 \times 6$	0.7	2231.9	2203.8	2217.9
C102-C-0.8	$102 \times 29 \times 6$	0.8	1644.2	1596.1	1620.2
C102-C-0.9	$102 \times 29 \times 6$	0.9	1250.5	1240.5	1245.5
C102-C-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	1006.6	1016.6	1011.6
C102-C-1.1	$102 \times 29 \times 6$	1.1	830.0	850.0	840.0
C102-C-1.3	$102 \times 29 \times 6$	1.3	535.7	575.7	555.7
C102-C-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	418.0	388.0	403.0
C102-C-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	203.7	198.7	201.2
C102-C-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	128.7	123.5	126.1
C102-C-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	78.0	82.6	80.3
C102-C-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	62.4	62.5	62.5
C102-C-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	47.7	41.9	44.8

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

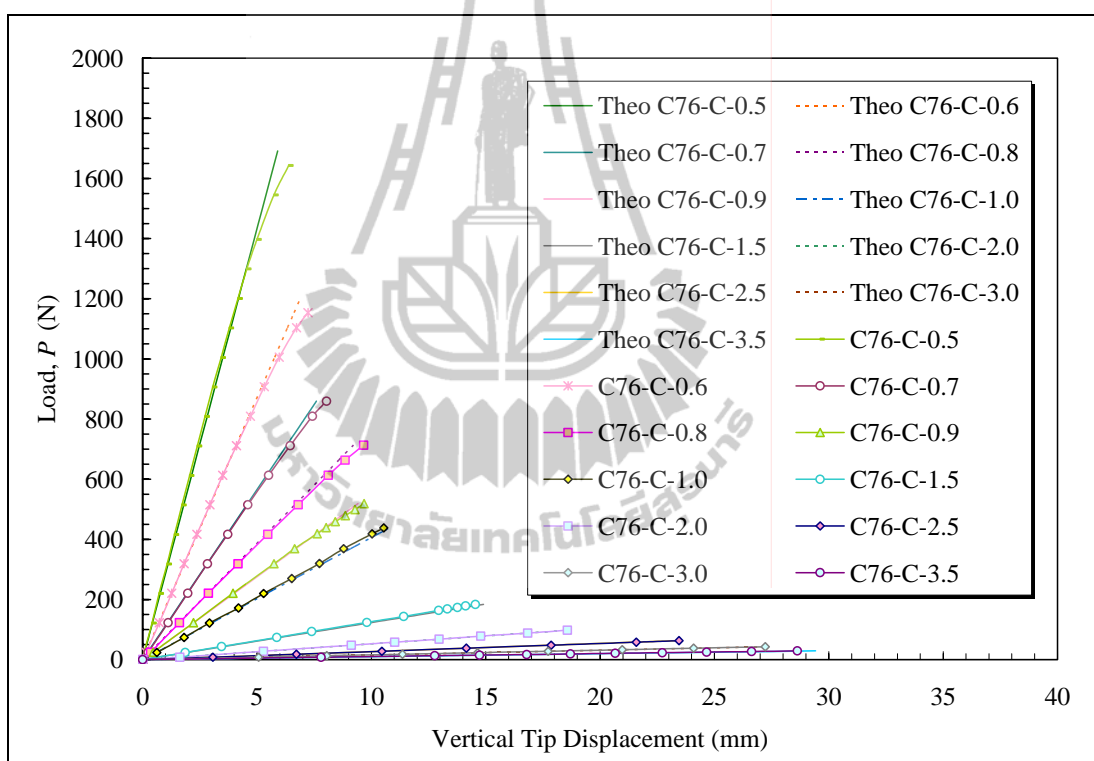
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C152-C-1.0	$152 \times 43 \times 10$	1.0	5567.3	5615.4	5591.4
C152-C-1.2	$152 \times 43 \times 10$	1.2	3751.5	3703.4	3727.5
C152-C-1.3	$152 \times 43 \times 10$	1.3	3163.8	3115.7	3139.8
C152-C-1.4	$152 \times 43 \times 10$	1.4	2673.3	2625.2	2649.3
C152-C-1.5	$152 \times 43 \times 10$	1.5	2241.4	2289.5	2265.5
C152-C-1.6	$152 \times 43 \times 10$	1.6	2083.4	2005.3	2044.4
C152-C-1.8	$152 \times 43 \times 10$	1.8	1646.7	1616.7	1631.7
C152-C-2.0	$152 \times 43 \times 10$	2.0	1339.0	1299.0	1319.0
C152-C-2.5	$152 \times 43 \times 10$	2.5	780.0	810.4	795.2
C152-C-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	516.1	508.0	512.1
C152-C-3.5	$152 \times 43 \times 10$	3.5	349.9	359.9	354.9
C152-C-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	281.9	291.9	286.9



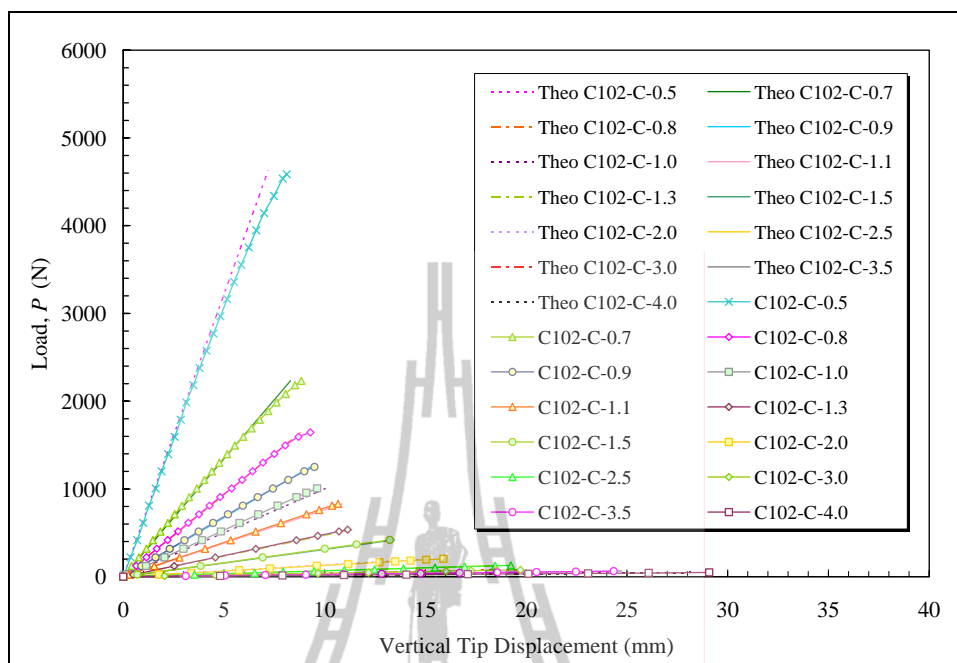
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของตัวอย่างที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

4.2.3 การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

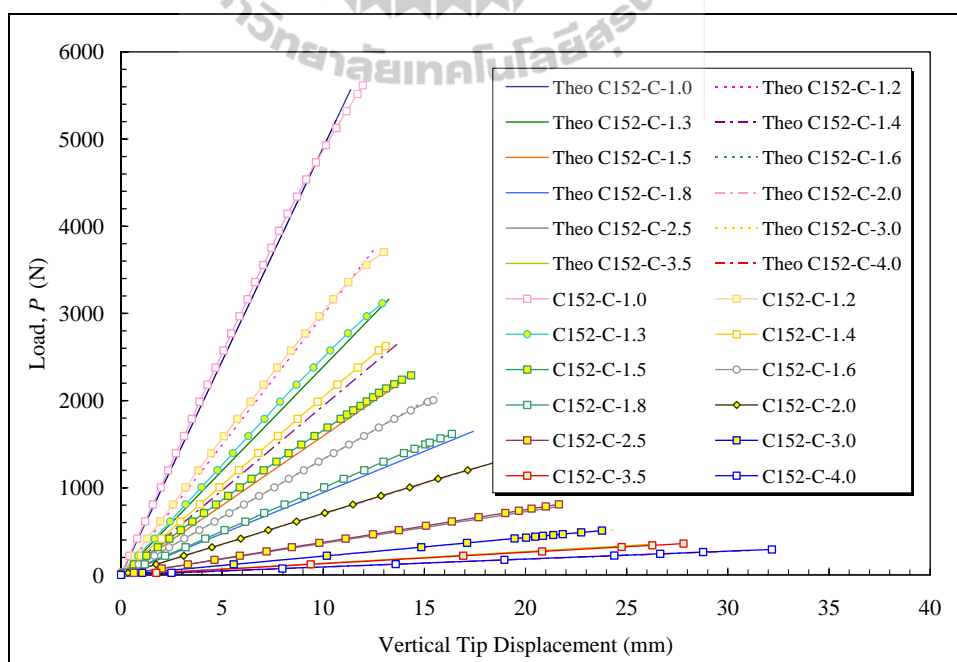
รูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (3.4) จากรูปพบว่าระยะการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko สามารถทำนายพฤติกรรมระยะการแอ่นตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้และที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko อยู่ในช่วงระหว่าง 2-10%



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น

4.2.4 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น

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

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

ตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่นสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.3) จากตารางพบว่า หากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อความยาวของคานเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.4 ถึงตารางที่ 4.6 พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.87-1.14 สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 10$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.96-1.14 แสดงให้เห็นว่า โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย และสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ศึกษาโดย Turvey (1996) อย่างไรก็ตาม สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ อัตราส่วน $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.87-0.98 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM (initial crookedness) และความแปรปรวนของสมบัติวัสดุ ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD
ของคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

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-C-0.5	6.6	845.7	821.7	833.7	958.2	0.87
C76-C-0.6	7.9	722.2	692.2	707.2	798.5	0.89
C76-C-0.7	9.2	601.6	636.6	619.1	672.1	0.92
C76-C-0.8	10.5	570.6	530.6	550.6	569.0	0.97
C76-C-0.9	11.8	467.0	508.6	487.8	489.4	1.00
C76-C-1.0	13.2	438.1	439.9	439.0	423.7	1.04
C76-C-1.5	19.7	275.6	260.6	268.1	253.9	1.06
C76-C-2.0	26.3	196.0	205.2	200.6	182.4	1.10
C76-C-2.5	32.9	157.5	162.0	159.8	142.8	1.12
C76-C-3.0	39.5	129.0	138.0	133.5	117.6	1.14
C76-C-3.5	46.1	101.5	108.5	105.0	100.0	1.05

ตารางที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD
ของคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

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-C-0.5	4.9	2317.2	2293.2	2305.2	2602.2	0.89
C102-C-0.7	6.9	1562.3	1542.7	1552.5	1771.8	0.88
C102-C-0.8	7.8	1315.4	1276.9	1296.1	1455.0	0.89
C102-C-0.9	8.8	1125.5	1116.5	1121.0	1226.9	0.91
C102-C-1.0	9.8	1006.6	1016.6	1011.6	1030.7	0.98
C102-C-1.1	10.8	913.0	935.0	924.0	884.3	1.04
C102-C-1.3	12.7	696.4	748.4	722.4	683.3	1.06
C102-C-1.5	14.7	627.0	582.0	604.5	554.0	1.09
C102-C-2.0	19.6	407.4	397.4	402.4	374.3	1.08
C102-C-2.5	24.5	321.8	308.8	315.3	282.9	1.11
C102-C-3.0	29.4	234.0	247.8	240.9	227.9	1.06
C102-C-3.5	34.3	218.4	218.8	218.6	191.2	1.14
C102-C-4.0	39.2	190.8	167.6	179.2	164.9	1.09

ตารางที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD
ของคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

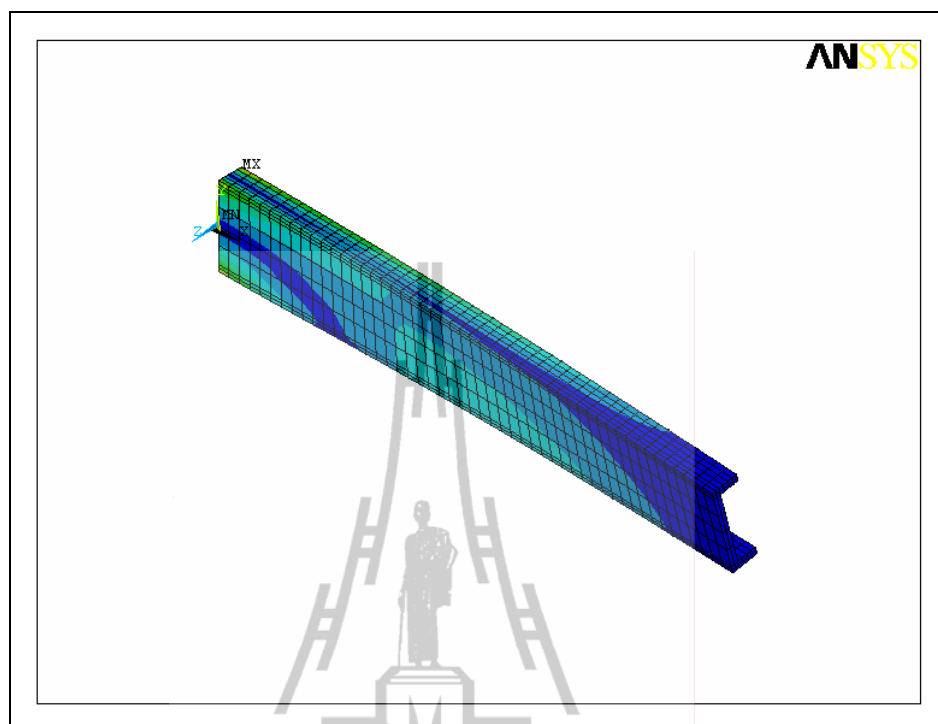
Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C152-C-1.0	6.6	5567.3	5615.4	5591.4	6171.5	0.91
C152-C-1.2	7.9	4501.8	4444.1	4472.9	4889.8	0.91
C152-C-1.3	8.6	4112.9	4050.4	4081.7	4421.5	0.92
C152-C-1.4	9.2	3742.6	3675.3	3709.0	4019.8	0.92
C152-C-1.5	9.9	3362.1	3434.3	3398.2	3660.2	0.93
C152-C-1.6	10.5	3333.4	3208.5	3271.0	3402.1	0.96
C152-C-1.8	11.8	2964.1	2910.1	2937.1	2897.4	1.01
C152-C-2.0	13.2	2678.0	2598.0	2638.0	2486.8	1.06
C152-C-2.5	16.4	1950.0	2026.0	1988.0	1831.1	1.09
C152-C-3.0	19.7	1548.3	1524.0	1536.2	1449.3	1.06
C152-C-3.5	23.0	1224.7	1259.7	1242.2	1200.9	1.03
C152-C-4.0	26.3	1127.6	1167.6	1147.6	1026.6	1.12

4.2.5 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น

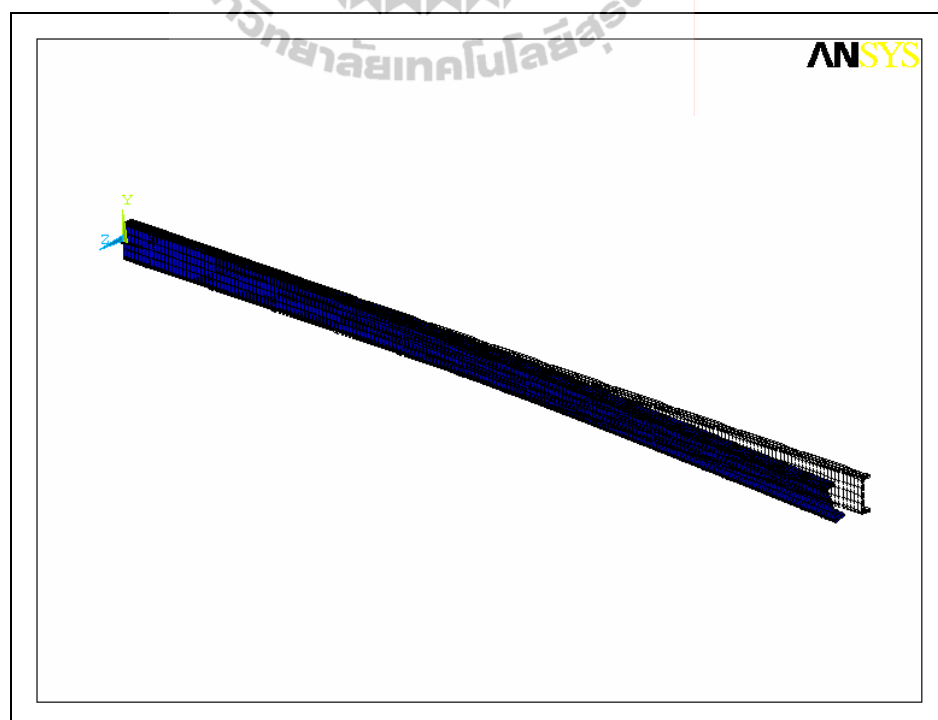
การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling ให้ผลเฉลยประกอบด้วย น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ซึ่งออกมาในรูปตัวคูณของน้ำหนักที่กระทำต่อแบบจำลอง และลักษณะของการเสียรูป (deformation) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึงรูปที่ 4.16 จากรูปพบว่าตัวอย่างมีลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) เหมือนลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในห้อยปฏิบัติการ

รูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่ปลายตัวอย่างที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบ สมการการคำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko และผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปพบว่าผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานที่มีจุกรองรับแบบคานยื่นได้ และมีค่าใกล้เคียงกับการแอ่นตัวที่คำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko

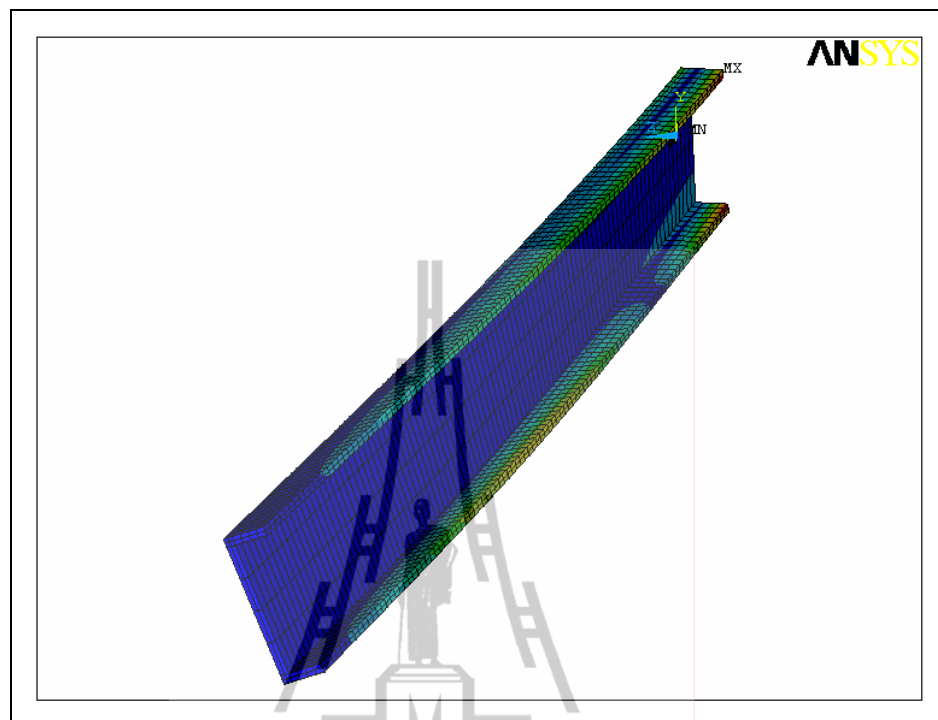
ตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น จากตารางพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97-1.03 ดังนั้น การวิเคราะห์คาน CFRP โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling สามารถจำลองพฤติกรรมและน้ำหนักโก่งเดาะของคาน CFRP ภายใต้แรงคดได้ใกล้เคียงและให้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ LRFD และเพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน จึงถูกแสดงในรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.22 จากรูปพบว่าสมการ LRFD สำหรับประมาณค่าโมเมนต์โก่งเดาะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีความแตกต่างอยู่ระหว่าง $\pm 3\%$ และมีความแตกต่างกับผลทดสอบที่ได้ประมาณ 1-12% โดยมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM (initial crookedness) และตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



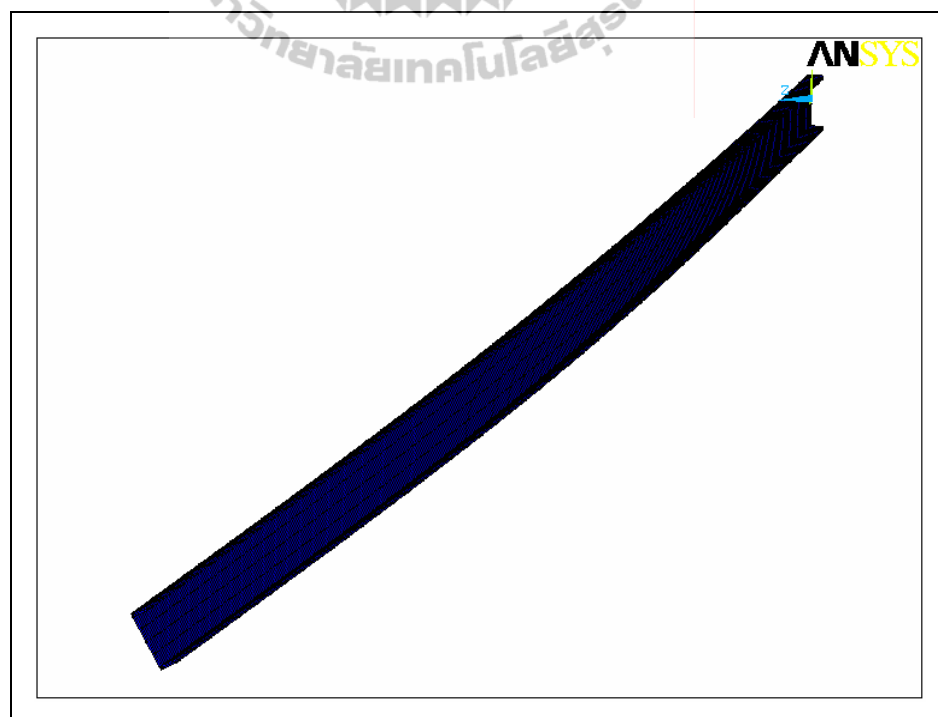
รูปที่ 4.11 รูปแบบการ โกงเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-C-0.5



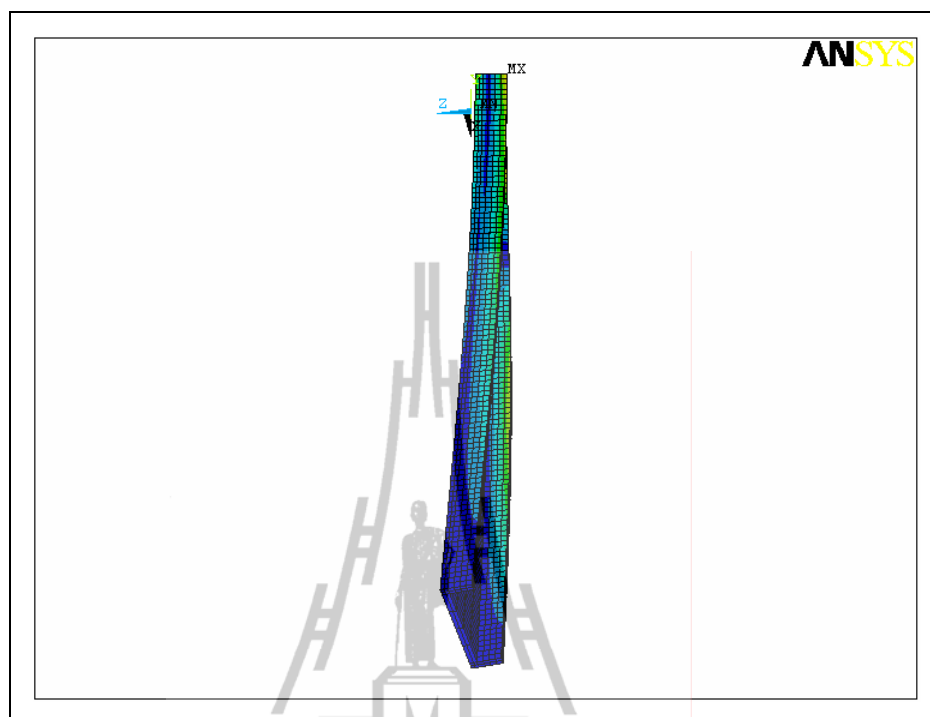
รูปที่ 4.12 รูปแบบการ โกงเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-C-2.0



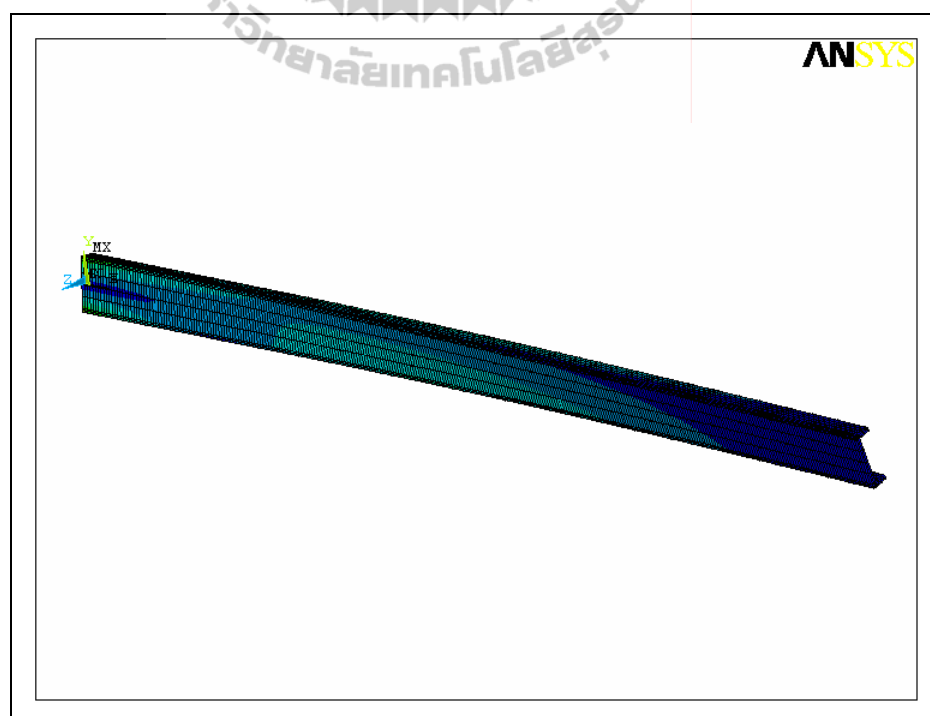
รูปที่ 4.13 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C102-C-1.0



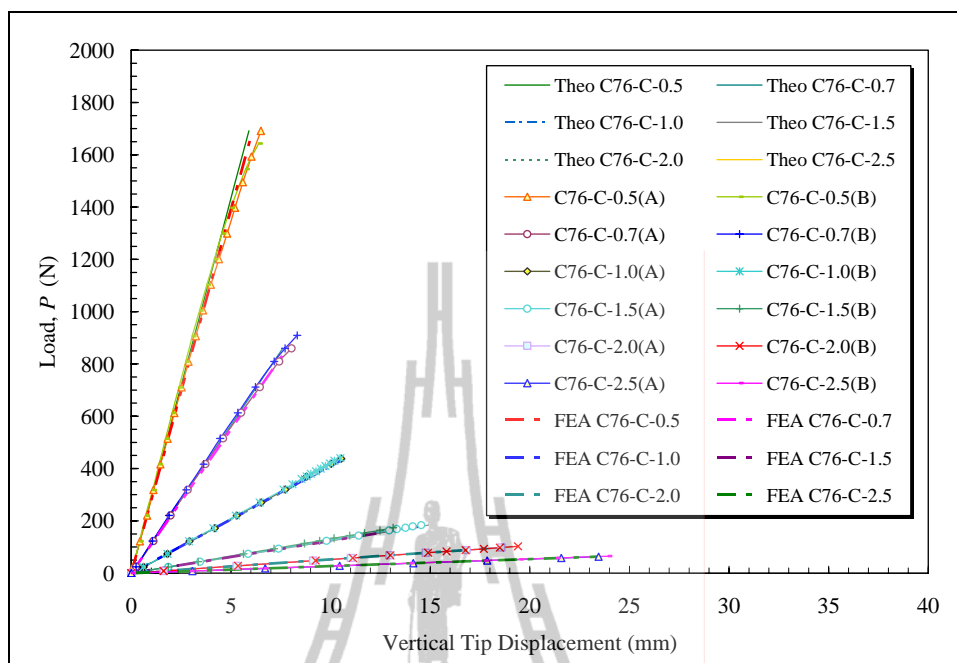
รูปที่ 4.14 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C102-C-4.0



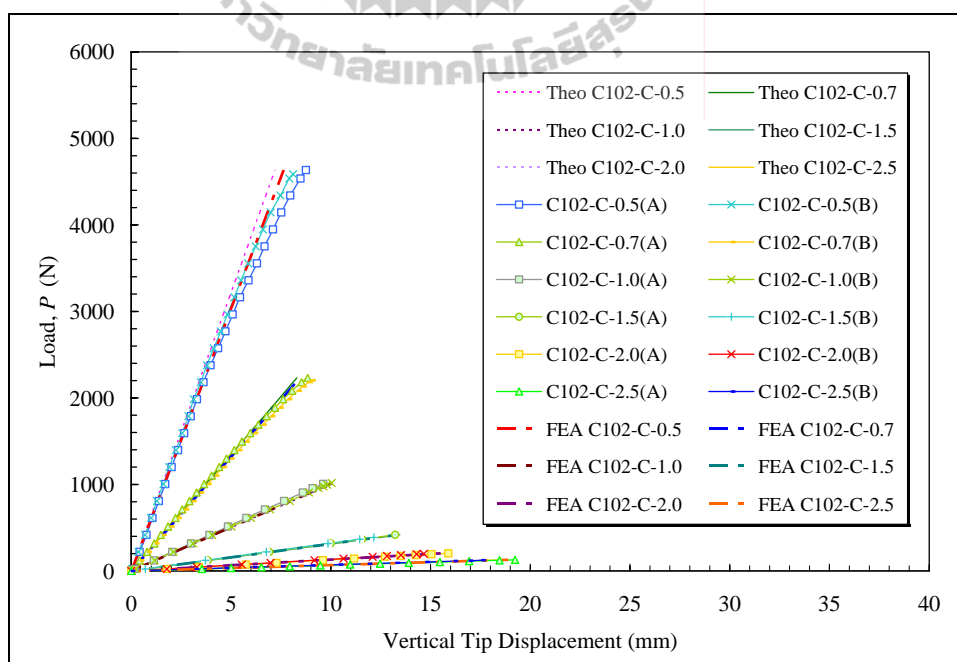
รูปที่ 4.15 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-C-1.0



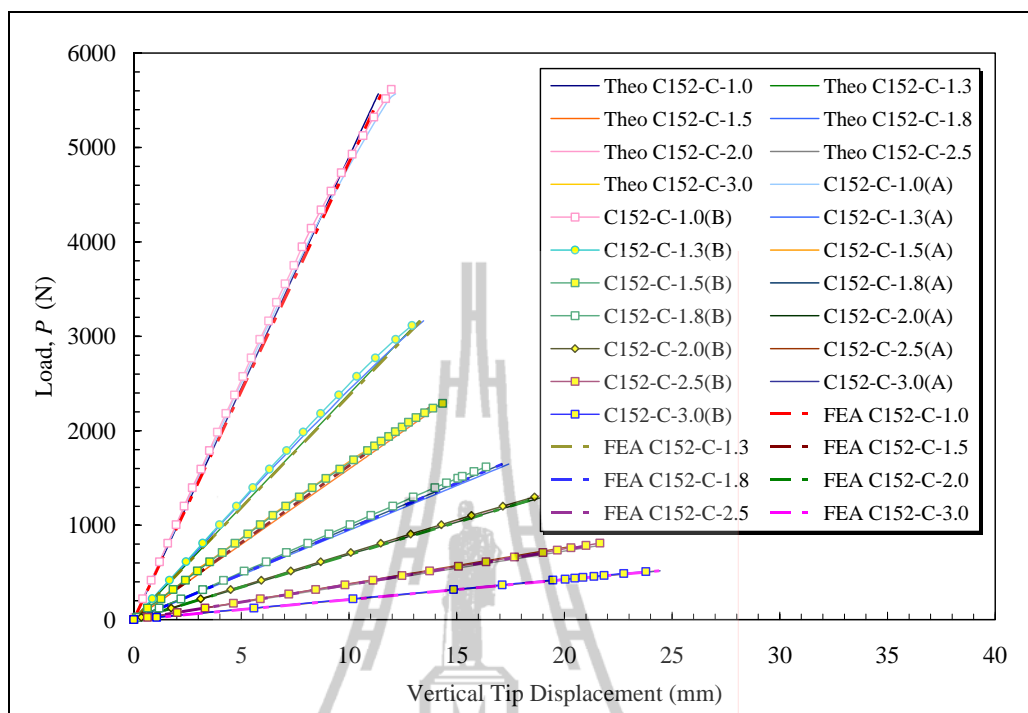
รูปที่ 4.16 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-C-3.0



รูปที่ 4.17 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.19 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างนำหน้าบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

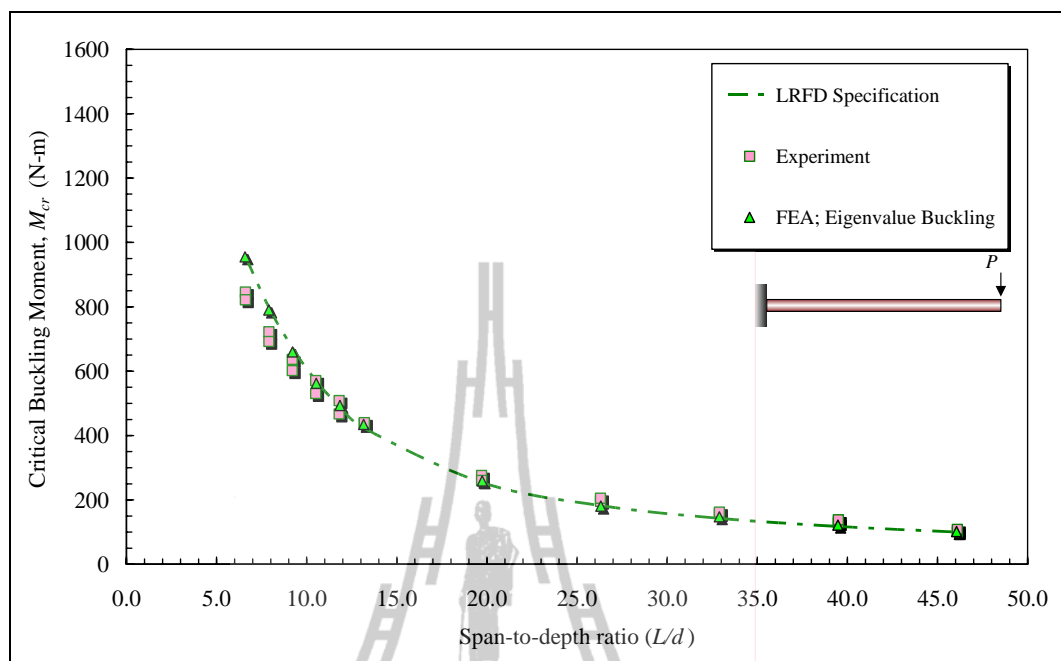
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C76-C-0.5	6.6	1910.8	958.2	1916.4	1.00
C76-C-0.6	7.9	1316.7	798.5	1330.8	1.01
C76-C-0.7	9.2	942.5	672.1	960.1	1.02
C76-C-0.8	10.5	703.2	569.0	711.3	1.01
C76-C-0.9	11.8	548.2	489.4	543.8	0.99
C76-C-1.0	13.2	434.9	423.7	423.7	0.97
C76-C-1.5	19.7	172.7	253.9	169.3	0.98
C76-C-2.0	26.3	90.3	182.4	91.2	1.01
C76-C-2.5	32.9	59.1	142.8	57.1	0.97
C76-C-3.0	39.5	40.6	117.6	39.2	0.97
C76-C-3.5	46.1	29.1	100.0	28.6	0.98

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

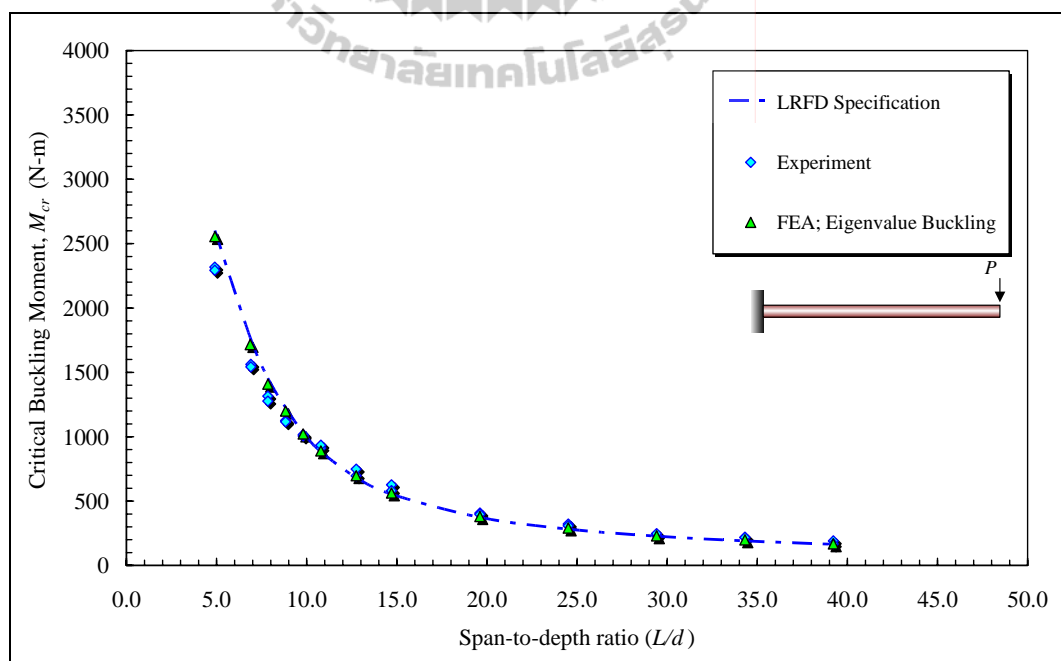
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C102-C-0.5	4.9	5204.4	2554.4	5108.8	1.02
C102-C-0.7	6.9	2531.1	1715.6	2450.9	1.03
C102-C-0.8	7.8	1818.8	1408.5	1760.6	1.03
C102-C-0.9	8.8	1363.2	1199.7	1333.0	1.02
C102-C-1.0	9.8	1030.7	1021.1	1021.1	1.01
C102-C-1.1	10.8	803.9	890.0	809.1	0.99
C102-C-1.3	12.7	525.6	697.1	536.2	0.98
C102-C-1.5	14.7	369.3	563.6	375.7	0.98
C102-C-2.0	19.6	187.2	379.8	189.9	0.99
C102-C-2.5	24.5	113.2	291.3	116.5	0.97
C102-C-3.0	29.4	76.0	230.7	76.9	0.99
C102-C-3.5	34.3	54.6	199.9	57.1	0.96
C102-C-4.0	39.2	41.2	168.4	42.1	0.98

ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

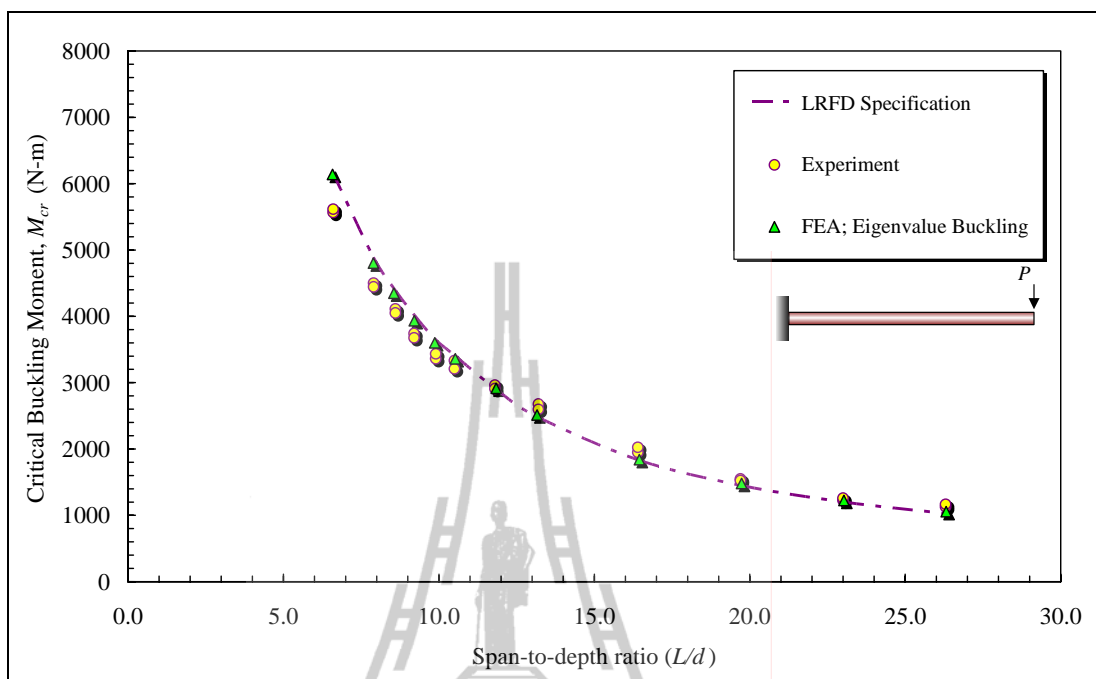
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C152-C-1.0	6.6	6171.5	6140.0	6140.0	1.01
C152-C-1.2	7.9	4074.8	4801.8	4001.5	1.02
C152-C-1.3	8.6	3401.2	4348.2	3344.8	1.02
C152-C-1.4	9.2	2871.3	3934.1	2810.1	1.02
C152-C-1.5	9.9	2440.1	3600.8	2400.5	1.02
C152-C-1.6	10.5	2126.3	3359.7	2099.8	1.01
C152-C-1.8	11.8	1609.7	2916.2	1620.1	0.99
C152-C-2.0	13.2	1243.4	2512.6	1256.3	0.99
C152-C-2.5	16.4	732.4	1839.8	735.9	1.00
C152-C-3.0	19.7	483.1	1479.6	493.2	0.98
C152-C-3.5	23.0	343.1	1224.3	349.8	0.98
C152-C-4.0	26.3	256.7	1056.4	264.1	0.97



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

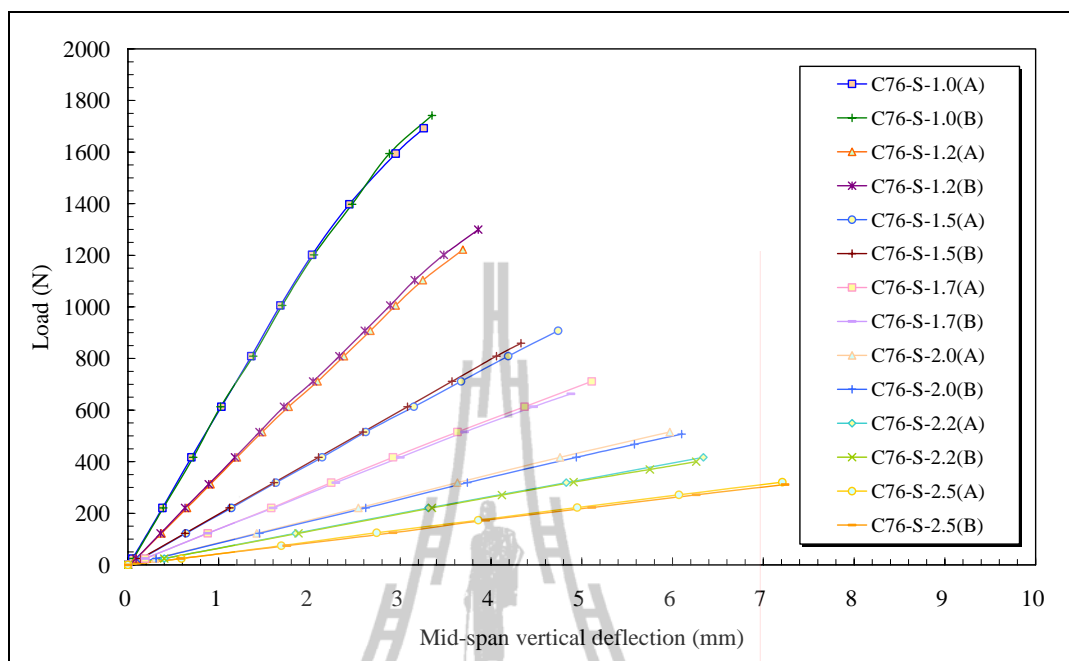
4.3 คาน CFRP หน้าตัดรูปร่างที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

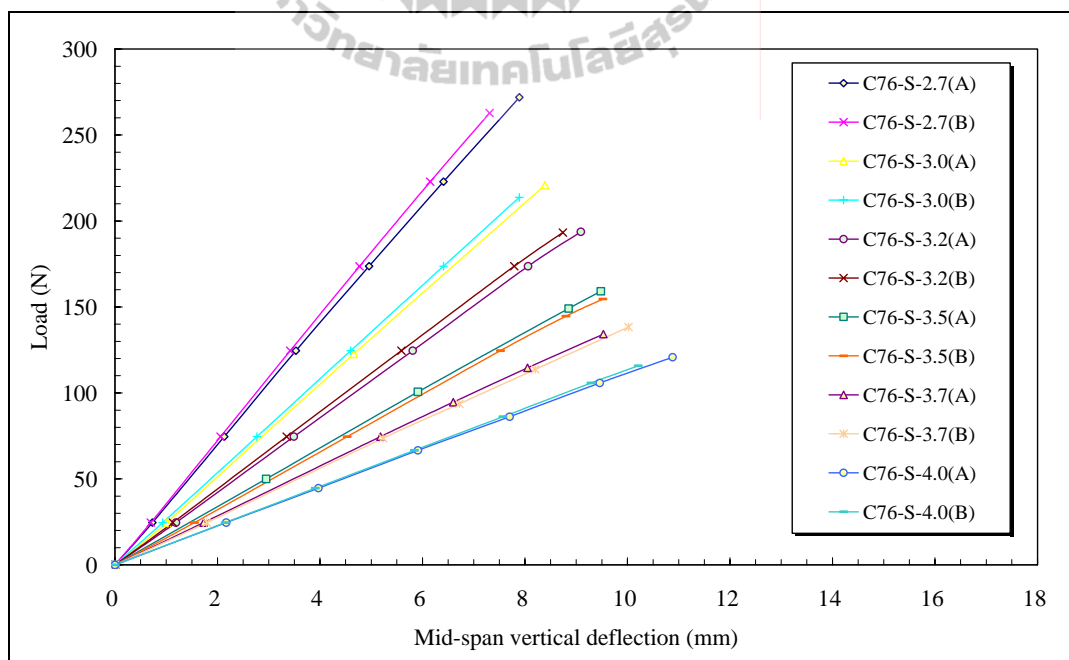
รูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

ในทางตรงกันข้าม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวตั้ง รูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

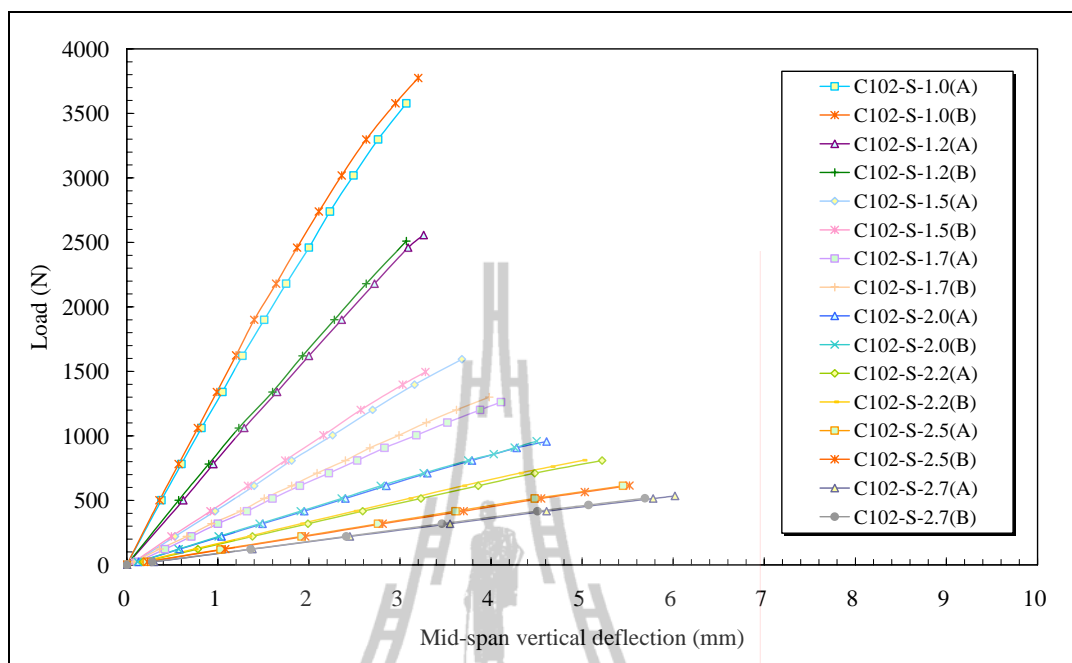
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.32 ถึงรูปที่ 4.34 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน CFRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



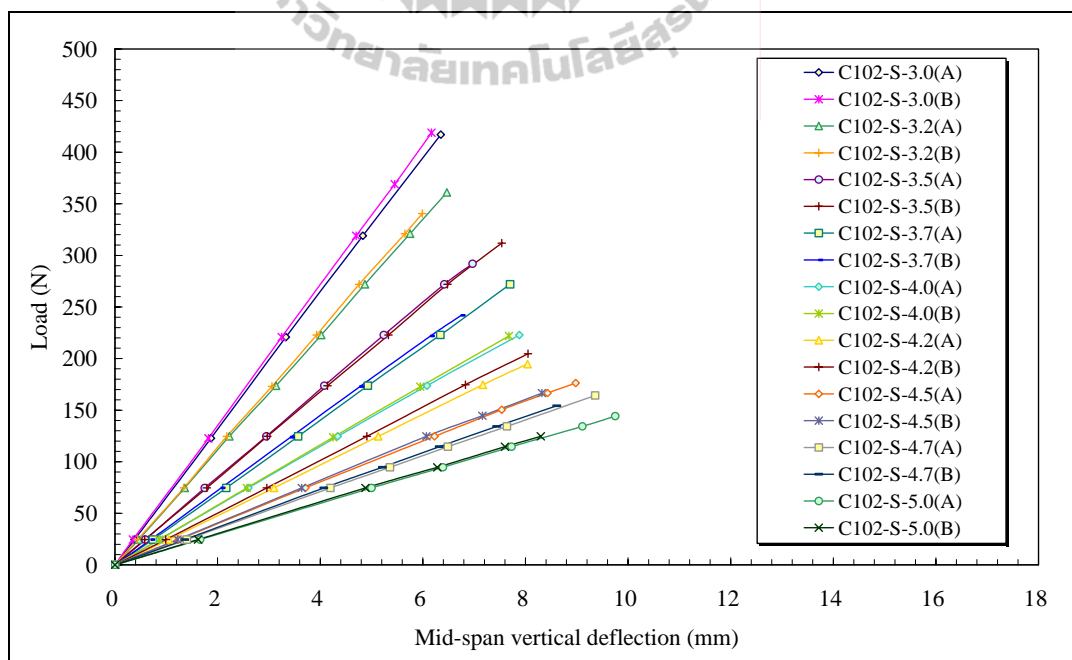
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



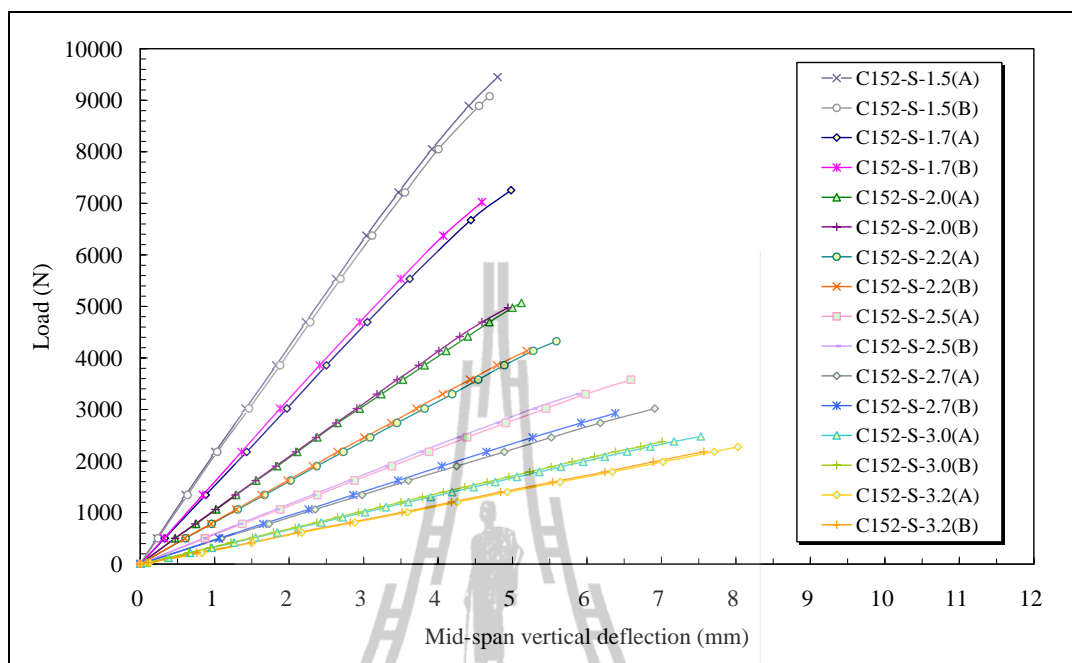
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



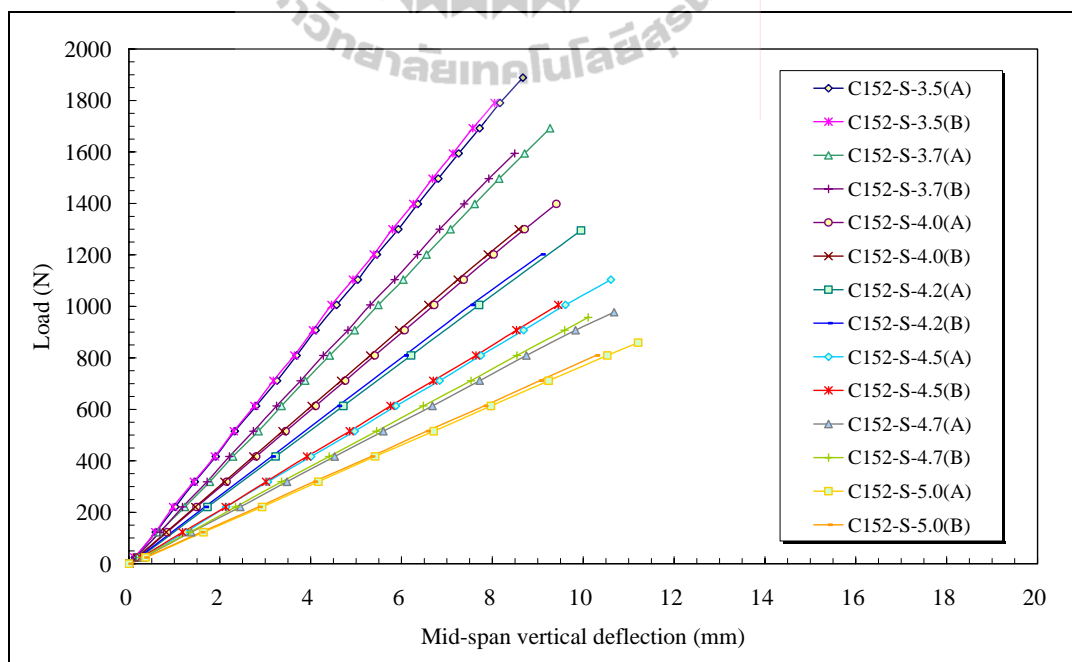
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



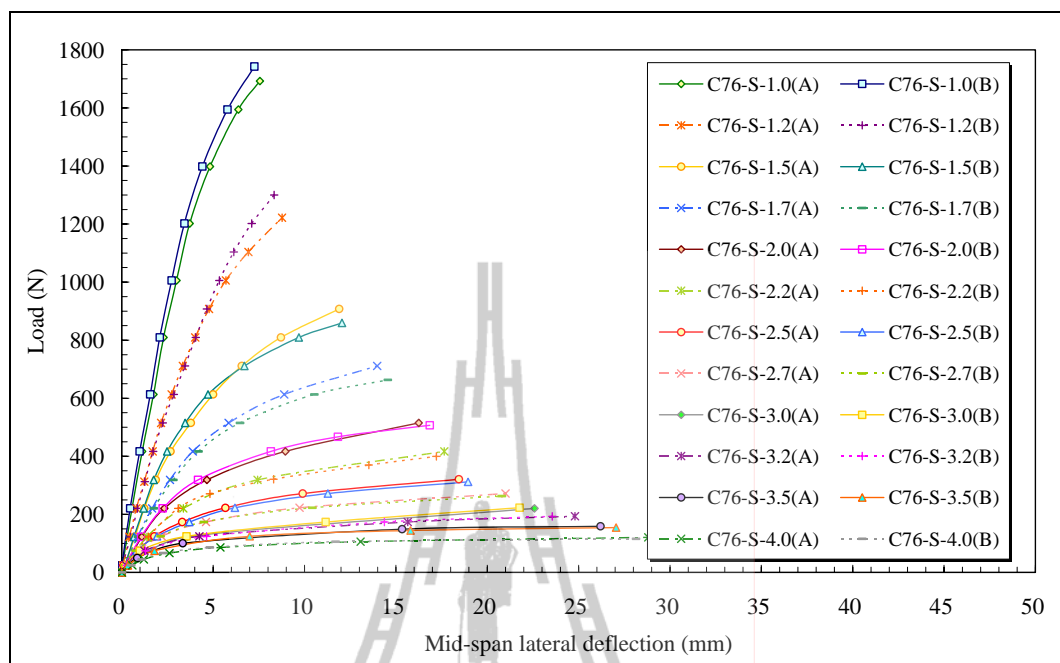
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



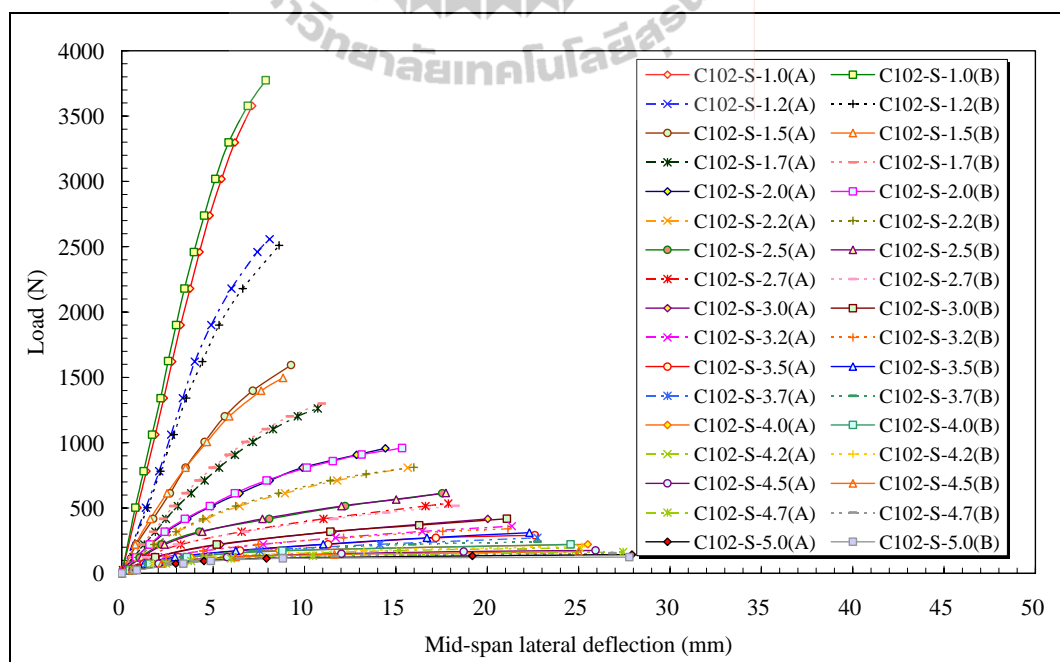
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



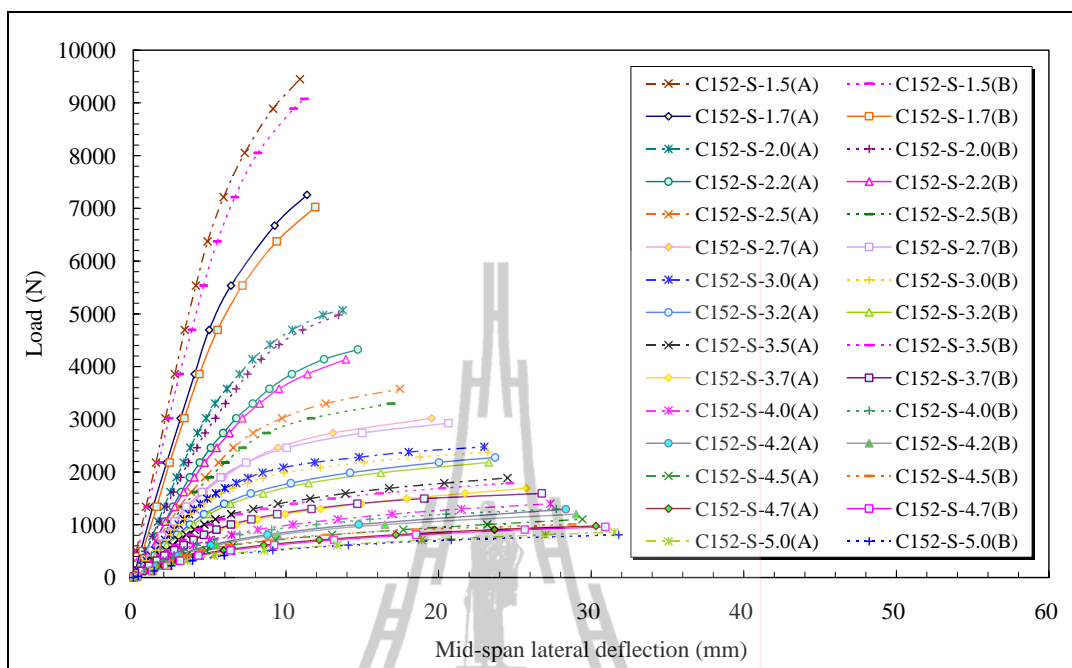
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



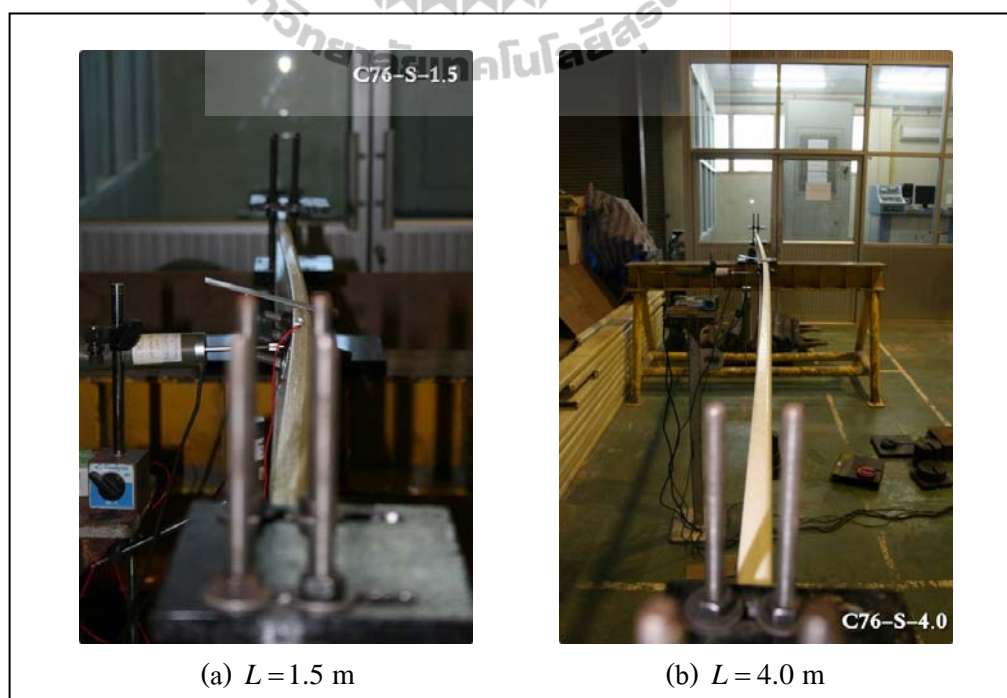
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



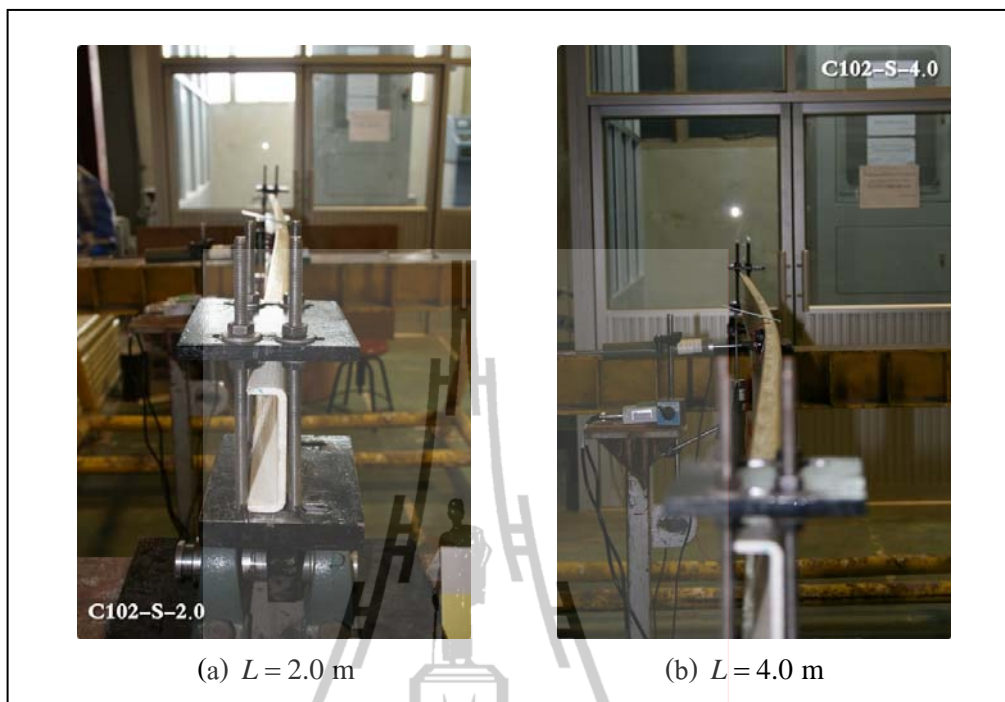
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย



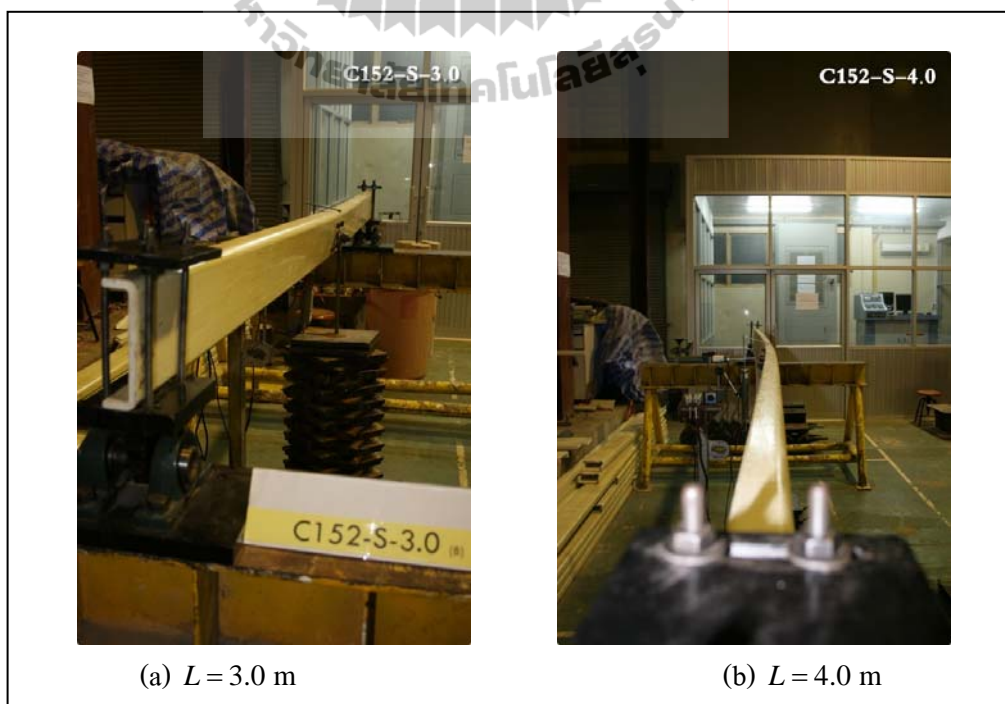
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.32 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.33 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.34 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่ายสำหรับตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ $102 \times 29 \times 6$ และ $152 \times 43 \times 10$ mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($P_{cr,EXP}$) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด $152 \times 43 \times 10$ mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด $102 \times 29 \times 6$ และ $76 \times 22 \times 6$ mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

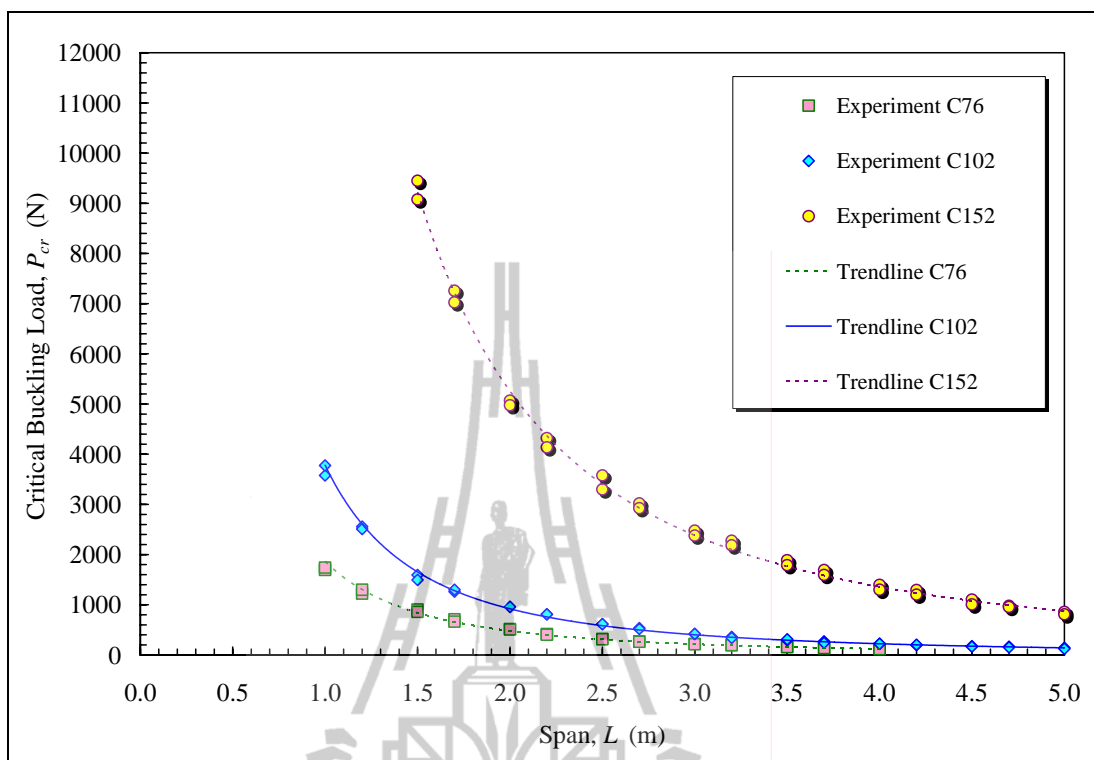
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-S-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	1692.3	1742.3	1717.3
C76-S-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	1221.8	1299.9	1260.9
C76-S-1.5	$76 \times 22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

ตารางที่ 4.11 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 4.12 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

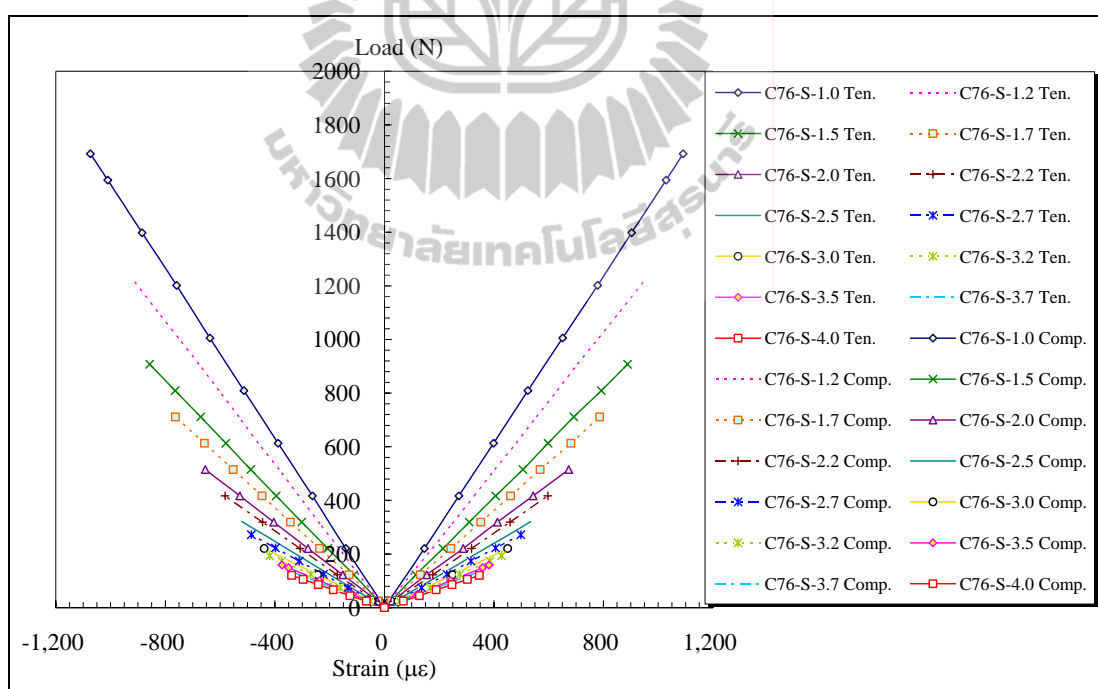


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาว
ของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

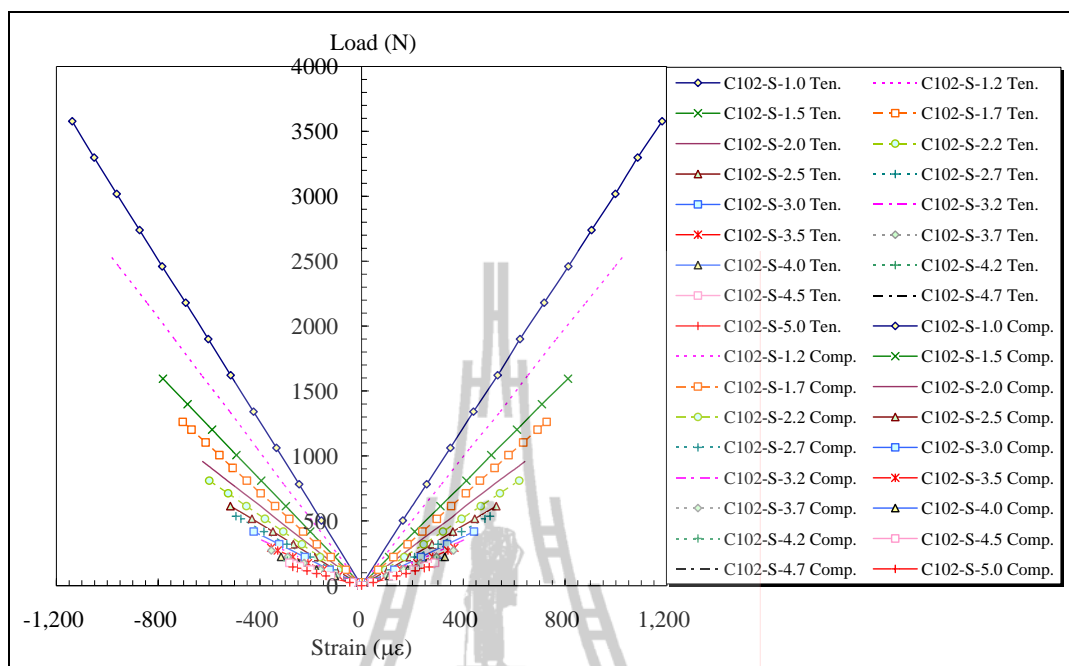
4.3.3 ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

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

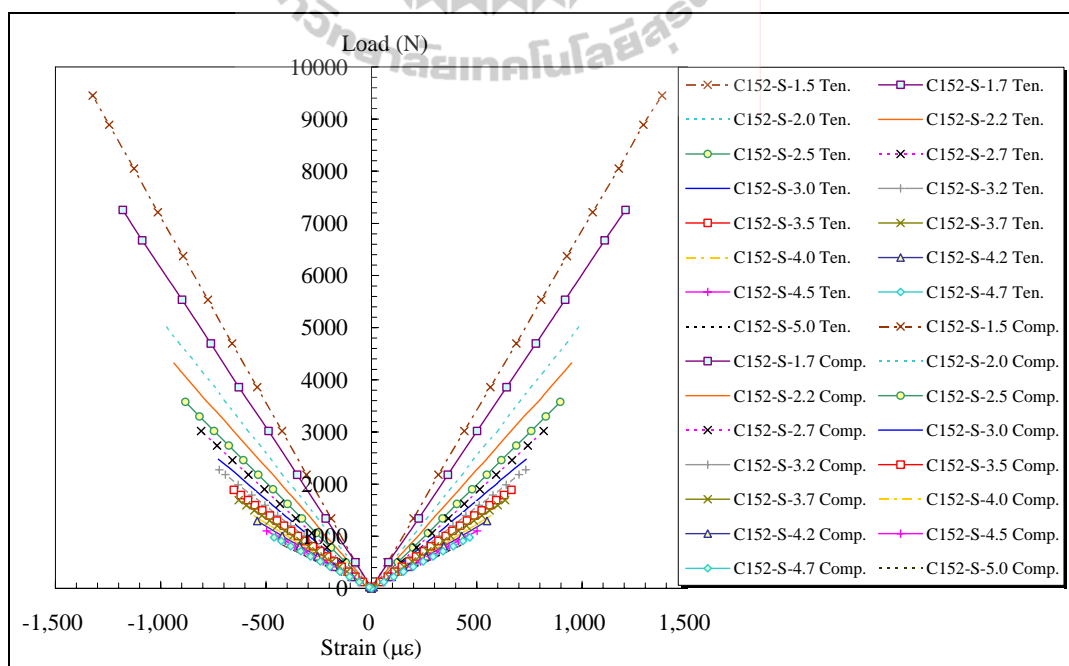
รูปที่ 4.36 ถึงรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ระหว่าง $500-1,200 \mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (ภาคผนวก ก.4.1 และ ก.4.2) นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

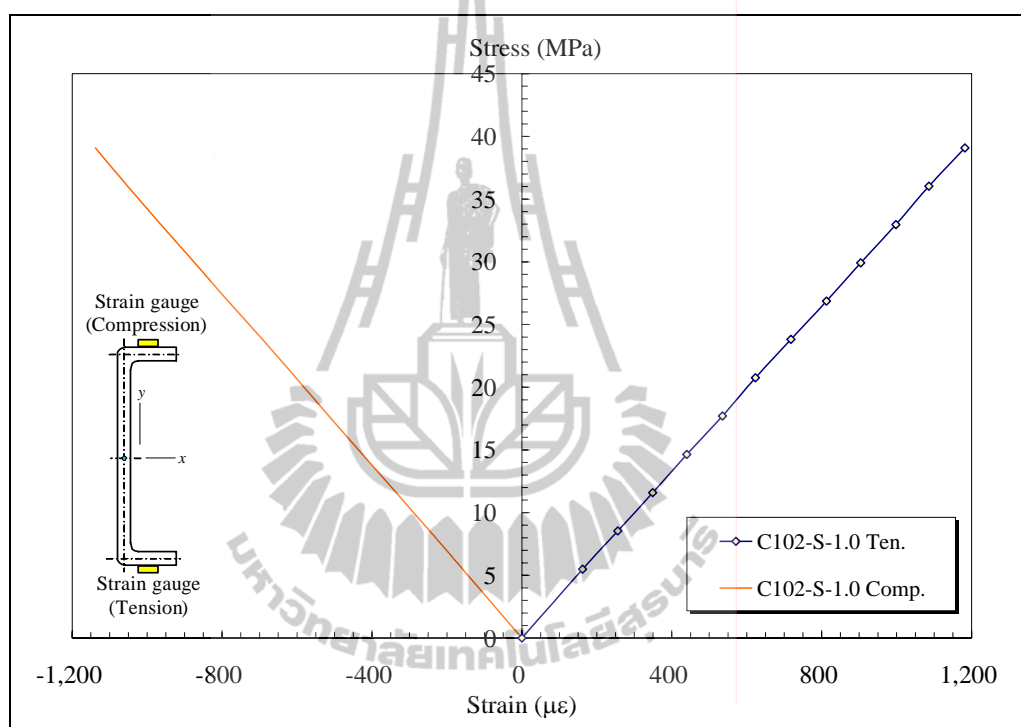


รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

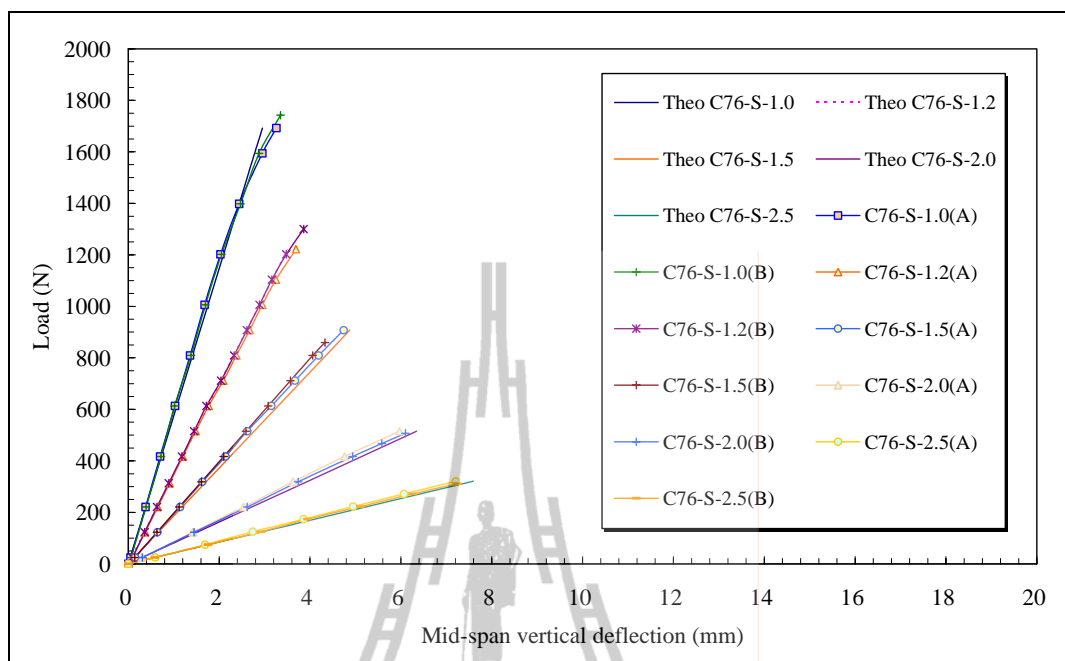
รูปที่ 4.39 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.1 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ (ภาคผนวก ก.4.4)



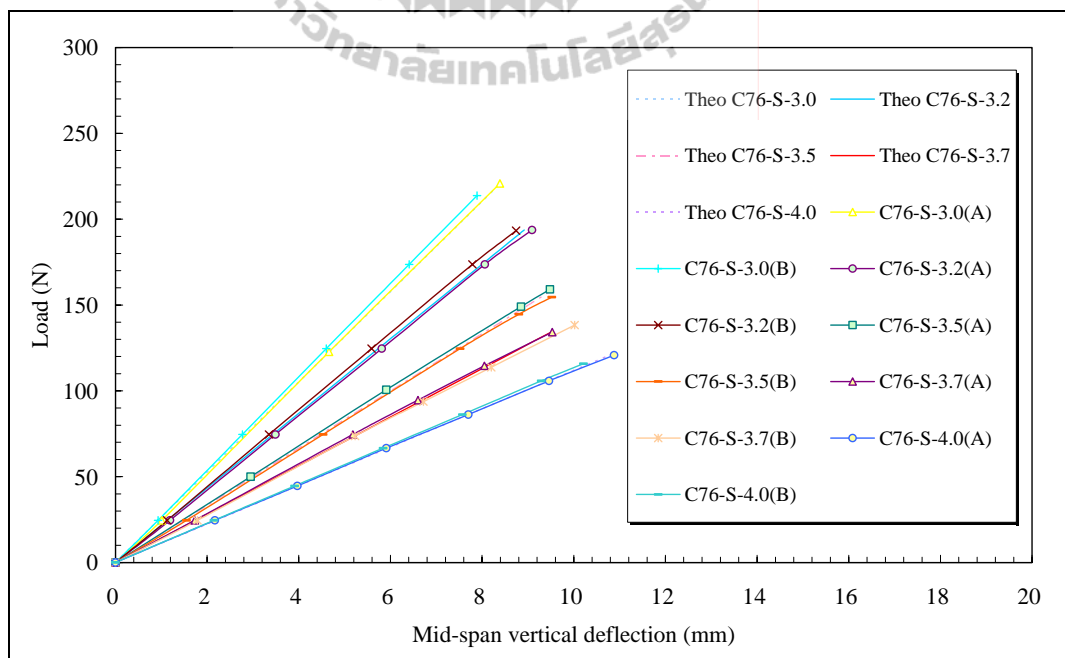
รูปที่ 4.39 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.4 การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

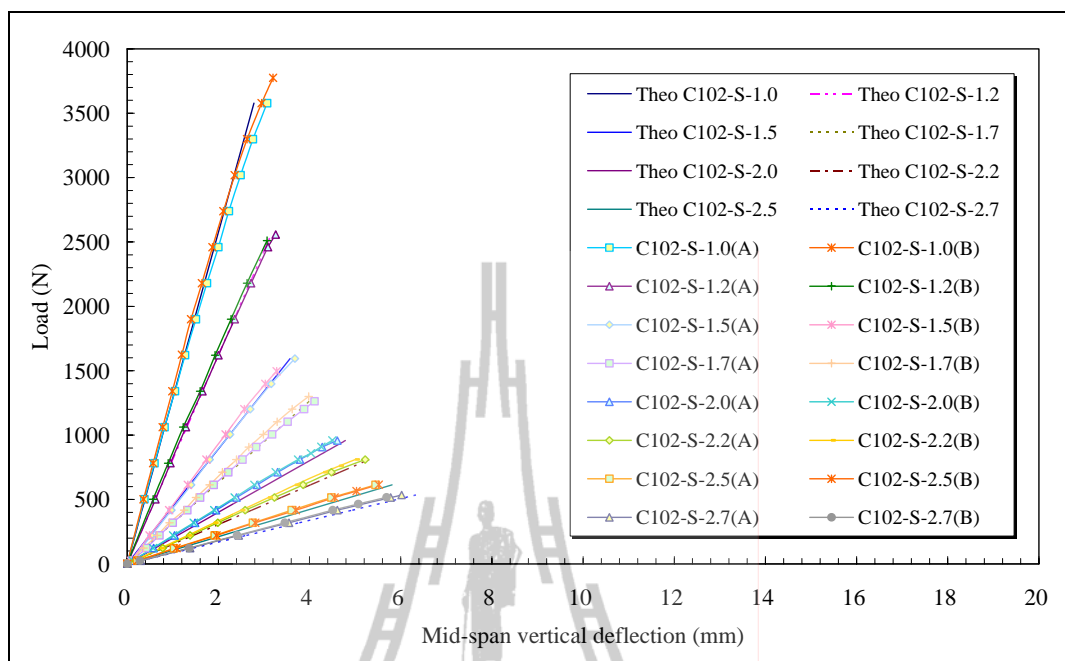
รูปที่ 4.40 ถึงรูปที่ 4.45 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวค้ำที่กึ่งกลางคาน โดยระยะการแอ่นตัวแนวค้ำดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (3.5) จากรูปพบว่าระยะการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้และที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko อยู่ในช่วงระหว่าง 2-8%



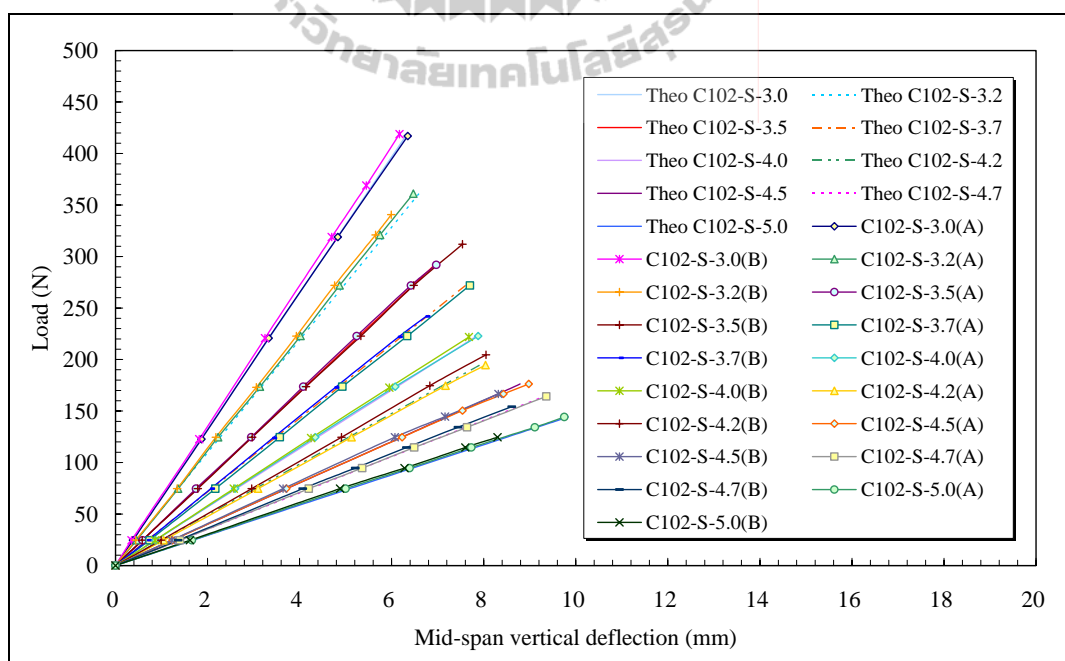
รูปที่ 4.40 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



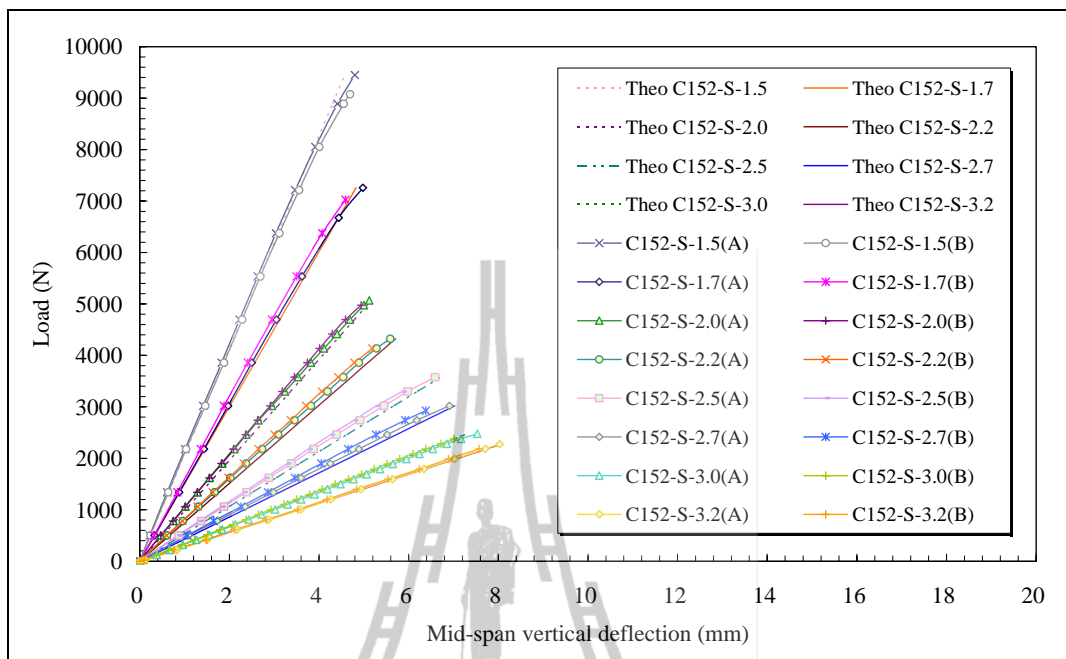
รูปที่ 4.41 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



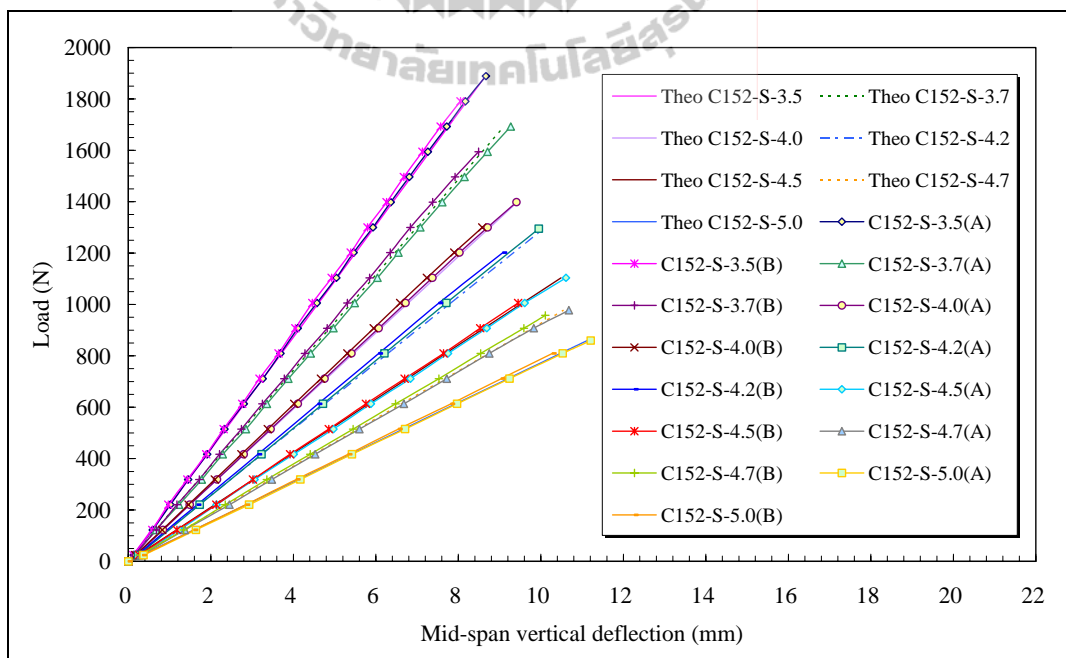
รูปที่ 4.42 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.43 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.44 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.45 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน 152×43×10 mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

4.3.5 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย

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

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L / 4 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน FRP ที่มีจูดรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.3) จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 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 อาจมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.13 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 4.14 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ 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 4.15 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งค้ำจากการทดสอบและสมการ LRFD

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

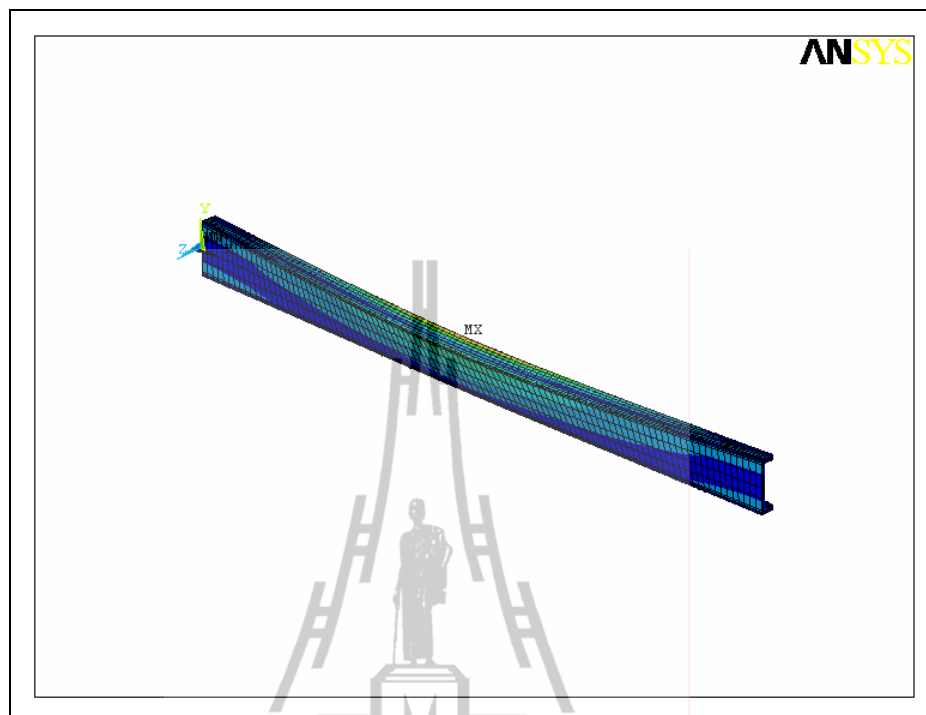
Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C152-S-1.5	9.9	3543.6	3403.8	3473.7	3941.9	0.88
C152-S-1.7	11.2	3084.1	2986.2	3035.2	3382.1	0.90
C152-S-2.0	13.2	2534.6	2488.0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

4.3.6 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย

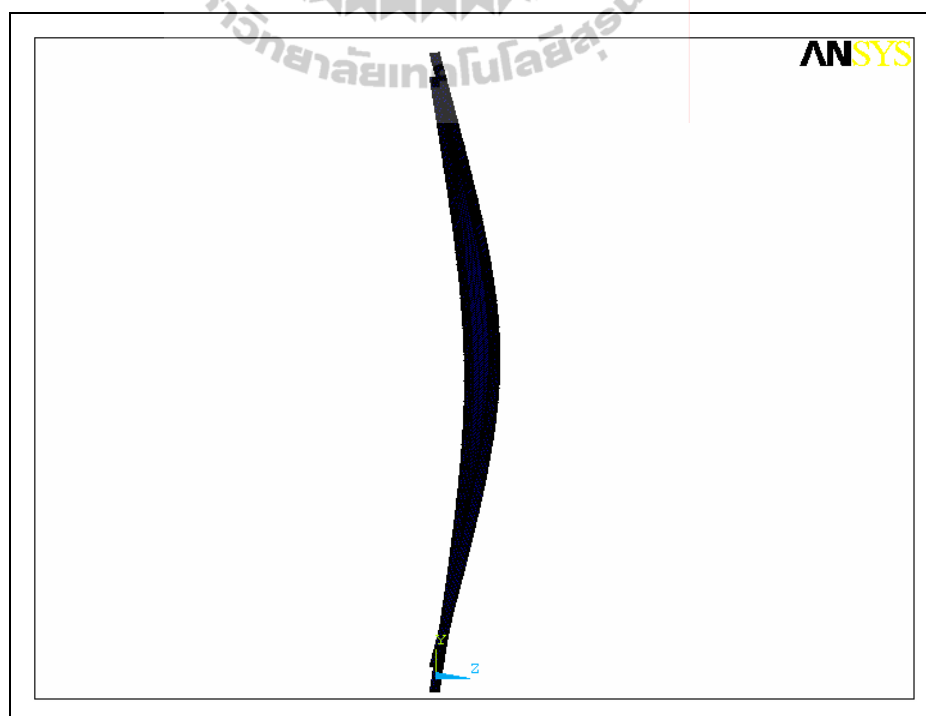
การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling ให้ผลเฉลยประกอบด้วย น้ำหนักโก่งเดาะและลักษณะของการเสียรูปดังแสดงในรูปที่ 4.46 ถึงรูปที่ 4.51 จากรูปพบว่าตัวอย่างมีลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) เหมือนลักษณะการวิบัติที่เกิดในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.52 ถึงรูปที่ 4.54 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างที่มีจุกรองรับแบบง่าย โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบ สมการการคำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko และผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปพบว่าผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานที่มีจุกรองรับแบบง่ายได้ โดยมีค่าใกล้เคียงกับการแอ่นตัวที่คำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko และค่าที่ทดสอบได้จากห้องปฏิบัติการ

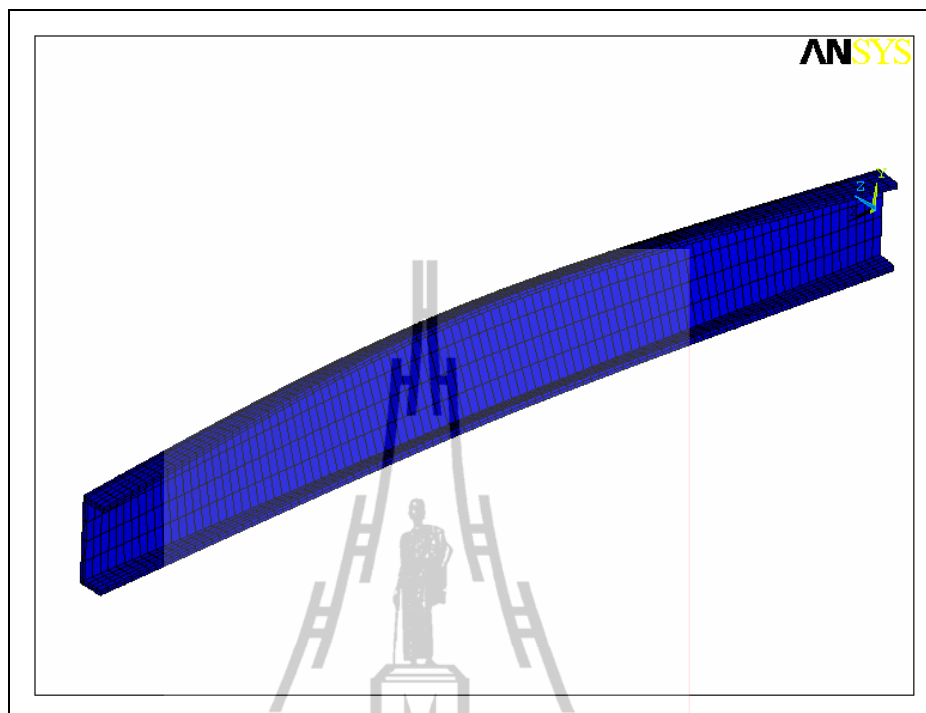
ตารางที่ 4.16 ถึงตารางที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย จากตารางพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97-1.03 ดังนั้น การวิเคราะห์คาน CFRP โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling สามารถจำลองพฤติกรรมและน้ำหนักโก่งเดาะของคาน CFRP ภายใต้แรงดัดได้ใกล้เคียงและให้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ LRFD และเพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน จึงถูกแสดงในรูปที่ 4.55 ถึงรูปที่ 4.57 จากรูปพบว่าสมการ LRFD สำหรับประมาณค่าโมเมนต์โก่งเดาะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีความแตกต่างอยู่ระหว่าง $\pm 3\%$ และมีความแตกต่างกับผลทดสอบที่ได้ประมาณ 1-11% โดยมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM (initial crookedness) และตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



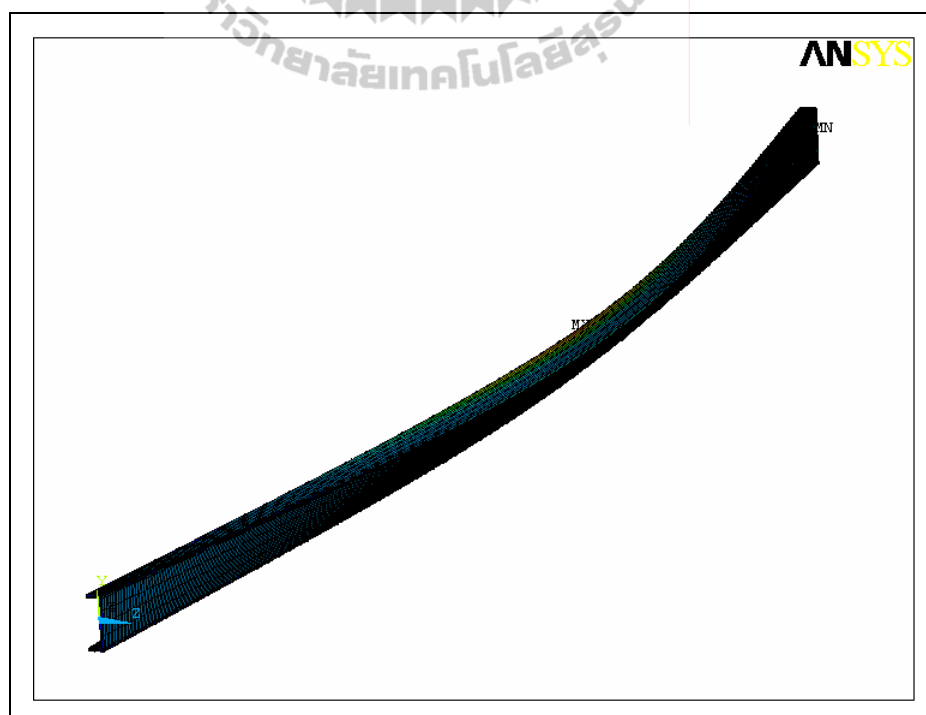
รูปที่ 4.46 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C76-S-1.0



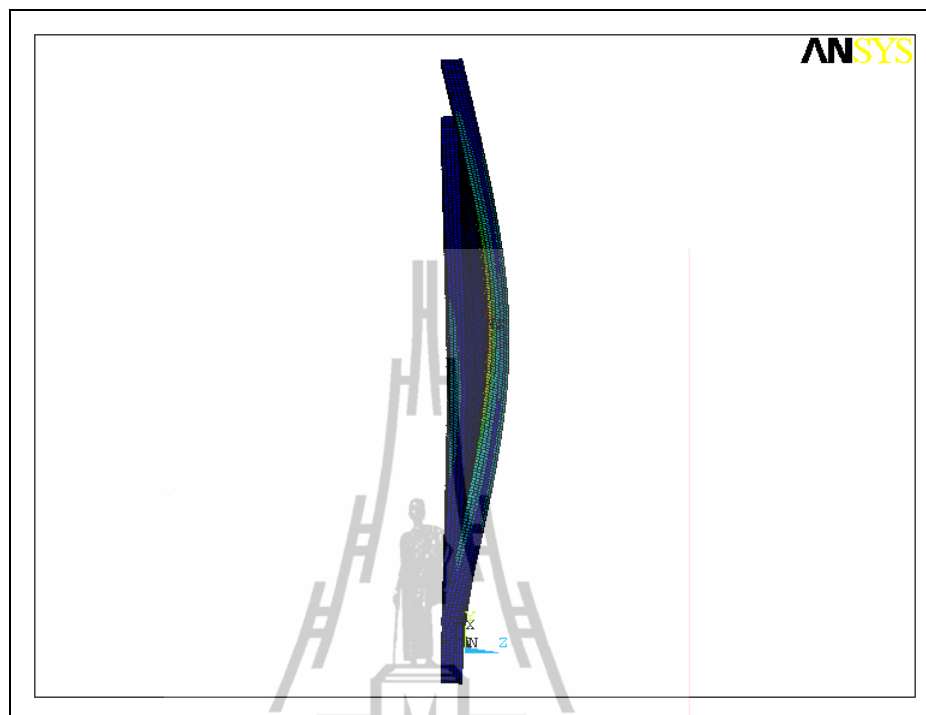
รูปที่ 4.47 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C76-S-3.0



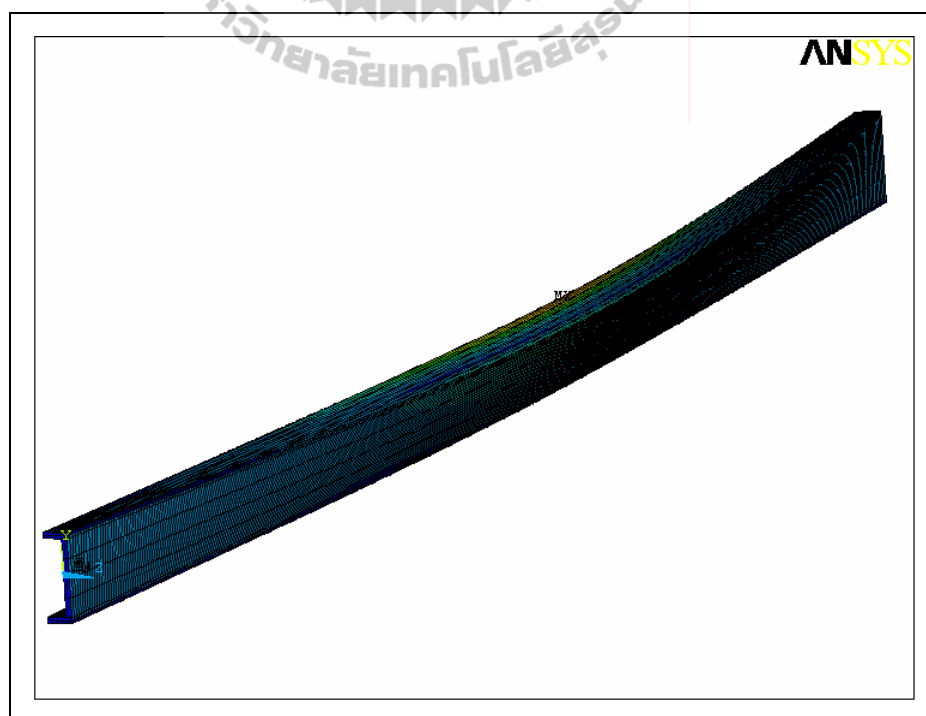
รูปที่ 4.48 รูปแบบการ โกงเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-S-1.0



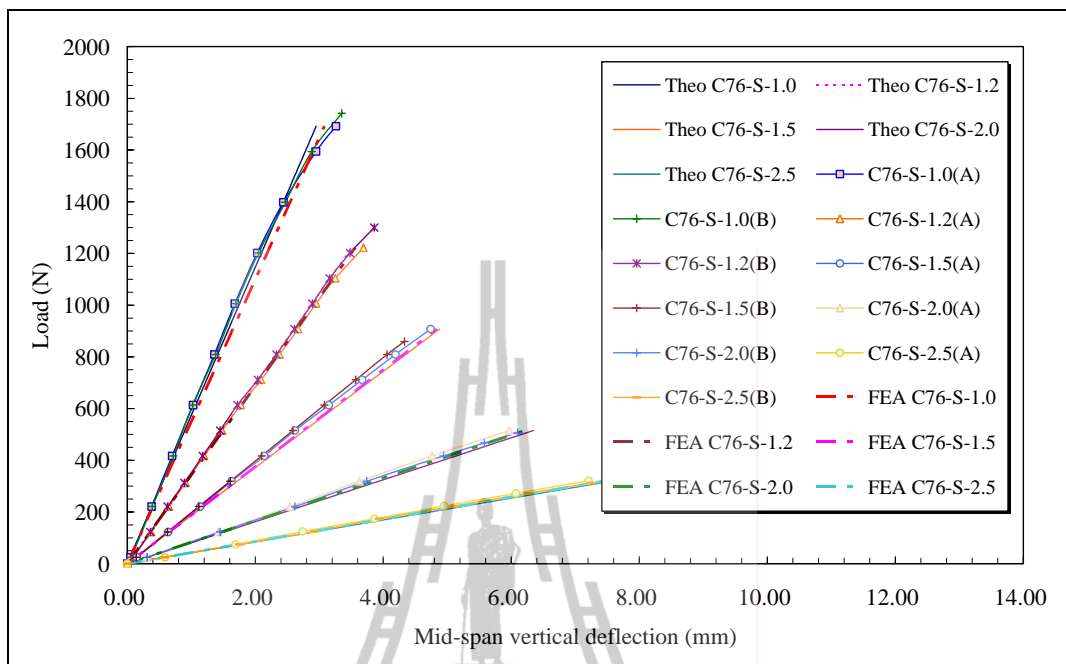
รูปที่ 4.49 รูปแบบการ โกงเคาะของตัวอย่างทดสอบ C102-S-5.0



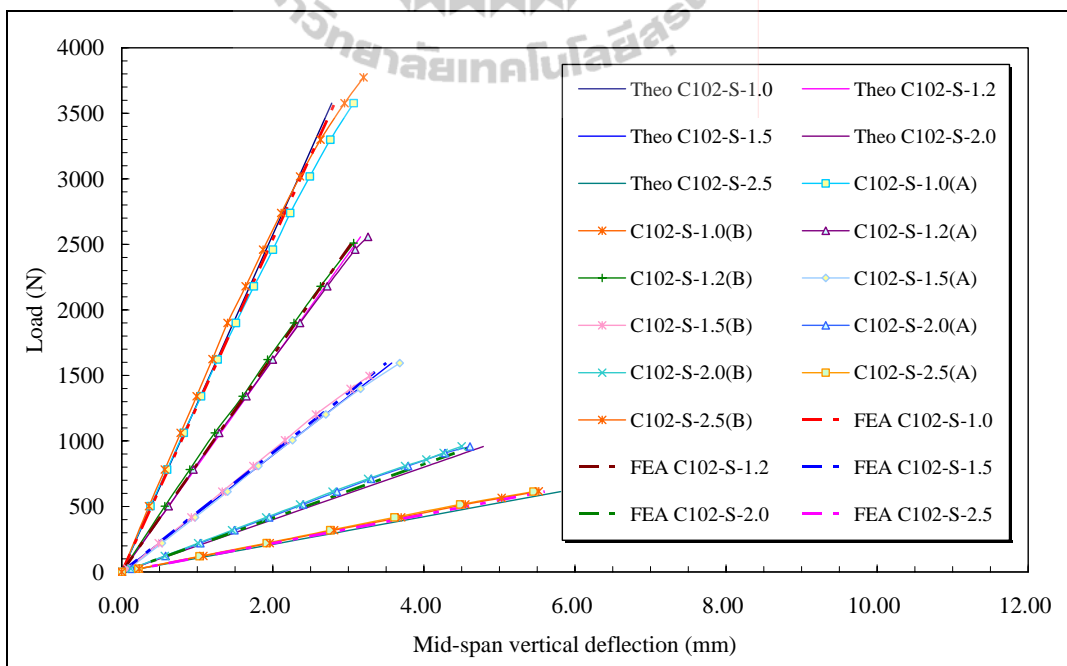
รูปที่ 4.50 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-S-2.0



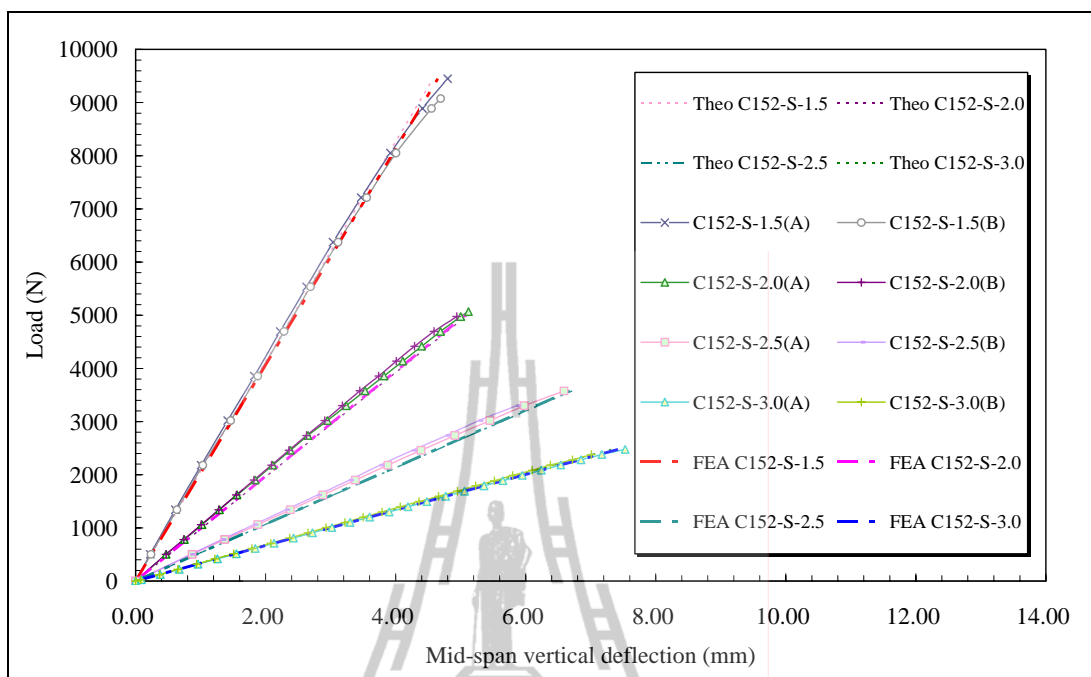
รูปที่ 4.51 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-S-4.0



รูปที่ 4.52 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.53 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.54 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้ง
ของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งค้ำจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

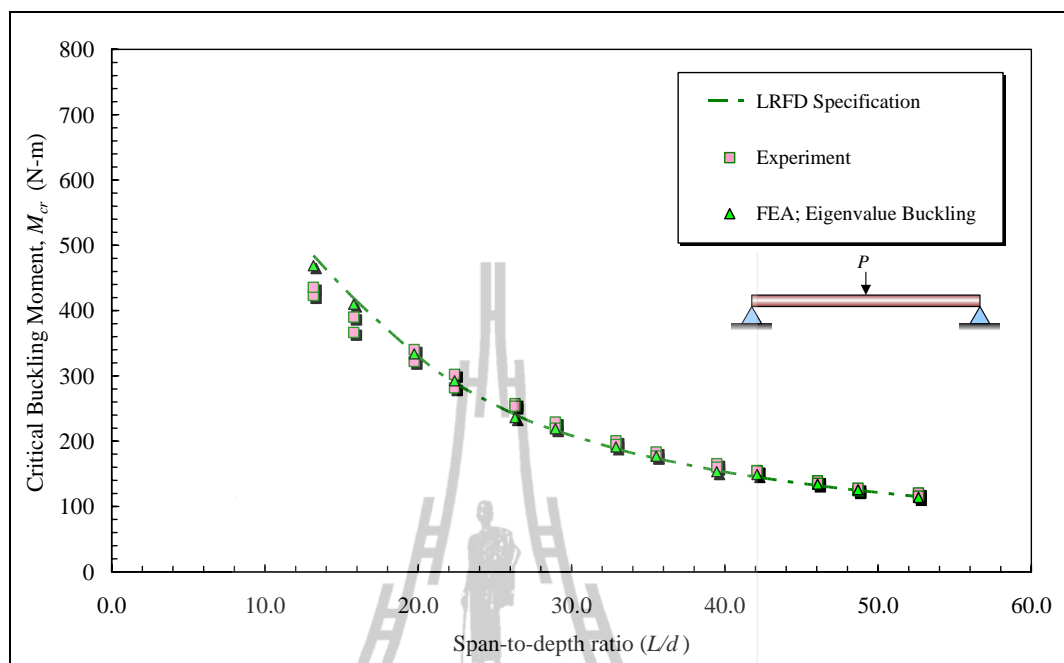
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C76-S-1.0	13.2	1875.2	484.4	1937.6	1.03
C76-S-1.2	15.8	1365.8	419.1	1397.0	1.02
C76-S-1.5	19.7	889.9	335.2	893.9	1.00
C76-S-1.7	22.4	688.1	289.5	681.2	0.99
C76-S-2.0	26.3	472.3	240.7	481.4	1.02
C76-S-2.2	28.9	398.5	216.6	393.8	0.99
C76-S-2.5	32.9	305.8	188.5	301.6	0.99
C76-S-2.7	35.5	262.1	173.6	257.2	0.98
C76-S-3.0	39.5	204.4	155.2	206.9	1.01
C76-S-3.2	42.1	186.1	145.0	181.3	0.97
C76-S-3.5	46.1	153.4	132.1	151.0	0.98
C76-S-3.7	48.7	135.9	124.7	134.8	0.99
C76-S-4.0	52.6	113.8	115.0	115.0	1.01

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

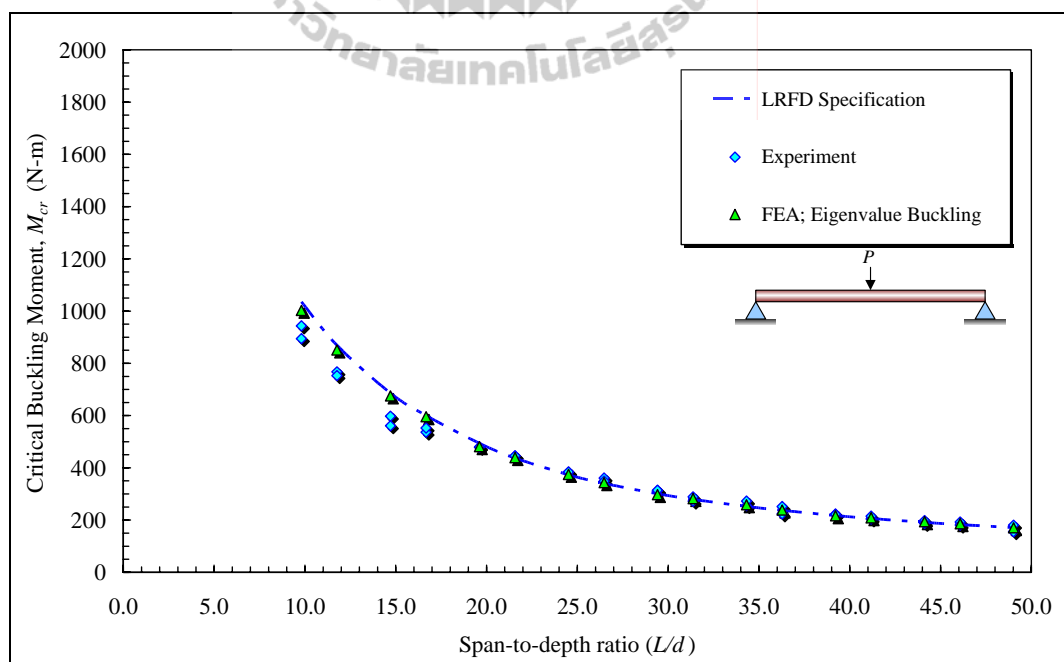
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C102-S-1.0	9.8	4010.1	1035.8	4143.2	1.03
C102-S-1.2	11.8	2836.8	869.1	2897.0	1.02
C102-S-1.5	14.7	1801.1	686.0	1829.3	1.02
C102-S-1.7	16.7	1401.8	600.5	1412.9	1.01
C102-S-2.0	19.6	962.8	494.1	988.2	1.03
C102-S-2.2	21.6	798.3	437.4	795.3	1.00
C102-S-2.5	24.5	599.8	373.4	597.4	1.00
C102-S-2.7	26.5	508.8	340.4	504.3	0.99
C102-S-3.0	29.4	396.8	300.8	401.1	1.01
C102-S-3.2	31.4	353.1	279.3	349.1	0.99
C102-S-3.5	34.3	295.5	252.4	288.5	0.98
C102-S-3.7	36.3	258.1	237.2	256.4	0.99
C102-S-4.0	39.2	216.5	217.6	217.6	1.01
C102-S-4.2	41.2	198.9	206.3	196.5	0.99
C102-S-4.5	44.1	172.2	191.5	170.2	0.99
C102-S-4.7	46.1	158.3	182.8	155.6	0.98
C102-S-5.0	49.0	136.5	171.1	136.9	1.00

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

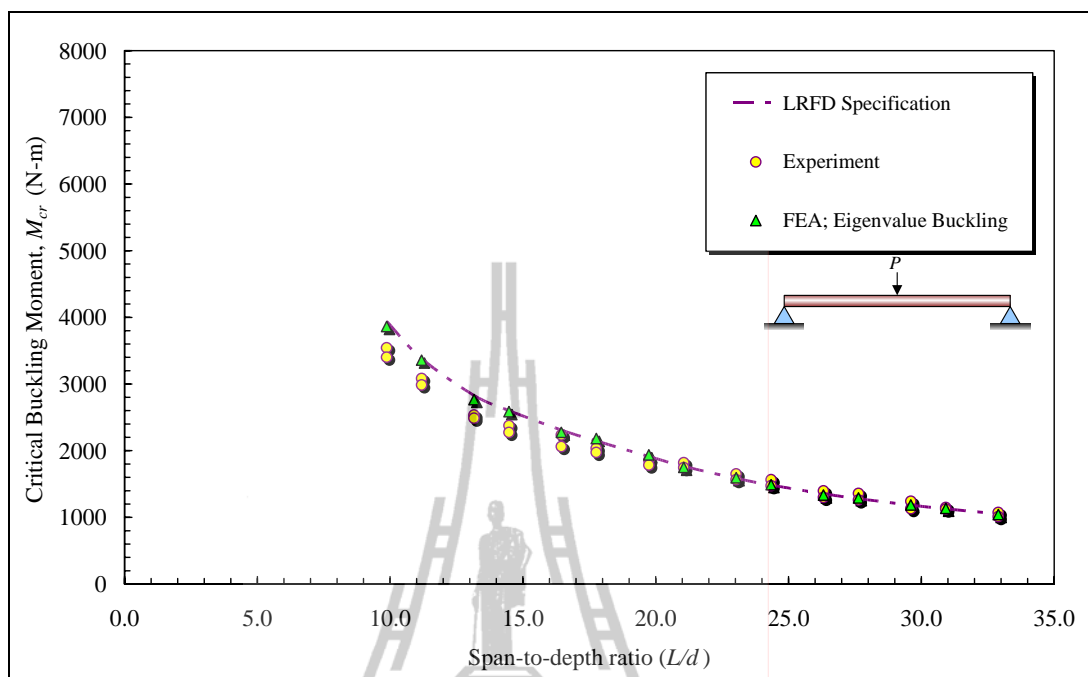
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C152-S-1.5	9.9	10301.2	3941.9	10511.7	1.02
C152-S-1.7	11.2	7900.4	3382.1	7957.9	1.01
C152-S-2.0	13.2	5532.8	2829.8	5659.6	1.02
C152-S-2.2	14.5	4701.1	2601.5	4730.0	1.01
C152-S-2.5	16.4	3640.9	2309.6	3695.4	1.01
C152-S-2.7	17.8	3232.5	2146.3	3179.7	0.98
C152-S-3.0	19.7	2584.1	1913.0	2550.7	0.99
C152-S-3.2	21.1	2187.8	1766.4	2208.0	1.01
C152-S-3.5	23.0	1821.5	1585.1	1811.5	0.99
C152-S-3.7	24.3	1610.9	1484.1	1604.4	1.00
C152-S-4.0	26.3	1334.2	1355.1	1355.1	1.02
C152-S-4.2	27.6	1231.1	1281.2	1220.2	0.99
C152-S-4.5	29.6	1054.8	1184.7	1053.1	1.00
C152-S-4.7	30.9	965.5	1128.2	960.2	0.99
C152-S-5.0	32.9	833.9	1053.2	842.6	1.01



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.56 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งคดและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

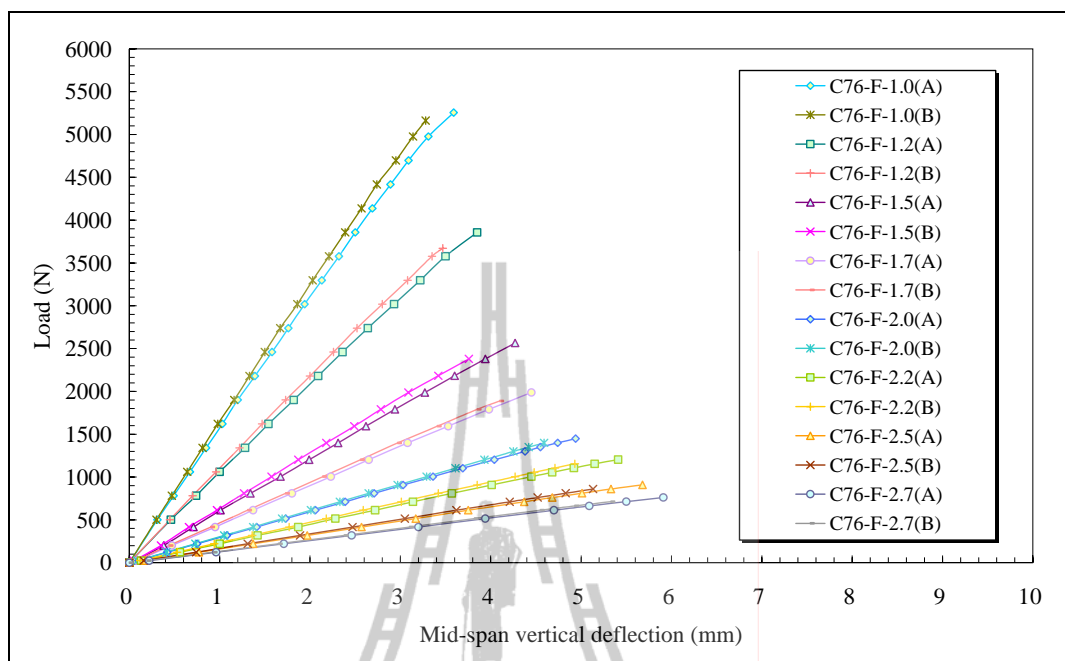
4.4 คาน FRP หน้าตัดรูปร่างที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น

4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น

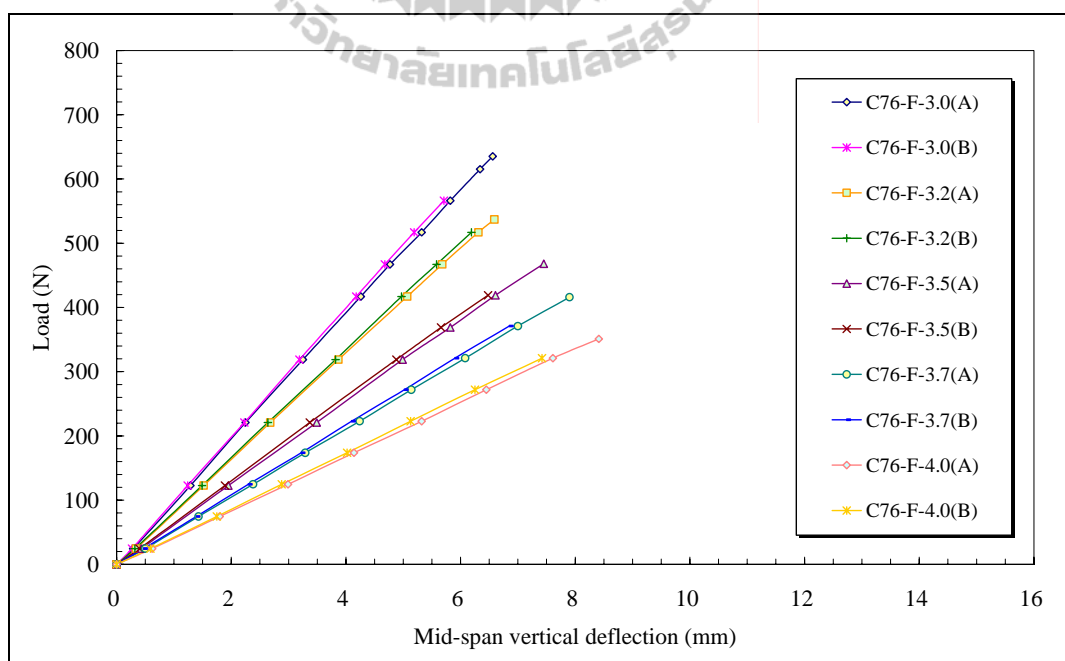
รูปที่ 4.58 ถึงรูปที่ 4.63 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวตั้ง รูปที่ 4.64 ถึงรูปที่ 4.66 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจตุรรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

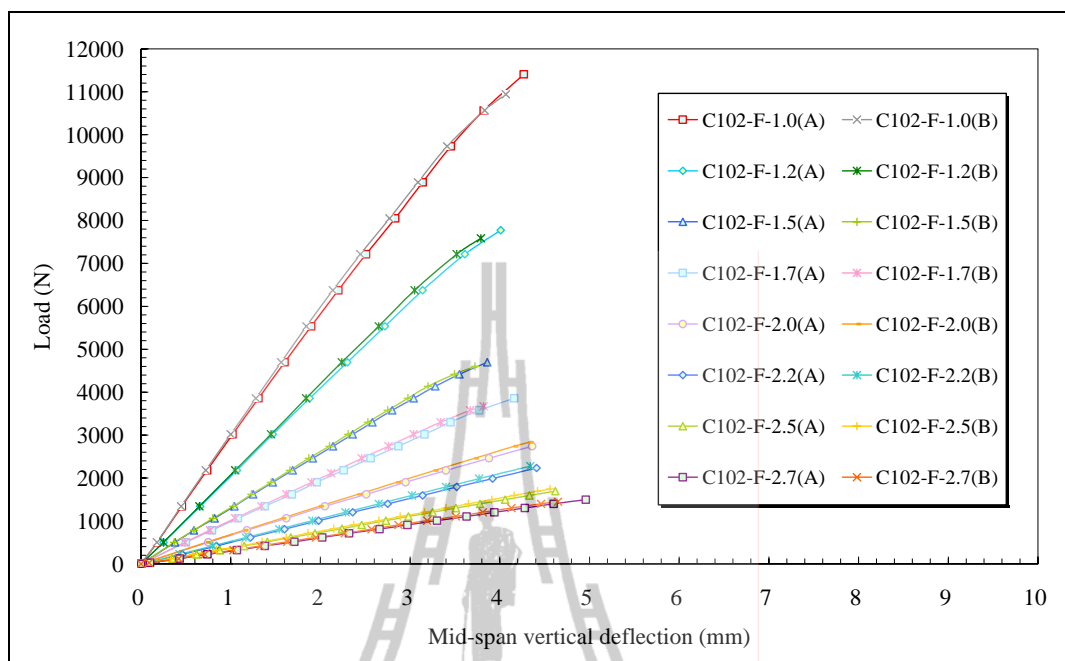
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีจตุรรองรับยึดแน่นมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างในกลุ่มนี้แตกต่างจากลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีจตุรรองรับแบบง่าย กล่าวคือ บริเวณจตุรรองรับถึงจุดดัดกลับ (inflection point) หรือความยาวประมาณ $L/6$ จากจตุรรองรับทั้งสองด้านจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ค่อนข้างน้อย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.67 ถึงรูปที่ 4.69 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน FRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



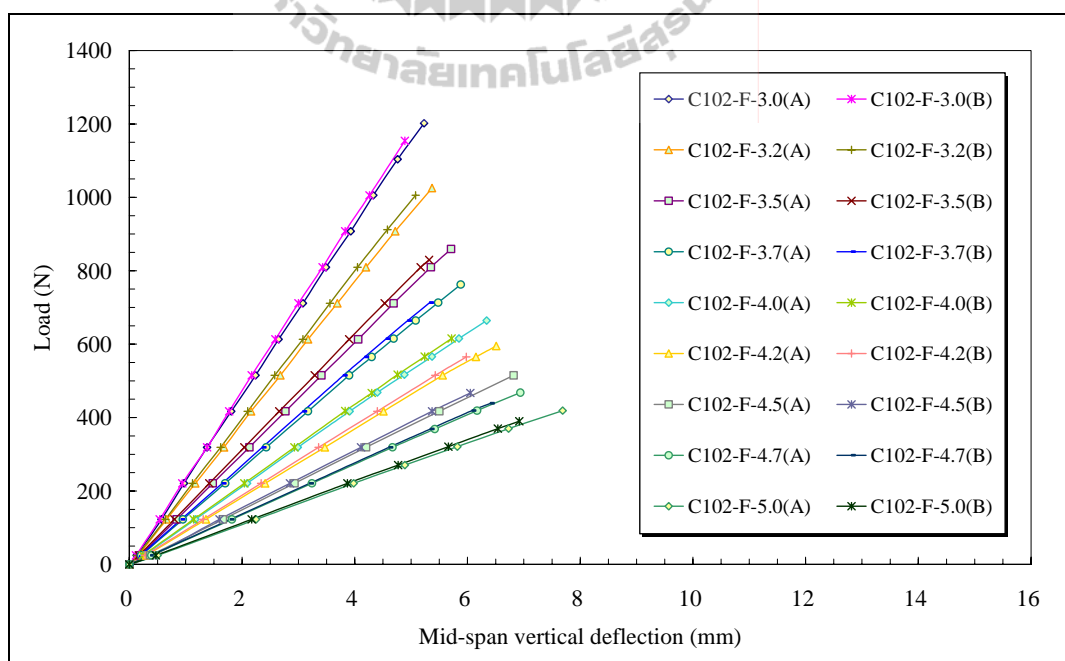
รูปที่ 4.58 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



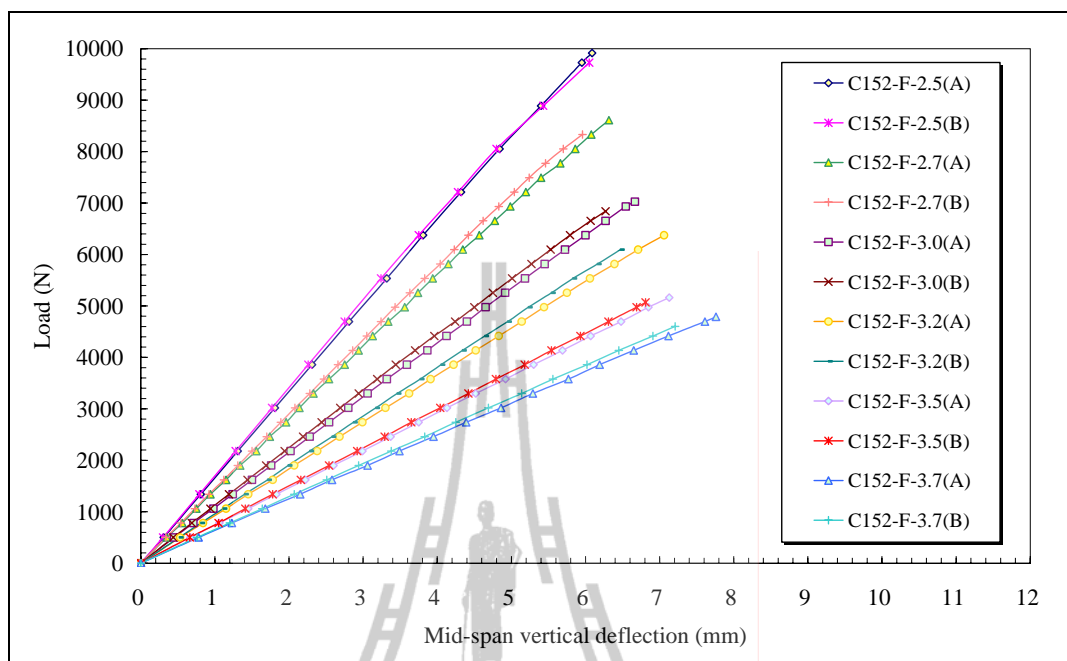
รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



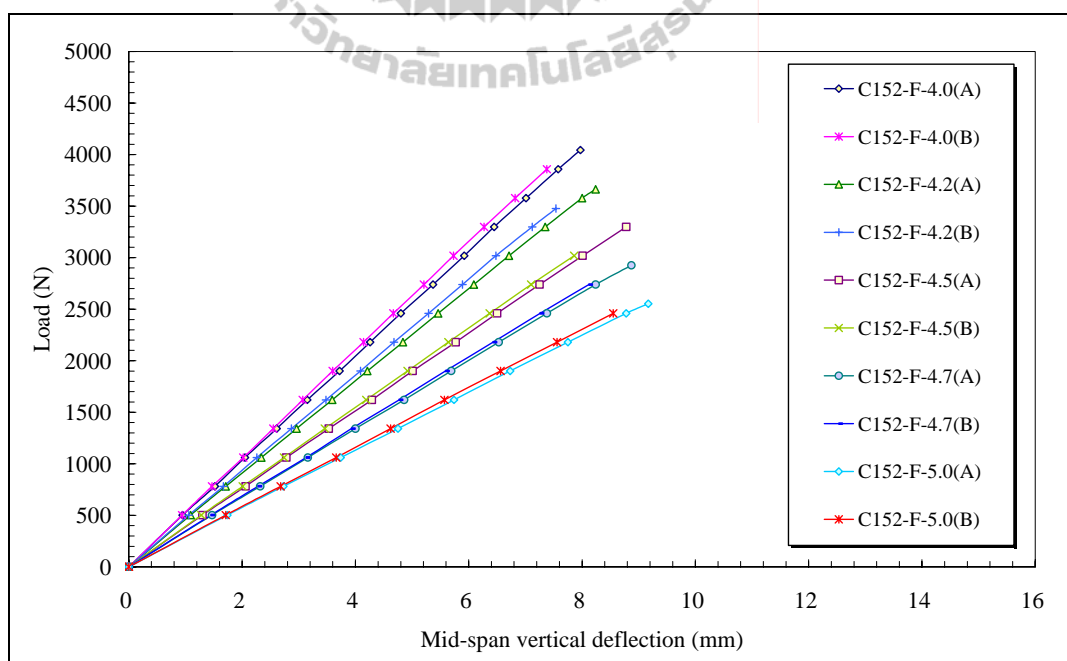
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



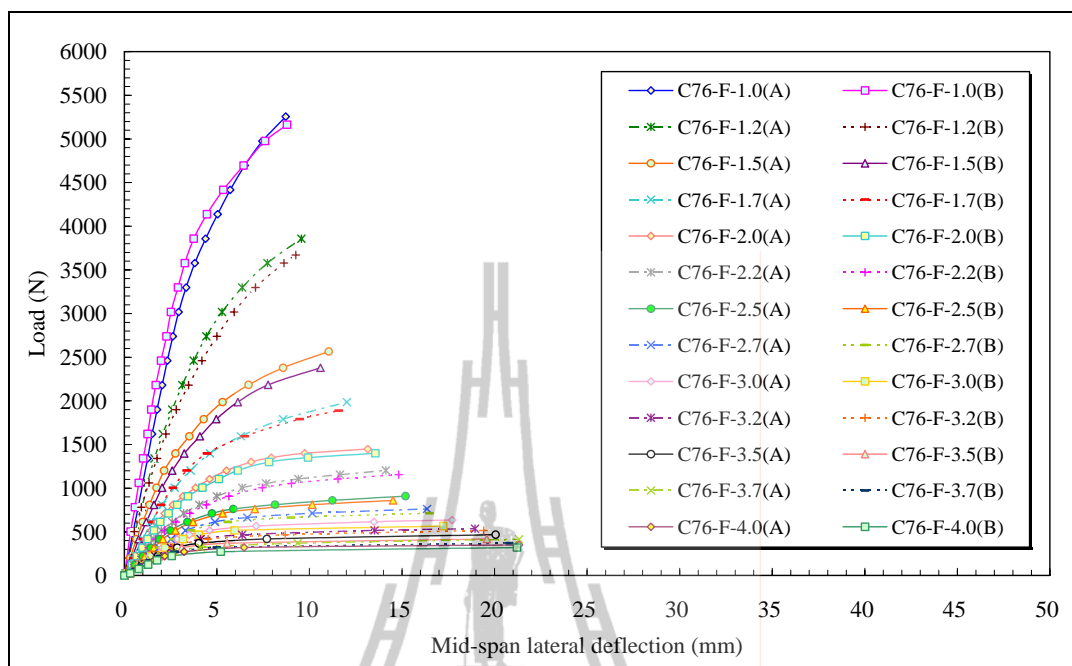
รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



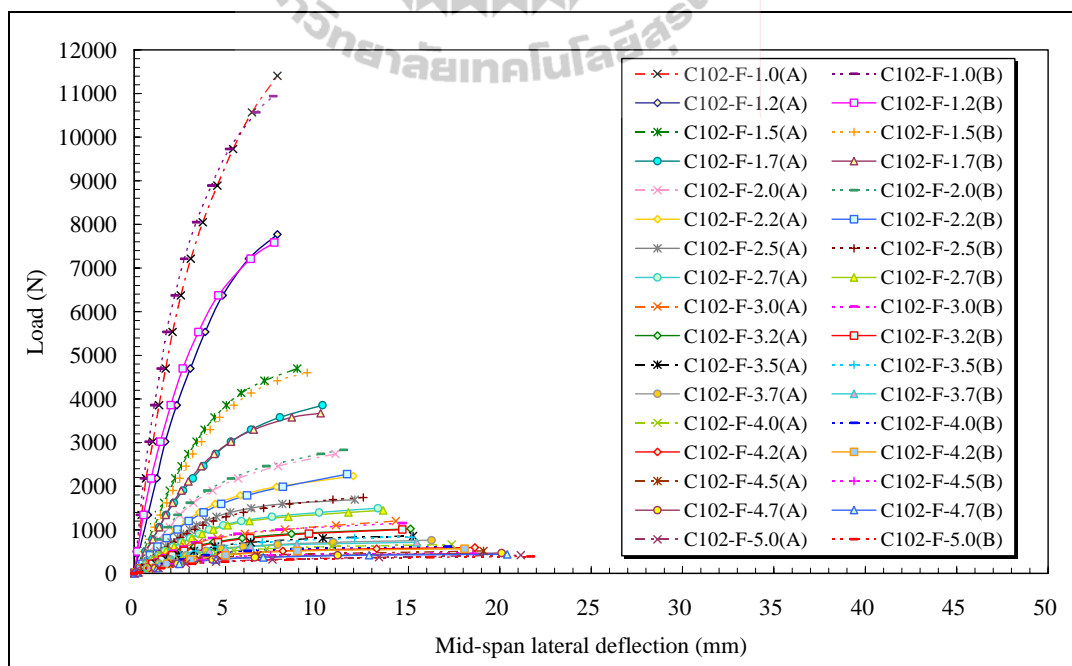
รูปที่ 4.62 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



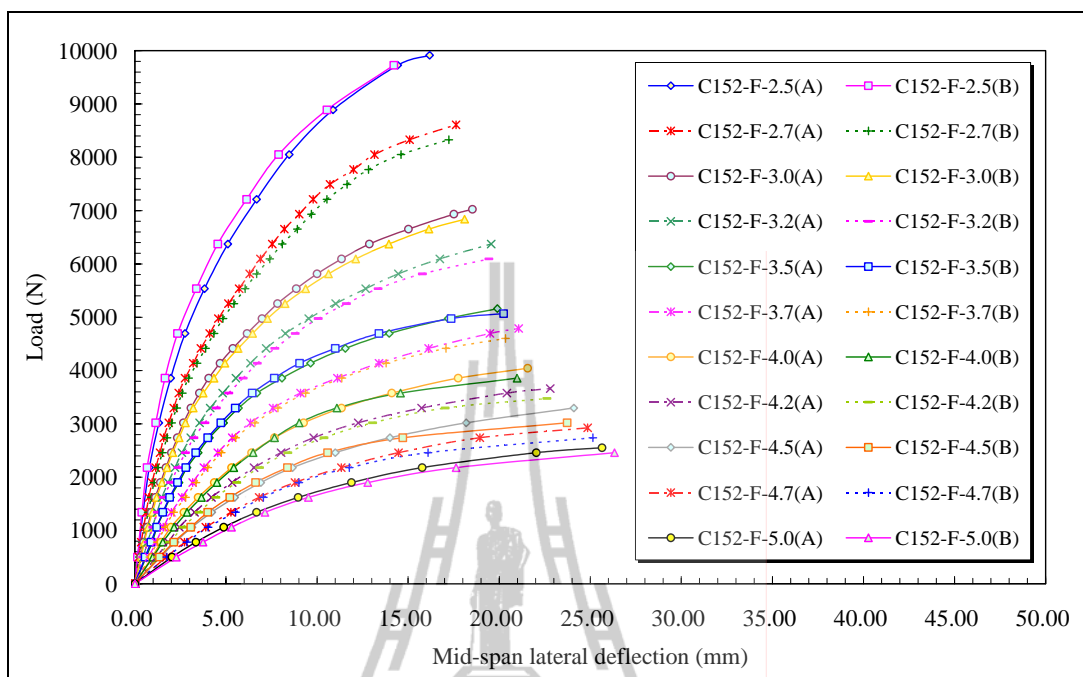
รูปที่ 4.63 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.64 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



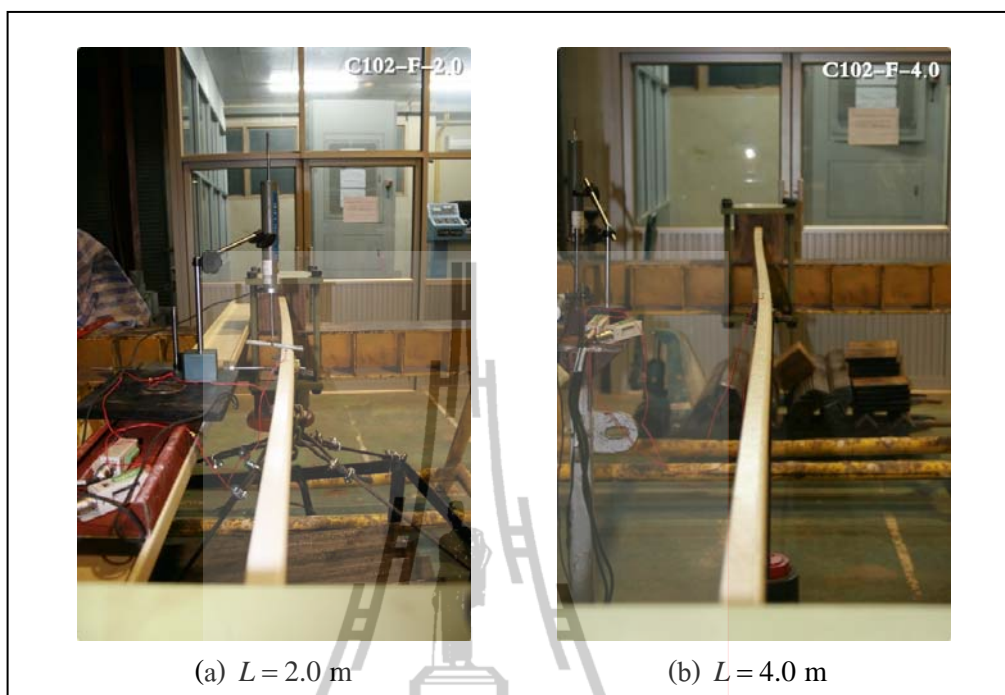
รูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.66 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างแกน CFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.67 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.68 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.69 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 4.19 ถึงตารางที่ 4.21 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 4.70 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 4.19 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

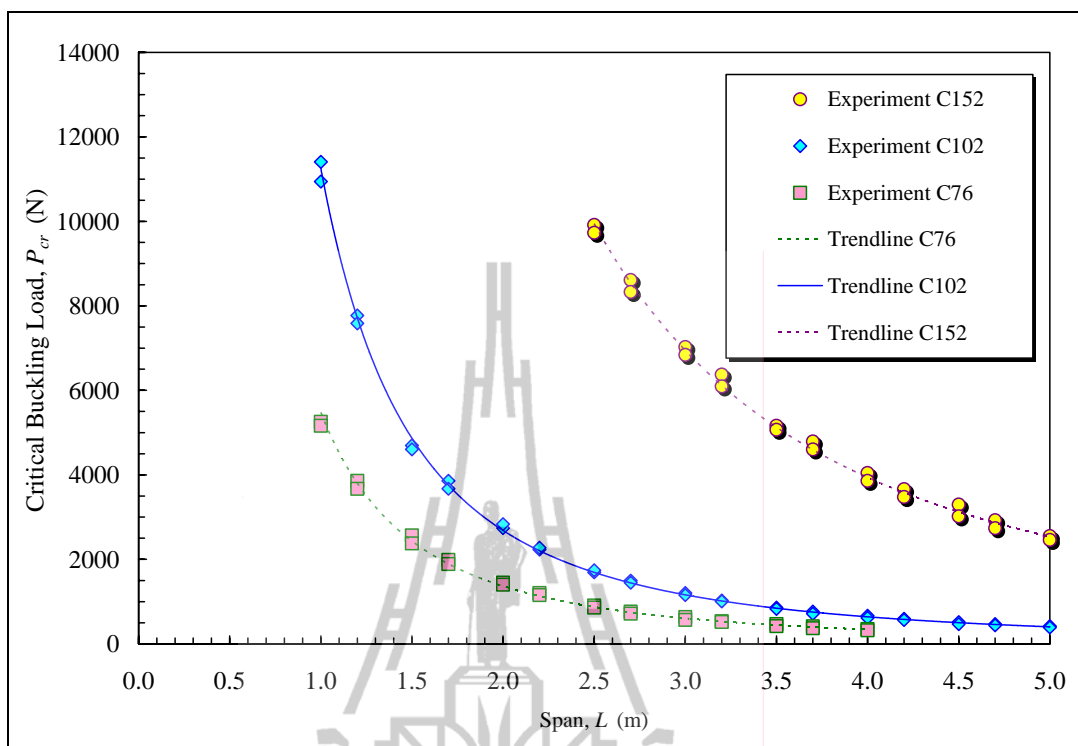
Specimens	Dimensions ($d \times b \times t$) (mm \times mm \times mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-F-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	5255.5	5162.3	5208.9
C76-F-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	3857.5	3671.1	3764.3
C76-F-1.5	$76 \times 22 \times 6$	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 4.20 ผลการทดสอบตัวอย่างแกนขนาด $102 \times 29 \times 6$ 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)
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 4.21 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

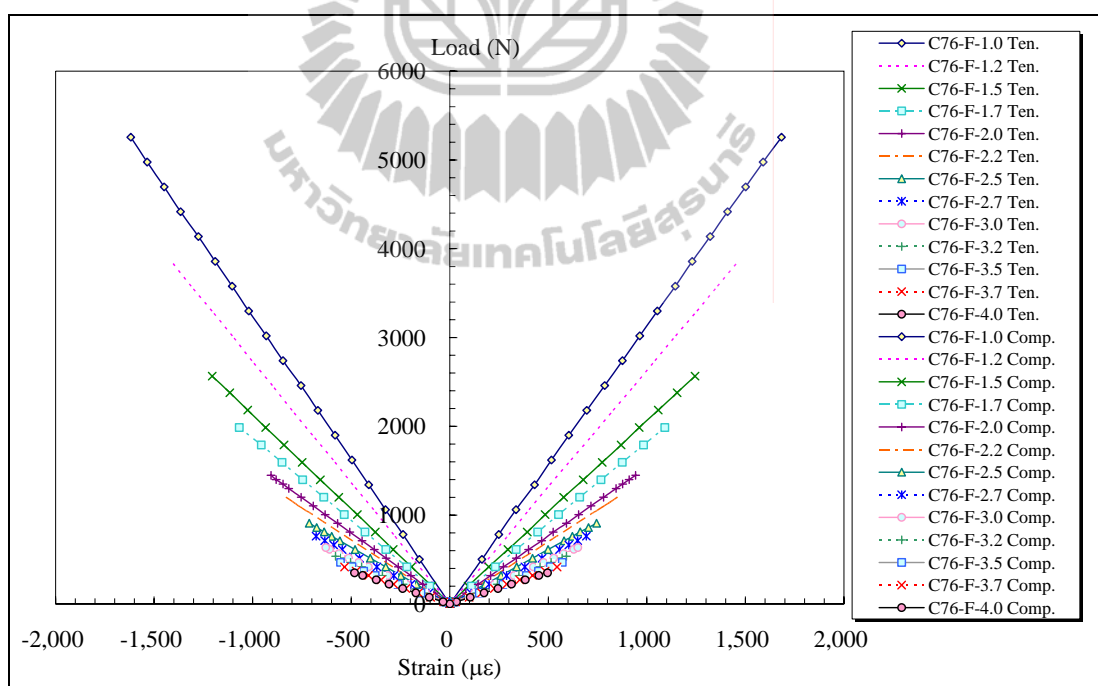


รูปที่ 4.70 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

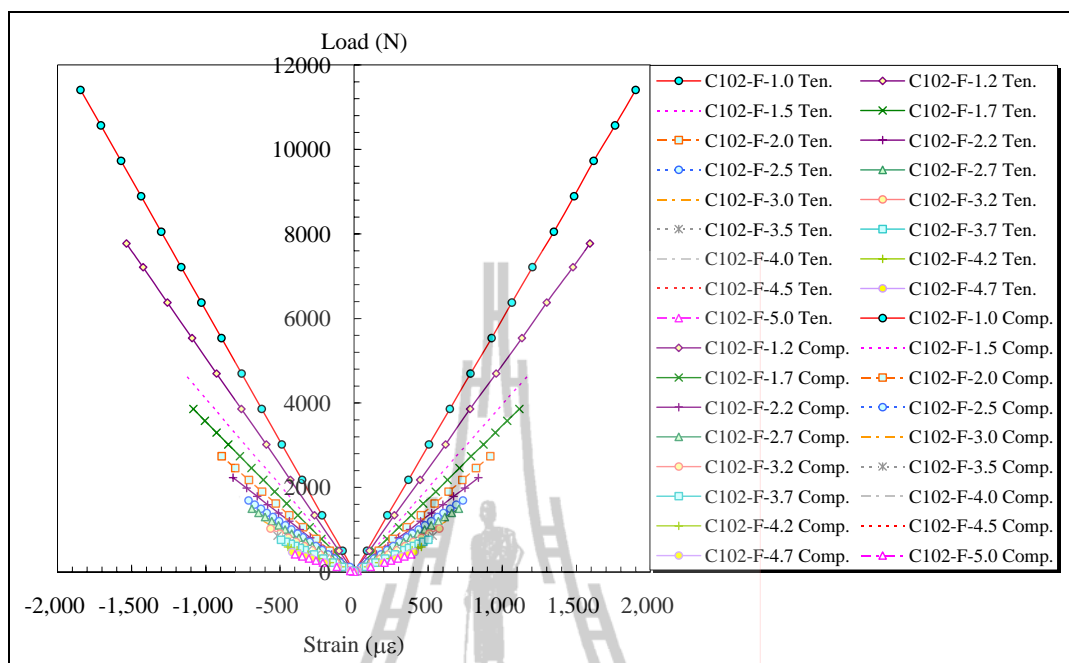
4.4.3 ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

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

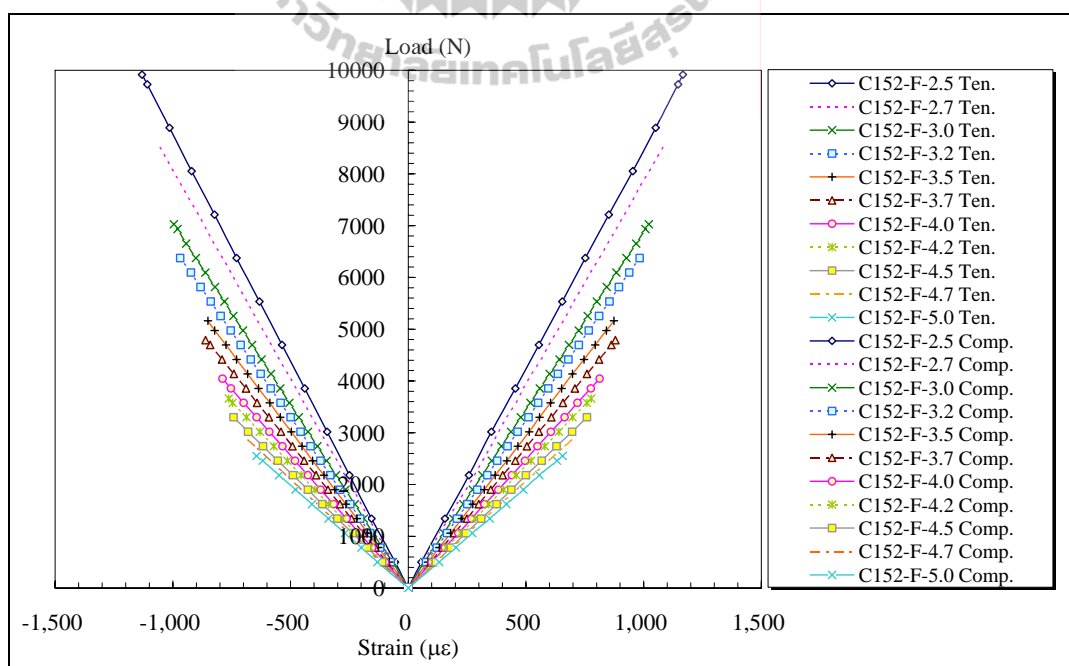
รูปที่ 4.71 ถึงรูปที่ 4.73 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าประมาณ 500-2,000 $\mu\epsilon$ ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ (ภาคผนวก ก.4.1 และ ก.4.2) นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.71 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

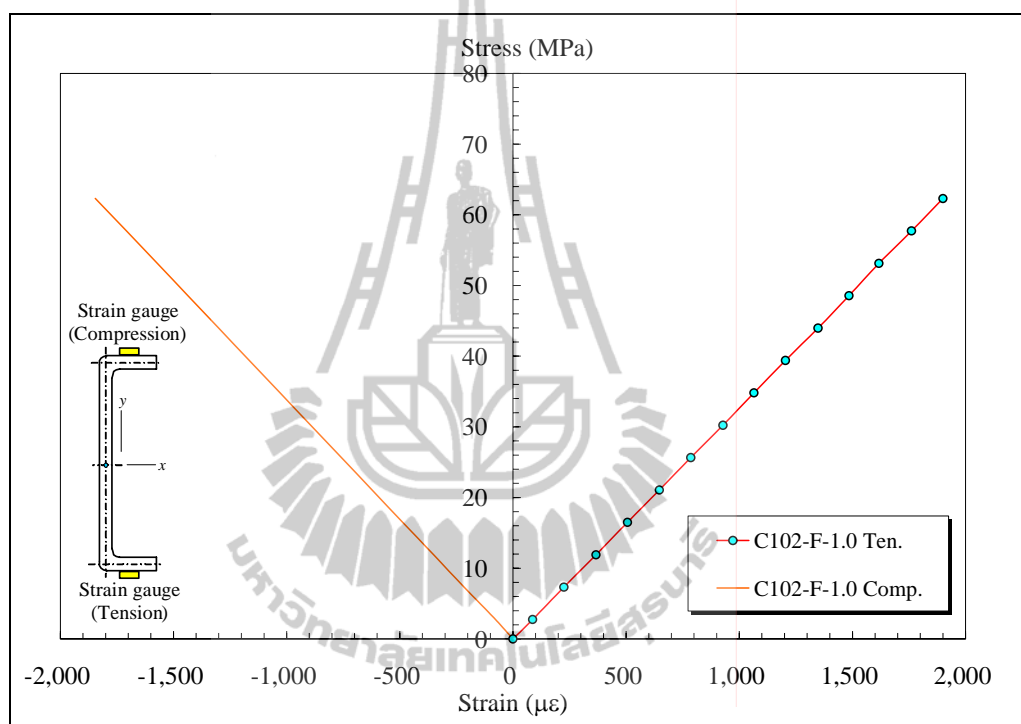


รูปที่ 4.72 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.73 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

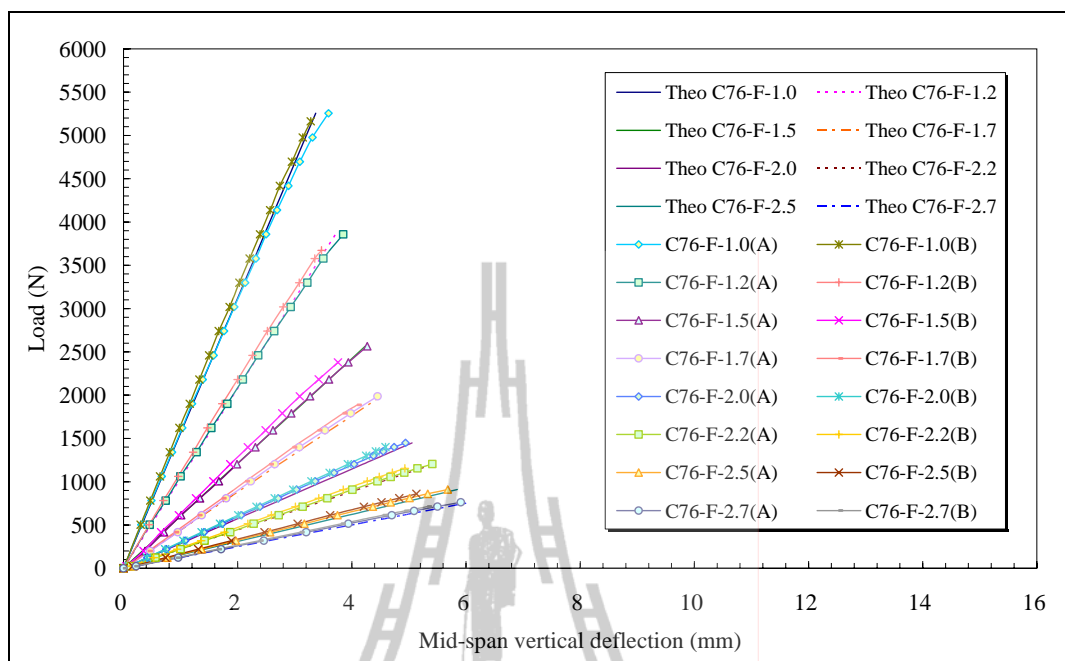
รูปที่ 4.74 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.6 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ (ภาคผนวก ก.4.4)



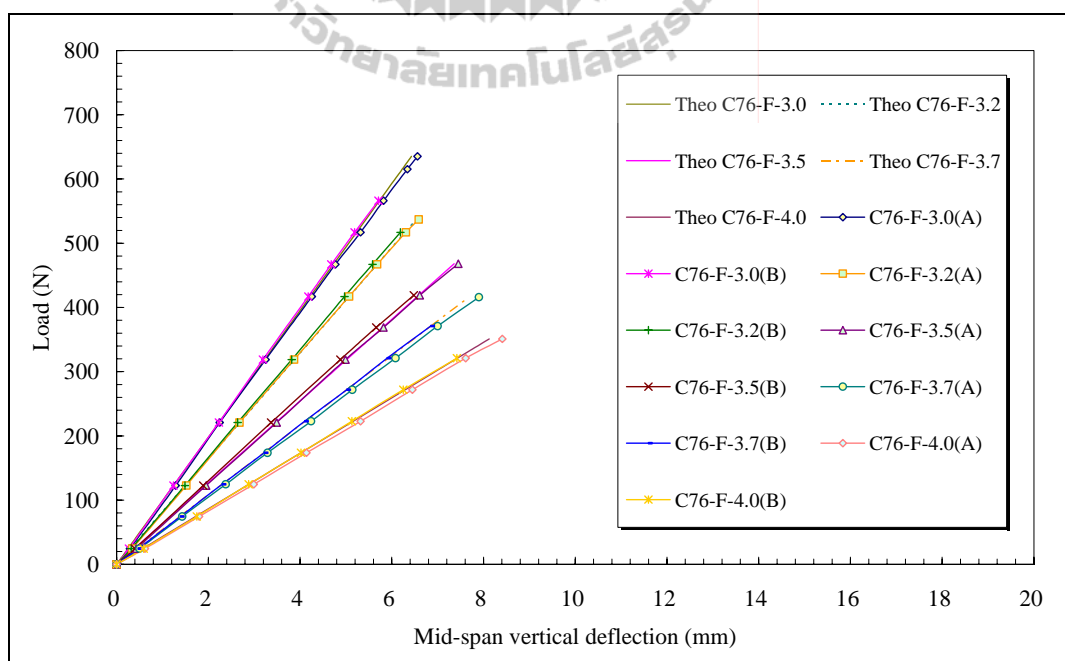
รูปที่ 4.74 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.4 การเปรียบเทียบระยะการแอ่นตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

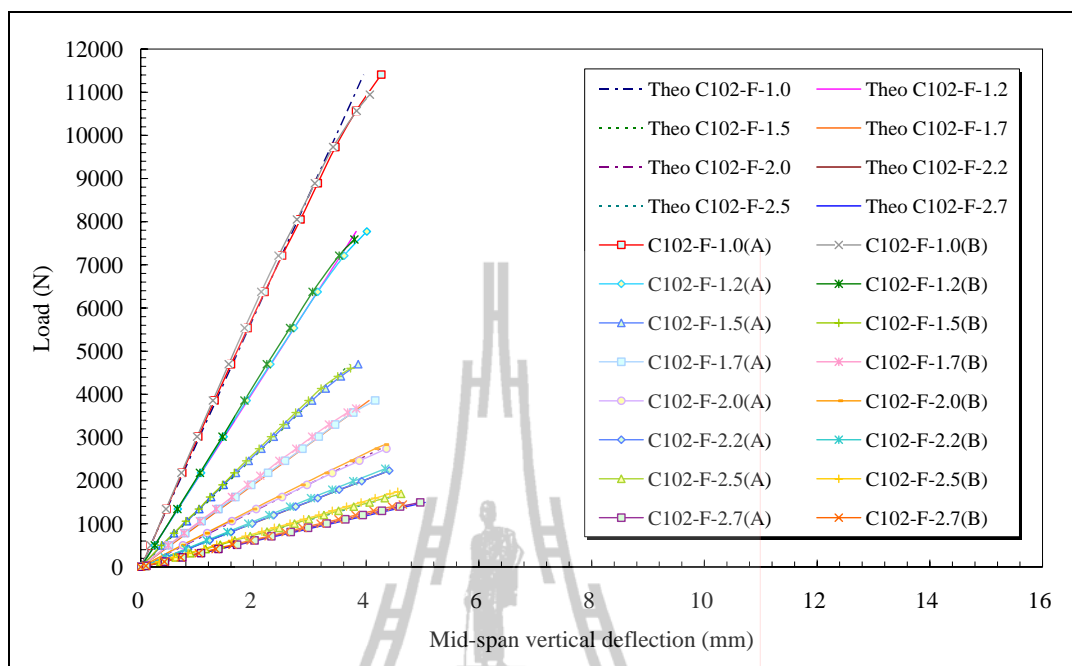
รูปที่ 4.75 ถึงรูปที่ 4.80 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวค้ำที่กึ่งกลางคาน โดยระยะการแอ่นตัวแนวค้ำดังกล่าวได้จากการทดสอบและคำนวณจากสมการที่ (3.6) จากรูปพบว่าระยะการแอ่นตัวที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอ โดยความแตกต่างของค่าที่ทดสอบได้และที่คำนวณได้จากทฤษฎีคานของ Timoshenko อยู่ในช่วงระหว่าง 1-8%



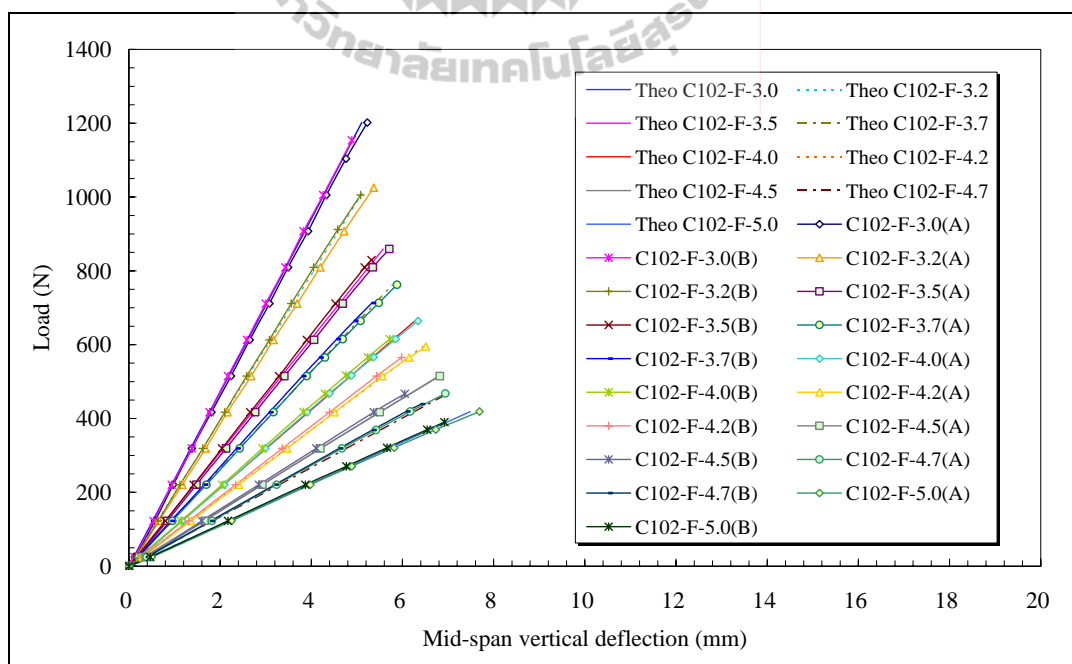
รูปที่ 4.75 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



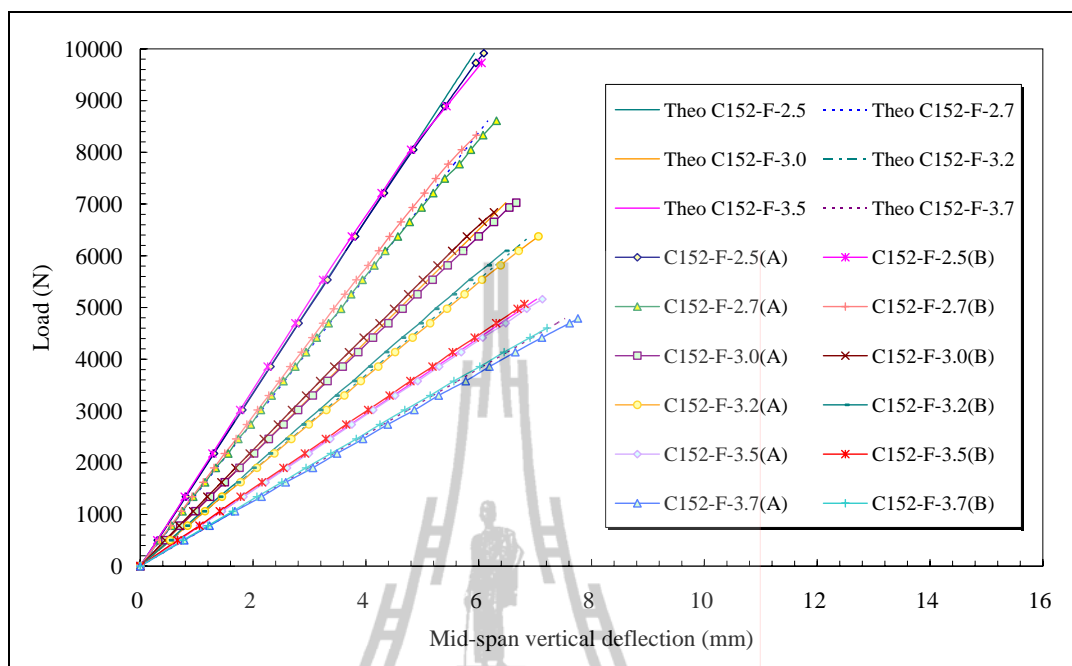
รูปที่ 4.76 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $76 \times 22 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



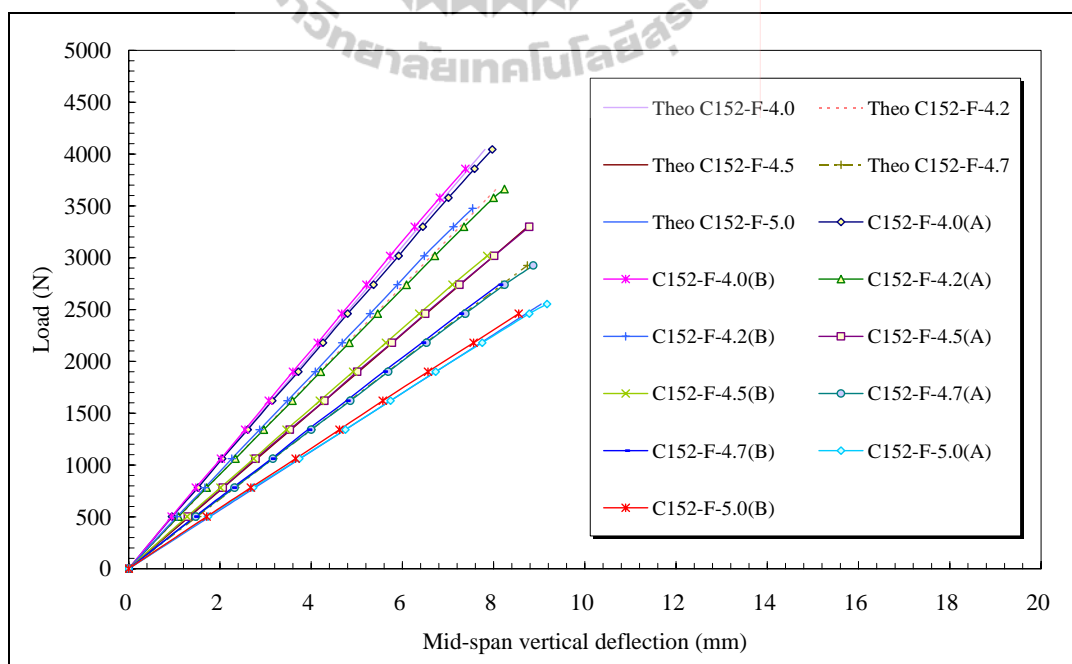
รูปที่ 4.77 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.78 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $102 \times 29 \times 6$ mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.79 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.80 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคาน $152 \times 43 \times 10$ mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

4.4.5 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักโก่งเดาะที่ทดสอบได้ ($P_{cr,EXP}$) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) ดังแสดงในสมการที่ (4.3)

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L/8 \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.22 ถึงตารางที่ 4.24 แสดงผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ($M_{cr,LRFD}$) สำหรับคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นสามารถคำนวณค่า $M_{cr,LRFD}$ ได้จากสมการที่ (3.3) จากตารางพบว่า หากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ($M_{cr,EXP}$) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.22 ถึงตารางที่ 4.24 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 อาจมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ 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)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
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 4.23 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ 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 4.24 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD
ของคาน FRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

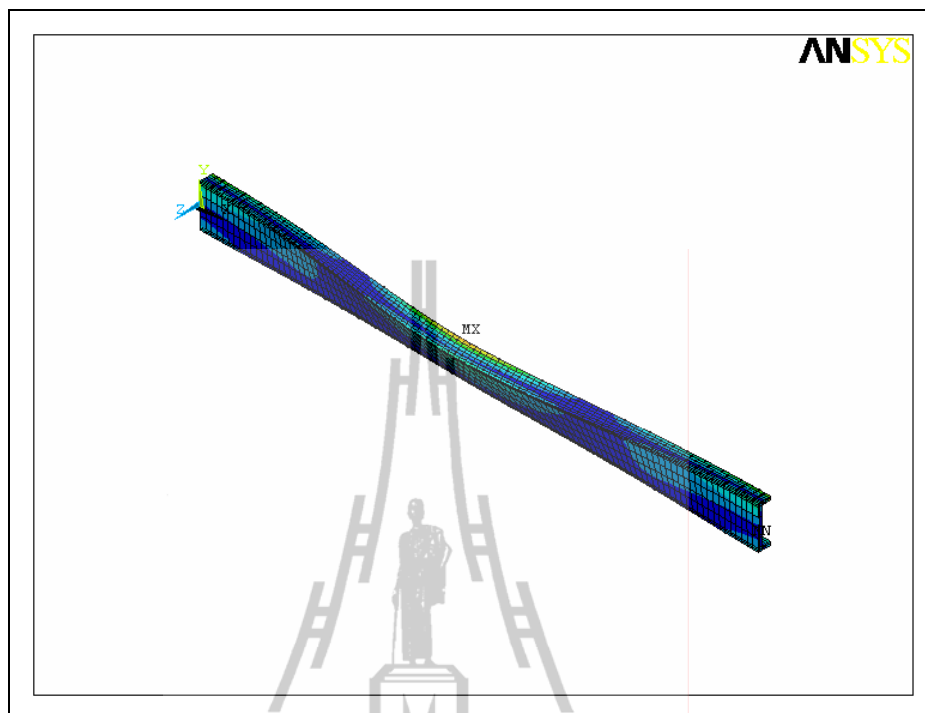
Specimens	L/d	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C152-F-2.5	16.4	3098.6	3040.3	3069.5	3515.8	0.87
C152-F-2.7	17.8	2906.1	2811.7	2858.9	3180.0	0.90
C152-F-3.0	19.7	2634.9	2565.0	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

4.4.6 ผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น

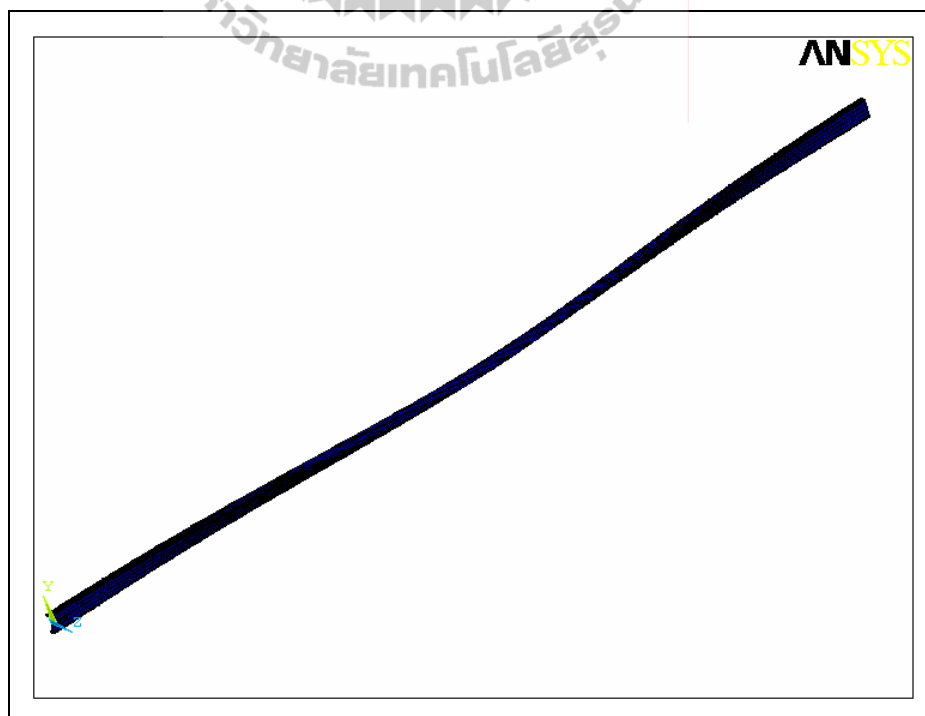
การวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling ให้ผลเฉลยประกอบด้วยน้ำหนักโก่งเดาะและลักษณะของการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 4.81 ถึงรูปที่ 4.86 จากรูปพบว่าตัวอย่างมีลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) เหมือนลักษณะการวิบัติที่เกิดในห้องปฏิบัติการ

รูปที่ 4.87 ถึงรูปที่ 4.89 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น โดยระยะการแอ่นตัวแนวตั้งดังกล่าวได้จากการทดสอบ และสมการการคำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko รวมทั้งผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากรูปพบว่าผลการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายพฤติกรรมการแอ่นตัวของคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่นโดยมีค่าใกล้เคียงกับการแอ่นตัวที่คำนวณจากทฤษฎีคานของ Timoshenko และค่าที่ทดสอบได้จากห้องปฏิบัติการ

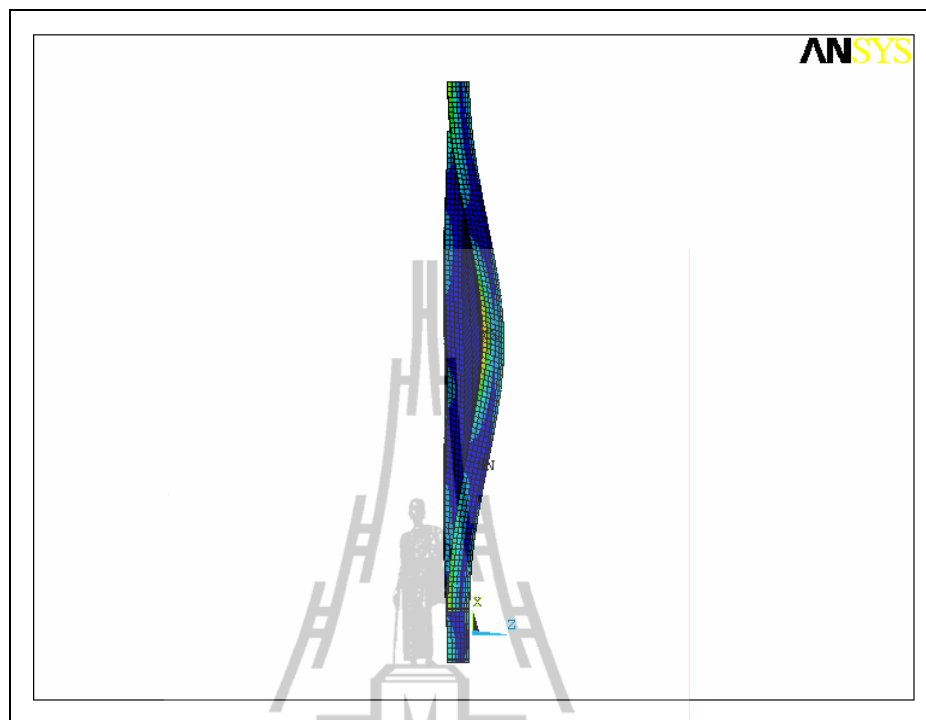
ตารางที่ 4.25 ถึงตารางที่ 4.27 แสดงผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD ของคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น จากตารางพบว่าอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสมการ LRFD มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97-1.03 ดังนั้น การวิเคราะห์คาน FRP โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling สามารถจำลองพฤติกรรมและน้ำหนักโก่งเดาะของคาน FRP ภายใต้แรงดัดได้ใกล้เคียงและให้ผลเป็นที่น่าพอใจเมื่อเปรียบเทียบกับสมการออกแบบของ LRFD และเพื่อเปรียบเทียบผลการตรวจสอบดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน จึงถูกแสดงในรูปที่ 4.90 ถึงรูปที่ 4.92 จากรูปพบว่าสมการ LRFD สำหรับประมาณค่าโมเมนต์โก่งเดาะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยมีความแตกต่างอยู่ระหว่าง $\pm 3\%$ และมีความแตกต่างกับผลทดสอบที่ได้ประมาณ 1-10% โดยมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบและตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการคำนวณจากสมการของ LRFD



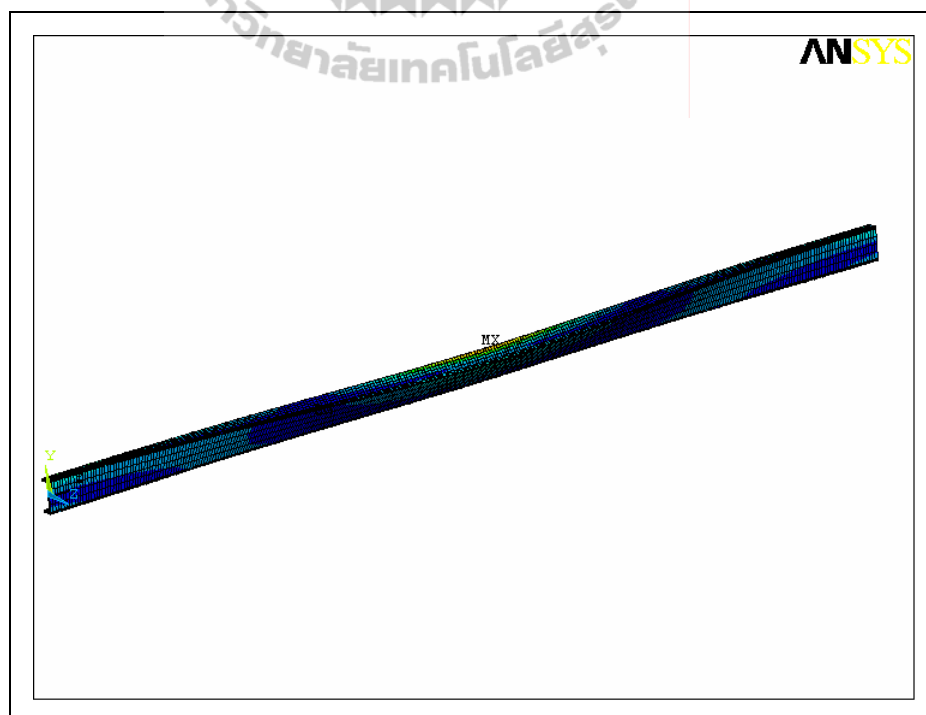
รูปที่ 4.81 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-F-1.0



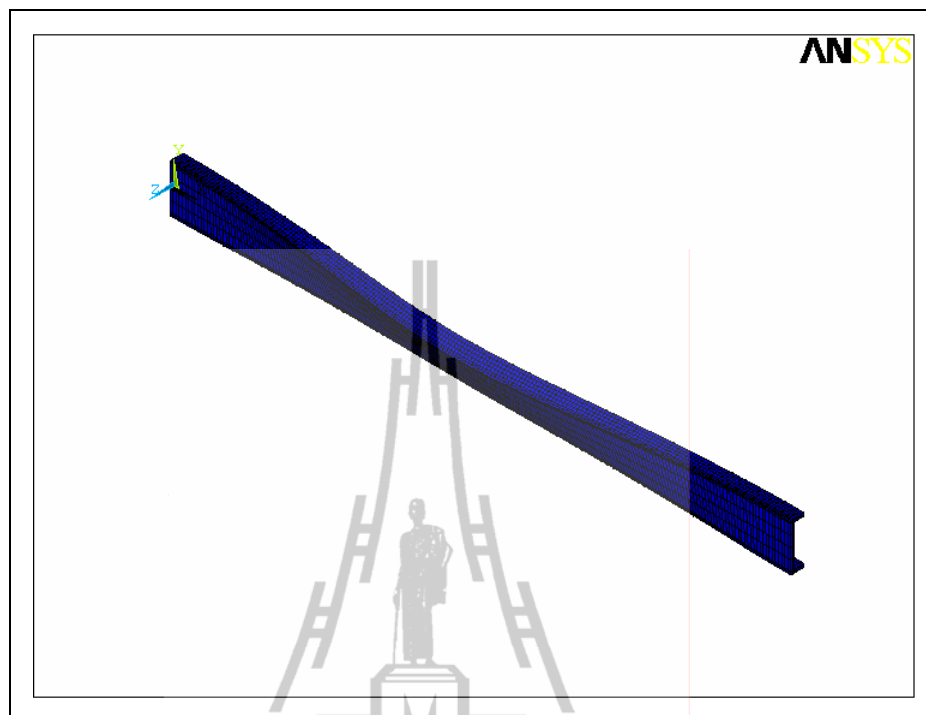
รูปที่ 4.82 รูปแบบการโก่งเคาะของตัวอย่างทดสอบ C76-F-4.0



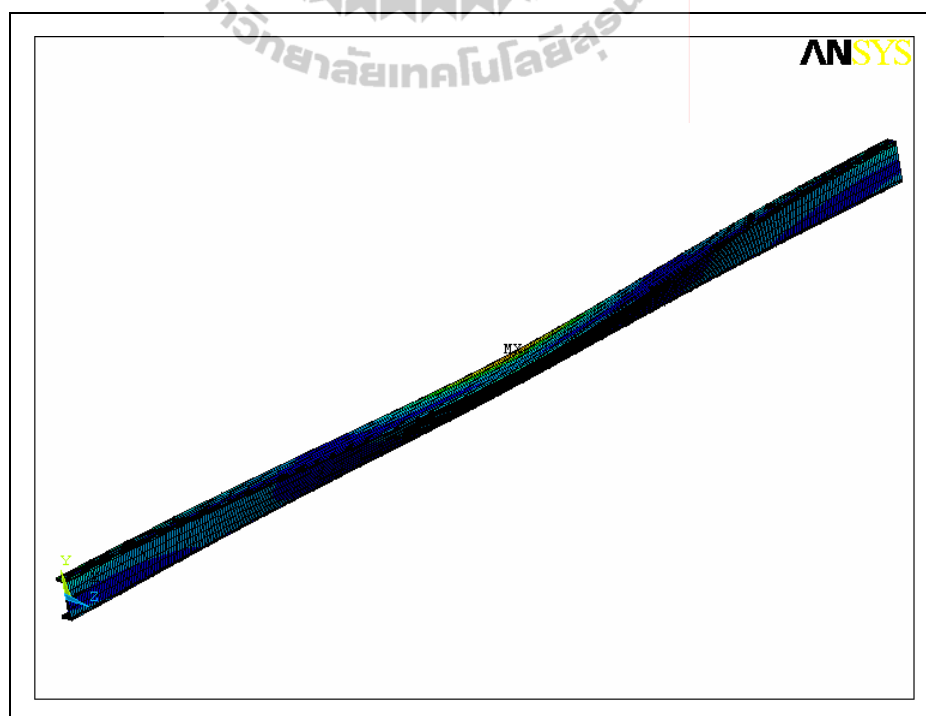
รูปที่ 4.83 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C102-F-1.0



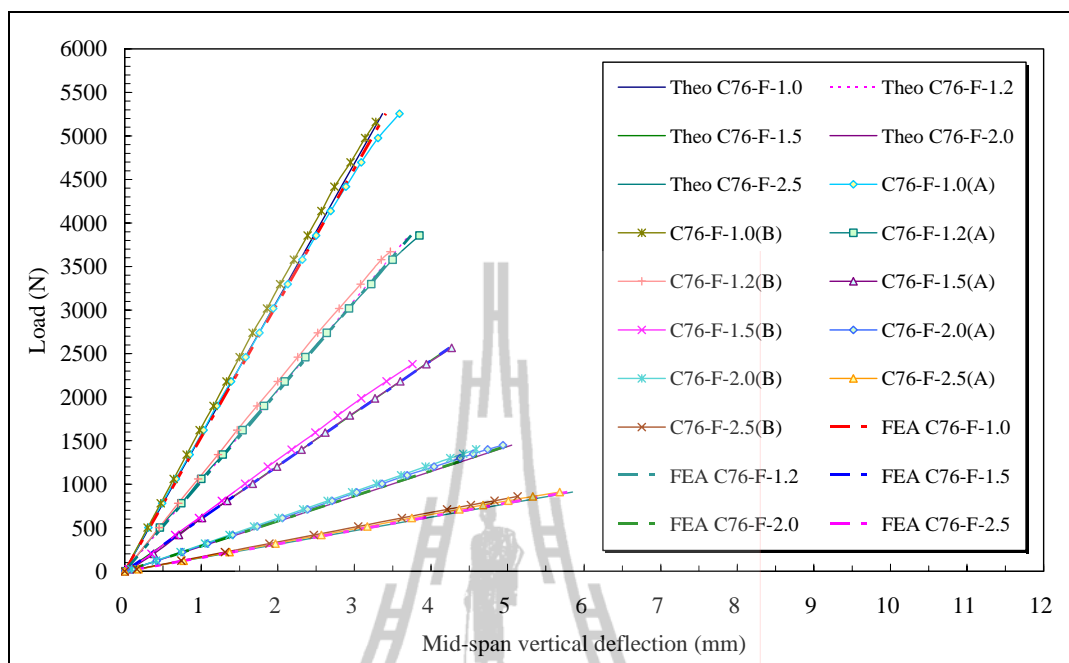
รูปที่ 4.84 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C102-F-3.0



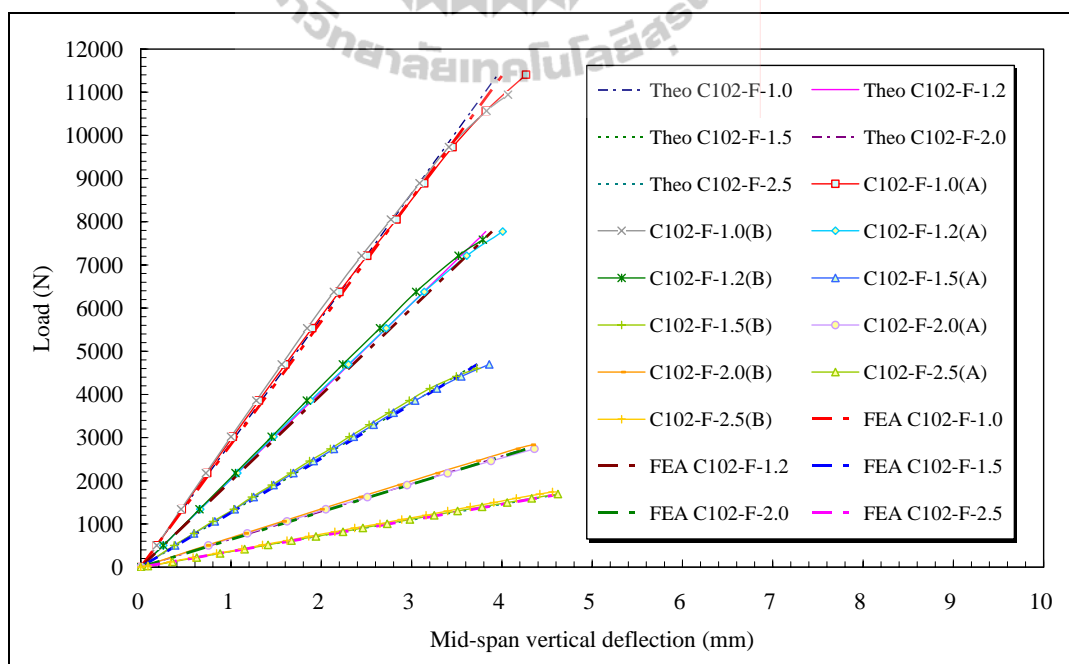
รูปที่ 4.85 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-F-2.0



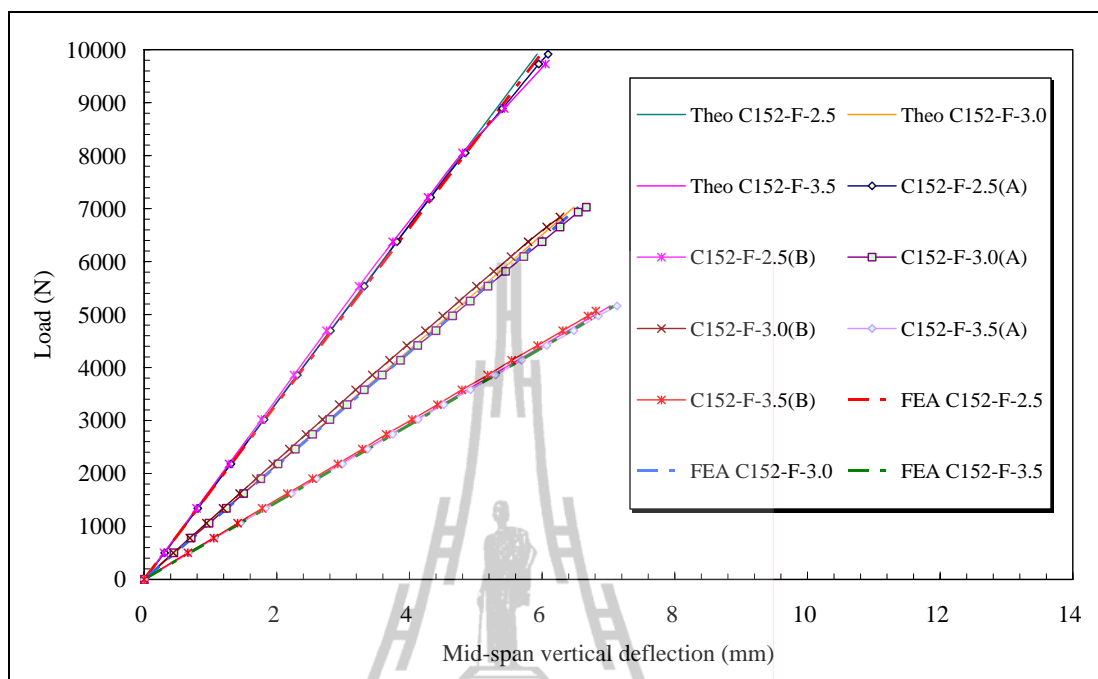
รูปที่ 4.86 รูปแบบการ โกงเดาะของตัวอย่างทดสอบ C152-F-4.0



รูปที่ 4.87 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.88 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.89 ตัวอย่างการเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งของตัวอย่างคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งคาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

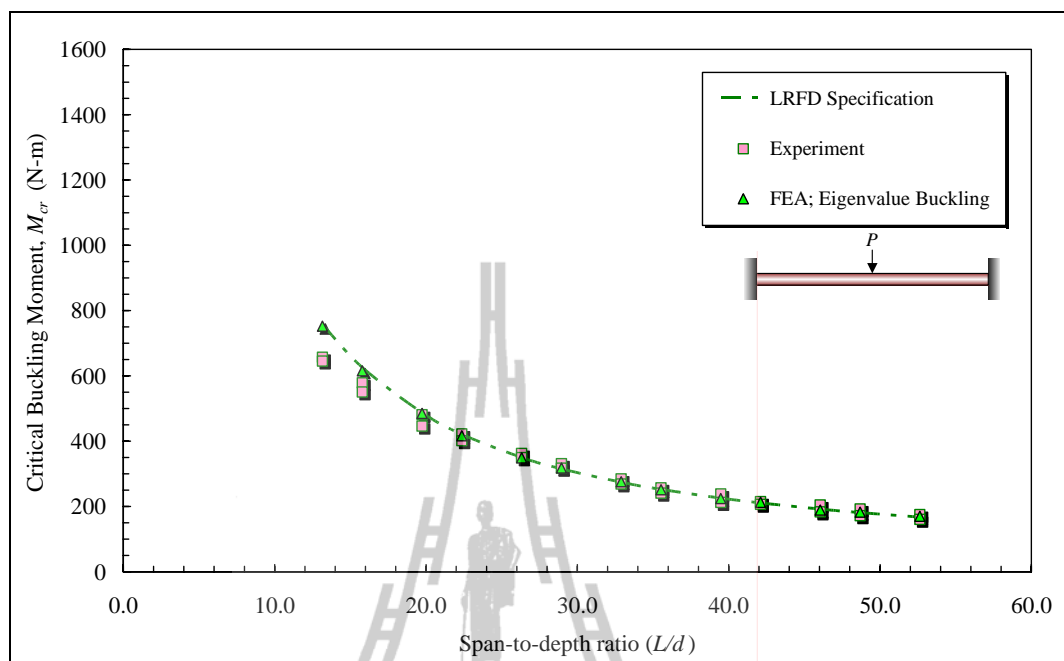
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C76-F-1.0	13.2	6017.8	757.0	6056.0	1.01
C76-F-1.2	15.8	4103.5	626.0	4173.3	1.02
C76-F-1.5	19.7	2587.6	487.6	2600.5	1.00
C76-F-1.7	22.4	1958.8	421.1	1981.6	1.01
C76-F-2.0	26.3	1396.0	350.2	1400.8	1.00
C76-F-2.2	28.9	1155.9	315.1	1145.8	0.99
C76-F-2.5	32.9	882.7	274.2	877.4	0.99
C76-F-2.7	35.5	745.1	252.5	748.1	1.00
C76-F-3.0	39.5	598.4	225.8	602.1	1.01
C76-F-3.2	42.1	532.1	210.9	527.3	0.99
C76-F-3.5	46.1	432.2	192.1	439.1	1.02
C76-F-3.7	48.7	394.6	181.3	392.0	0.99
C76-F-4.0	52.6	339.6	167.3	334.6	0.99

ตารางที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

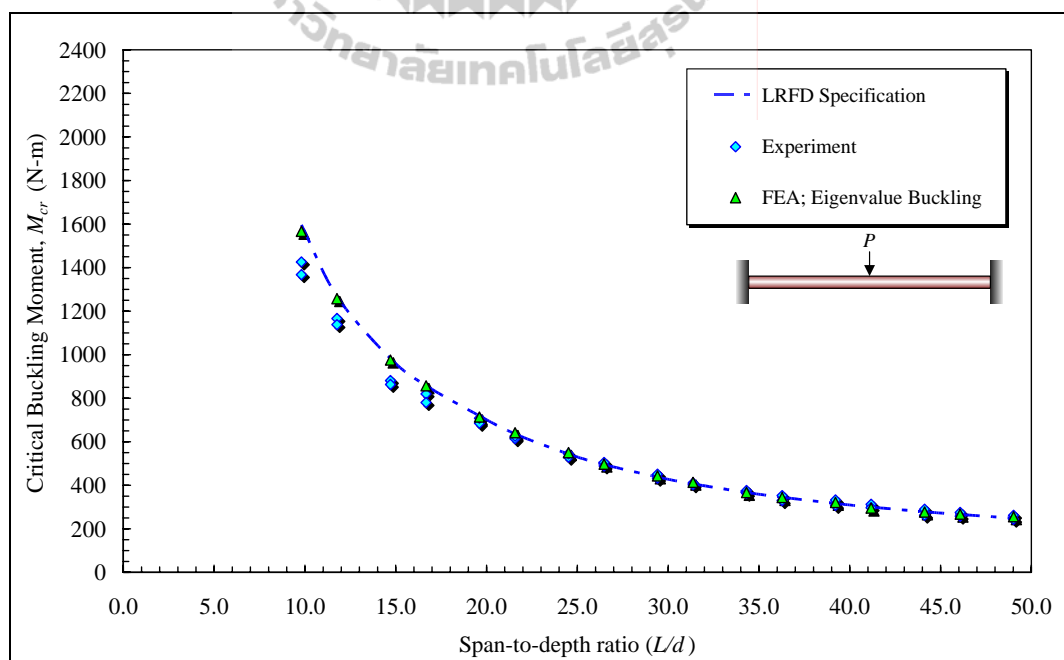
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C102-F-1.0	9.8	12768.0	1566.1	12529.0	1.02
C102-F-1.2	11.8	8453.3	1257.1	8380.9	1.01
C102-F-1.5	14.7	5237.3	975.2	5201.2	1.01
C102-F-1.7	16.7	4037.6	856.5	4030.5	1.00
C102-F-2.0	19.6	2874.8	713.4	2853.7	1.01
C102-F-2.2	21.6	2313.5	641.2	2331.8	0.99
C102-F-2.5	24.5	1738.2	549.7	1758.9	0.99
C102-F-2.7	26.5	1467.3	496.9	1472.2	1.00
C102-F-3.0	29.4	1166.9	443.1	1181.7	0.99
C102-F-3.2	31.4	1015.8	413.6	1034.0	0.98
C102-F-3.5	34.3	839.1	366.7	838.1	1.00
C102-F-3.7	36.3	745.9	343.4	742.5	1.00
C102-F-4.0	39.2	633.2	321.1	642.2	0.99
C102-F-4.2	41.2	571.6	295.2	562.2	1.02
C102-F-4.5	44.1	495.1	277.2	492.8	1.00
C102-F-4.7	46.1	452.4	267.3	454.9	0.99
C102-F-5.0	49.0	398.1	255.4	408.6	0.97

ตารางที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักโก่งเดาะจากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
และสมการ LRFD ของคานขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

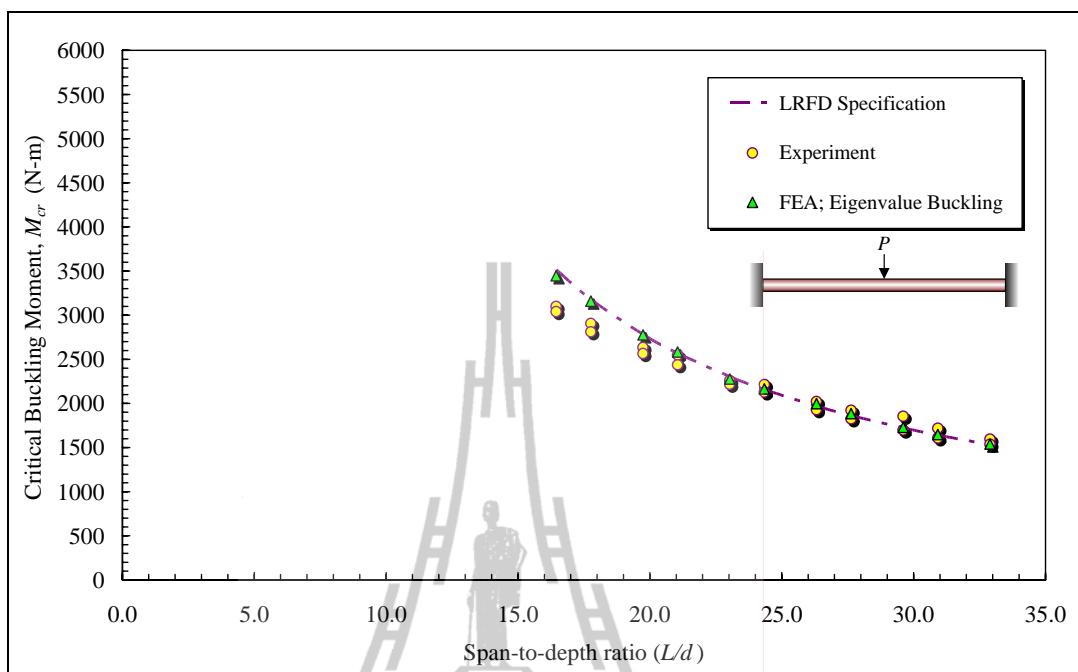
Specimens	L/d	FEA	LRFD		Analytical
		$P_{cr,FEA}$ (N)	$M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$P_{cr,LRFD}$ (N)	$\frac{P_{cr,FEA}}{P_{cr,LRFD}}$
C152-F-2.5	16.4	11250.6	3445.2	11024.5	1.02
C152-F-2.7	17.8	9422.2	3158.4	9358.2	1.01
C152-F-3.0	19.7	7420.3	2776.2	7403.1	1.00
C152-F-3.2	21.1	6423.5	2582.3	6455.8	0.99
C152-F-3.5	23.0	5269.9	2275.5	5201.2	1.01
C152-F-3.7	24.3	4667.2	2164.0	4678.9	1.00
C152-F-4.0	26.3	3942.0	1998.1	3996.2	0.99
C152-F-4.2	27.6	3549.5	1883.6	3587.9	0.99
C152-F-4.5	29.6	3063.5	1728.5	3072.8	1.00
C152-F-4.7	30.9	2793.4	1648.0	2805.1	1.00
C152-F-5.0	32.9	2451.2	1540.3	2464.4	0.99



รูปที่ 4.90 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.91 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102 \times 29 \times 6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

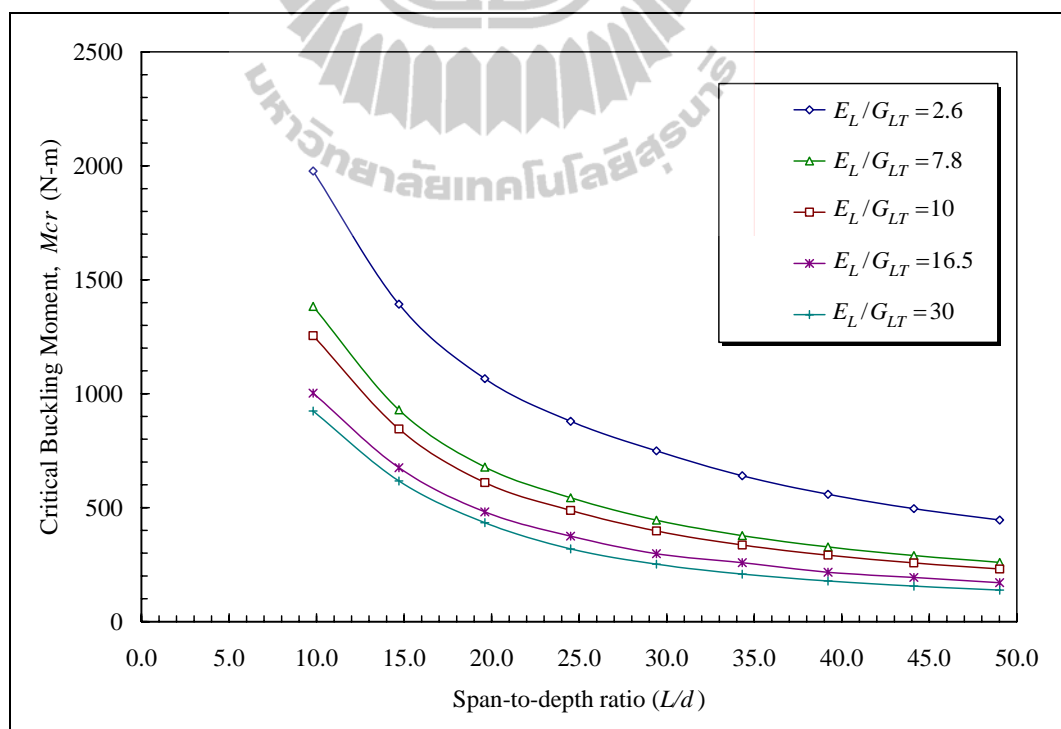


รูปที่ 4.92 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

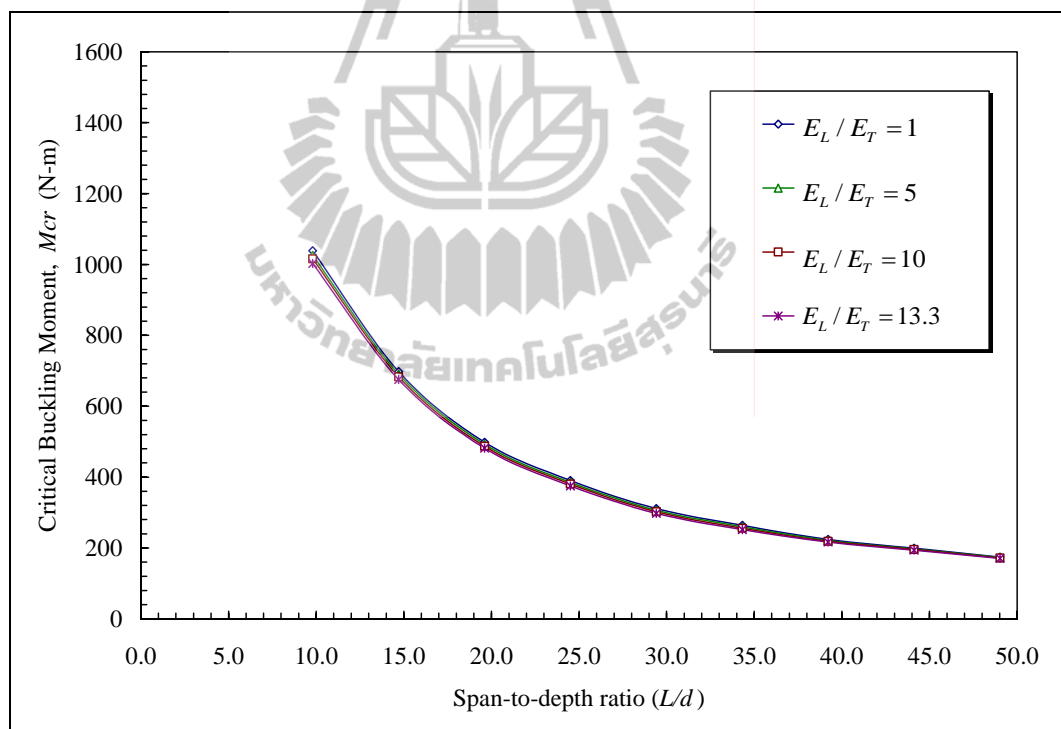
4.5 ผลของอัตราส่วนโมดูลัสต่อโมเมนต์โค้งเคาะของคาน

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนโมดูลัสต่อโมเมนต์โค้งเคาะของคาน ได้แก่ อัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือน (E_L/G_{LT}) และอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นตามแนวแกนต่อโมดูลัสยึดหยุ่นตามแนวขวาง (E_L/E_T) อัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือน (E_L/G_{LT}) ที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 2.6-30 โดย Omidvar (1998) กล่าวว่าวัสดุ FRP มีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 8-27 นอกจากนี้ การศึกษาได้เพิ่มจำนวนของอัตราส่วนดังกล่าวโดยกำหนดให้โมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือนใกล้เคียงคุณสมบัติของเหล็กรูปพรรณ ($E_L/G_{LT} = 2.6$) และมีค่าประมาณ 3 เท่าของคุณสมบัติเหล็กรูปพรรณ ($E_L/G_{LT} = 7.8$) รูปที่ 4.93 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โค้งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างคาน FRP ที่มีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือน (E_L/G_{LT}) แตกต่างกัน จากรูปพบว่าเมื่ออัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าโมเมนต์โค้งเคาะของคานจะมีค่าลดลงตลอดช่วงอัตราส่วน L/d ที่ใช้ในการศึกษา เนื่องจากค่าความแกร่ง (stiffness) ตามแนวแกนดังกล่าวเป็นปัจจัยควบคุมการสูญเสียเสถียรภาพ (instability) ก่อนการโค้งเคาะของคาน



รูปที่ 4.93 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โค้งเคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างที่มีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสเฉือนต่างกัน

นอกจากนี้ ได้เพิ่มเติมการศึกษาผลของอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวาง (E_L/E_T) ดังแสดงในรูปที่ 4.94 โดยอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวาง (E_L/E_T) ที่ศึกษามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1 - 13.3 โดยค่า $E_L/E_T = 1$ หมายถึง โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนมีค่าเท่ากับ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวาง และ $E_L/E_T = 13.3$ เป็นค่าอัตราส่วนของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการศึกษา จากรูปที่ 4.94 พบว่า เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวางในช่วงดังกล่าว ผลของโมเมนต์โก่งคาะที่วิเคราะห์ได้มีความแตกต่างกันน้อยมากหรืออาจกล่าวอีกนัยว่ามีค่าค่อนข้างคงที่ ดังนั้น อัตราส่วน E_L/E_T จึงไม่เป็นปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์โก่งคาะของคานในช่วงสั้นและช่วงยาว และสำหรับการออกแบบคาน FRP โดยสมการของ LRFD จึงไม่คำนึงผลเนื่องจาก โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวาง



รูปที่ 4.94 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์โก่งคาะและอัตราส่วน L/d ของตัวอย่างที่มีอัตราส่วน โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนต่อ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวขวางต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ (characteristics) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงคด โดยมีสถานะของจตุรรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จตุรรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) จตุรรองรับแบบง่าย (simply supported) และจตุรรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับสมการออกแบบโดยวิธี LRFD สุดท้ายตรวจสอบผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการและสมการออกแบบ กับผลการวิเคราะห์ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

5.2 สรุปผลทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP ที่มีจตุรรองรับแบบคานยื่น

พฤติกรรมรับแรงกระทำของคานสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ คานสั้นและคานยาว สำหรับคานสั้นที่มีอัตราส่วน $L/d < 10$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวคิ่งที่ปลายคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 10$ พฤติกรรมรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

5.2.2 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน FRP ที่มีจตุรรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

พฤติกรรมรับแรงกระทำของคานที่มีจตุรรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่นมีลักษณะคล้ายคลึงกันภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด

สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวคิ่งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย

จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนัก โกงเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ นอกจากนี้ น้ำหนัก โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น

5.2.3 ลักษณะการวิบัติคาน FRP

ตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุกรองรับแบบคานยื่น จุกรองรับแบบงาย และจุกรองรับแบบยึดแน่น มีลักษณะการวิบัติแบบคาน โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) โดยเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน และจากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการ โกงเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

5.2.4 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบคานยื่นภายใต้แรงกระทำที่ปลายคาน และคานที่มีจุกรองรับแบบงาย และจุกรองรับแบบยึดแน่นภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด โมเมนต์ โกงเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เมื่อความยาวของคานเพิ่มขึ้น ลักษณะการวิบัติโดยการ โกงเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด สามารถสังเกตได้เด่นชัดมากขึ้น โดยโมเมนต์ โกงเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ โมเมนต์ โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LRFD ประมาณ 5-10% โดยมีสาเหตุเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบภายใต้มาตรฐาน ASTM (initial crookedness) และความแปรปรวนของวัสดุ FRP โดยเฉพาะตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการ โกงเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลัง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

5.2.5 เปรียบเทียบสมการออกแบบคาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำ

และการวิเคราะห์โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์คาน FRP หน้าตัดรูปรางน้ำภายใต้แรงคดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ Eigenvalue buckling สามารถจำลองพฤติกรรมและน้ำหนัก โกงเดาะของคาน FRP ภายใต้แรงคดโดยให้ผลเป็นที่ยอมรับได้ทางวิศวกรรม นอกจากนี้ จากการเปรียบเทียบโมเมนต์ โกงเดาะโดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับสมการของ LRFD โดยมีความแตกต่างอยู่ระหว่าง $\pm 3\%$ และมีความแตกต่างกับผลทดสอบที่ได้ประมาณ 1-12% โดยมีสาเหตุตามที่กล่าวในหัวข้อที่ 5.2.4 ส่งผลให้กำลัง โกงเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD และวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน

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

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีข้อจำกัดอยู่มาก การนำผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการตลอดจนสมการออกแบบที่นำเสนอในการศึกษานี้ไปใช้งานก่อสร้างจริงนั้น วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานต้องใช้วิจารณญาณ โดยคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ คุณภาพการก่อสร้าง ขนาดหน้าตัด ความยาวของคาน รวมทั้งลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยเป็นหลักด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบเชิงศูนย์ภายใต้แรงดัด
- 2) ศึกษาแรงกระทำที่ตำแหน่ง (location) ต่าง ๆ ของหน้าตัด เช่น ปีกบน (top flange) และปีกล่าง (bottom flange) เพื่อให้ผลงานวิจัยต่อไปครอบคลุมถึงการใช้งานจริง
- 3) ศึกษาพฤติกรรมของคานประกอบหน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด โดยใช้สมการออกแบบของ LFRD ในงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐาน
- 4) การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ของคาน PFRP หน้าตัดรูปร่างน้ำคู้ภายใต้แรงดัด

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

รายการอ้างอิง

- สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2542). คุณสมบัติและพฤติกรรมทางกลของวัสดุใยแก้วเสริมพลาสติก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5. หน้า MAT-202-MAT-207, ชลบุรี, 24-26 มีนาคม 2542.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และหวังแก้ว บุญสวน. (2552). การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานและคุณสมบัติทางกลของพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทูดหน้าตัดรูปรางน้ำ. รายงานฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Adams, D.F., and Walrath, D.E. (1982). Iosipescu shear properties of SMC composite materials. **Composite Materials: Testing and Design (sixth conference)**. ASTM STP 787. American Society for Testing and Materials. Philadelphia.:19-33.
- Adams, D.F., and Walrath, D.E. (1987). Further development of the iosipescu shear test method. **Exp. Mech.** 27(2): 113-119.
- Agarwal, B.D., Broutman, L.J., and Chandrashekhara, K. (2006). **Analysis and Performance of Fiber Composites**. (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- American Institute of Steel Construction. (1989). **AISC Manual of Steel Construction: Allowable Stress Design**. (9th ed.). American Institute of Steel Construction.
- American Institute of Steel Construction. (1999). **Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings (AISC 350-99)**. American Institute of Steel Construction.
- American Society for Testing and Materials. (1998). **Standard Test Method for Water Absorption of Plastics: ASTM D 570-98**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics: ASTM D 695-02a**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials: ASTM D 790-03**. West Conshohocken, Pennsylvania.

- American Society for Testing and Materials. (2000). **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement: ASTM D 792-00**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2006). **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials: ASTM D 3039/D 3039M-00**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2004). **Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials: ASTM D 3171-99**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading: D 3410/D 3410M-03**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2002). **Standard Test Method for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shapes: ASTM D 3917-96**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society for Testing and Materials. (2005). **Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method: ASTM D 5379/D 5379M-05**. West Conshohocken, Pennsylvania.
- American Society of Civil Engineers. (1984). Structural plastics design manual. **ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 63**. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia.
- Bakis, C. E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., and Triantafillou, T.C., (2002). Fiber-reinforced polymer composites for construction - state-of-the-art review. **Journal of Composites for Construction**. 6(2): 73-87.
- Bank, L.C. (1987). Shear coefficients for thin-walled composite beams. **Composite Structures**. 8: 47-61.
- Bank, L.C. (1989a). Flexural and shear moduli of full-section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams. **Journal of Testing and Evaluation**. 17(1): 40-45.

- Bank, L.C. (1989b). Shear properties of pultruded glass FRP materials. **ASCE Structures Congress**. San Francisco, California.
- Bank, L.C. (2006). **Composites and Construction: Structural Design with FRP Materials**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Bank, L.C., and Melehan, T.P. (1989). Shear coefficients for multicelled thin-walled composite beams. **Composite Structures**. 11: 259-276.
- Bank, L.C., Barkatt, A., and Gentry, T.R. (1995). Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 14(6): 559-587.
- Bank, L.C., Mosallam, A.S., and Gonsior, H.E. (1990). Beam-to-column connections for pultruded FRP structures. **Proceedings of the 1st Materials Engineering Congress**. Materials Engineering Division, ASCE. New York.: 804-813.
- Bank, L. C., Yin, J., and Moore, L. (1996). Experimental and numerical evaluation of beam-to-column connections for pultruded structures. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 15: 1052–1067.
- Barbero, E.J., and Raftoyiannis, I.G. (1994). Lateral and distortional buckling of pultruded I-beams. **Composite Structures**. 27(3): 261–268.
- Barbero, E.J., Fu, S.H., and Raftoyiannis, I. (1991). Ultimate bending strength of composite beams. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 3(4): 292-306.
- Bedford. (2005). **Bedford Reinforced Plastics Design Guide**. Bedford, Pennsylvania: Bedford Plastic.
- Brooks, R.J., and Turvey, G.J. (1995). Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers. **Composite Structures**. 32(1-4): 203-215.
- Chen, H., and Blandford, G.E. (1995). Finite-element model for thin-walled space frame flexible connection behavior. **Journal of Structural Engineering**. 121(10): 1514-1521.
- Cowper, G.R. (1966). The shear coefficient in Timoshenko's beam theory. **J Appl Mech Trans**. ASME 33: 335-340.
- Creative Pultrusions. (2004). **The Pultex Pultrusion Design Manual of Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles**. Alum Bank, Pennsylvania: Creative Pultrusions.

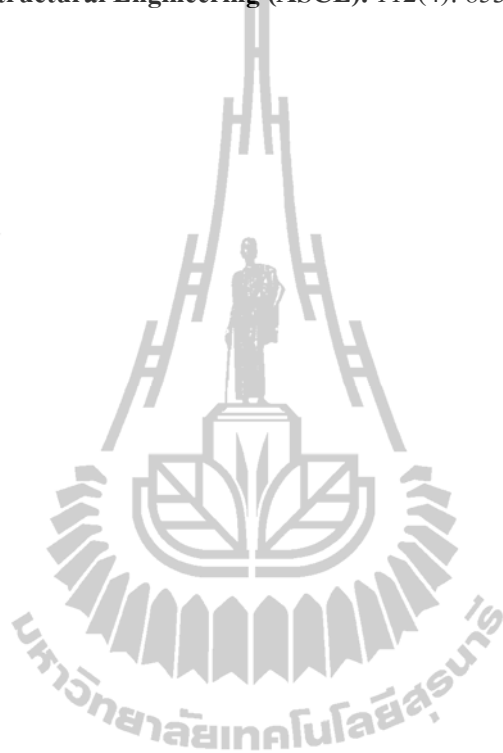
- Daniel, M. I., and Ishai, O. (1994). **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Davalos, J.F., Qiao, P.Z., and Salim, H.A. (1997). Flexure-torsional buckling of pultruded fiber reinforced plastic composite I-beams: experimental and analytical evaluations. **Composite Structures**. 38(1-4): 241-250.
- Eurocomp. (1996). Structural design of polymer composites. **Eurocomp Design Code and Handbook**. (ed. Clarke J.). London: E&FN Spon.
- Fiberline. (2003). **Fiberline Design Manual**. Kolding, Denmark: Fiberline.
- Fibreforce. (2002). **Composite Profiles**. Essex, United Kingdom: Fibreforce.
- Gaylord, Jr., E. H., Gaylord, C. N., and Stallmeyer, J. E. (1992). **Design of Steel Structures**. (3rd ed.) Singapore: McGraw-Hill.
- Goldsworthy, B. (1954). The continuous extrusion of RP. **Proceeding of the 9th SPIPRD Conference**. Chicago, February 3-5, Section 13.
- Green, A., Bisarnsin, T., and Love, E.A. (1994). Pultruded reinforced plastics for civil engineering structural applications. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 13: 942-951.
- Harte, A.M., and Fleck, N.A. (2000). Deformation and failure mechanisms of braided composite tubes in compression and torsion. **Acta Materialia**. 48(6), 1259-1271.
- Hodgkinson, J. M. (2000). **Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites**. Cambridge, England: Woodhead Pub. Limited.
- Hofer, Jr., K.E., and Rao, P.N. (1977). A new static compression fixture for advanced composite materials. **J. Testing Eval**. 5(4): 278-283.
- Iosipescu, N. (1967). New accurate procedure for single shear testing of metals. **Journal of Materials**. 2(3): 537-566.
- Jones, R.M. (1975). **Mechanics of Composite Materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Kabir, M.Z., and Sherbourne, A.N. (1998). Optimal fibre orientation in lateral stability of laminated channel section beams. **Composites Part B: Engineering**. 29(1): 81-87.
- Kassimali, A. (1999). **Matrix analysis of structures**. California: Brooks/Cole Publishing Company.

- Keller, T. (1999). Towards structural forms for composite fiber materials. **Structural Engineering International**. 9(4): 297-300.
- Keller, T. (2003). Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. **Structural Engineering Documents No. 7**. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, Switzerland.
- Kelly, A., and Zweben, C. (2000). **Comprehensive Composite Materials**. Vol (1). Elsevier, Pergamon.
- Kim, N.I., Shin, D.K., and Kim, M.Y. (2007). Exact lateral buckling analysis for thin-walled composite beam under end moment. **Engineering Structures**. 29: 1739-1751.
- Kirby, P.A., and Nethercot, D.A. (1979). **Design for Structural Stability**. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.
- Kollar, L. P., and Springer, S.S. (2003). **Mechanics of Composite Structures**. Cambridge, United Kingdom: The Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Mallick, P.K. (1988). **Fiber-Reinforced Composites; Materials, Manufacturing, and Design**. New York: Marcel Dekker.
- McGuire, W., Gallagher, R.H., and Ziemian, R.D. (1999). **Matrix Structural Analysis**. (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Ministry of Commerce. (2011). **Trade Summary of Thailand** [On-line]. Available: <http://www2.ops2.moc.go.th/menucomen/>
- Moaveni, S. (1999). **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. New Jersey: Prentice Hall.
- Morrison Molded Fiber Glass Company. (1994). **Extren Fiberglass Structural Shapes: Design Manual**. Virginia: Morrison Molded Fiber Glass Company.
- Mottram, J.T., (1992). Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam. **Composites**. 32(2): 81-92.
- Mottram, J.T., and Zheng, Y. (1996). State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames. **Composite Structures**. 35: 387-401.
- Nagaraj, V., and Gangarao, V.S. (1997). Static behavior of pultruded GFRP beams. **Journal of Composites for Construction**. 1: 120-129.

- Nagaraj, V., and Gangarao, V.S. (1998). Fatigue behavior and connection efficiency of pultruded GFRP beams. **Journal of Composites for Construction**. 2(1): 57-65.
- Omidvar, B. (1998). Shear coefficient in orthotropic thin-walled composite beams. **Journal of Composites for Construction**. 2(1): 46-56.
- Pandey, M.D., Kabir, M.Z., and Sherbourne, A.N. (1995). Flexural-torsional stability of thin-walled composite I-section beams. **Composites Engineering**. 5(3): 321-342.
- Prian, L., and Barkatt, A. (1999). Degradation mechanism of fiber-reinforced plastics and its implications to prediction of long-term behavior. **Journal of Material Science**. 34 (16): 3977-3989.
- Promis, G., Gabor, A., Maddaluno, G., and Hamelin, P. (2010). Behaviour of beams made in textile reinforced mineral matrix composites, an experimental study. **Composite Structures**. 92: 2565-2572.
- Qiao, P., Zou, G.P., and Davalos, J.F. (2003). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite cantilever I-beams. **Composite Structures**. 60: 205-217.
- Qiao, P., Davalos, J.F., Barbero, E.J., and Troutman, D.L. (1999). Equations facilitate composite designs. **Modern Plastics Magazine**. 76(11): 77-80.
- Razzaq, Z., Prabhakaran, R., and Sirjani, M. M. (1996). Load and resistance factor design (LRFD) approach for reinforced-plastic channel beam buckling. **Composites: Part B**, 27B: 361-369.
- Roberts, T.M., and Al-Ubaidi, H. (2002). Flexural and torsional properties of pultruded fiber reinforced plastics I-profiles. **Journal of Composites for Construction**. 6(1): 28-34.
- Salmon, C.E., and Johnson, J.E. (1996). **Steel Structures: Design and Behavior**. (4th ed.) New York: HarperCollins College Publishers.
- Schwartz, M.M. (1997). **Composite Materials: Vol. II, Processing, Fabrication and Applications**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Shah, V. (2007). **Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis**. (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Seangatith, S. (1997). **Characterization and Analysis of Composite Beams Subjected to Impact Loads**. Ph.D. Dissertation. University of Texas at Arlington. Texas, USA.

- Seangatith, S. (2002). Mechanical behaviors of GFRP box beams with low span-to-depth ratios subjected to three-point loading. **The Eighth National Convention on Civil Engineering**. Vol. 3: pp. MAT 121-125.
- Seymour, R.B. (1987). **Polymer for Engineering Applications**. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Shan, L.Y., and Qiao, P.Z. (2005). Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams. **Composite Structures**. 68(2): 211-224.
- Sirjani, M.B., and Razzaq, Z. (2005). Stability of FRP beams under three-point loading and LRFD approach. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**. 24(18): 1921-1927.
- Smallowitz, H. (1985). Reshaping the future of plastic buildings. **Civil Engineering, ACSE**. May: 38-41.
- Smith, S.J., Parsons, I.D., and Hjelmstad, K.D. (1999). Experimental comparisons of connections for GFRP pultruded frames. **Journal of Composites for Construction**. 3(1): 20-26.
- Spigel, B.S., Prabhakaran, R., and Sawyer, J.W. (1987). An investigation of the Iosipescu and asymmetrical four-point bend tests. **Experimental Mechanics**. 27(1): 57-63.
- Starr, T. (2000). **Pultrusion for Engineers**. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Strongwell. (2002). **Strongwell Design Manual**. Bristol, Virginia: Strongwell.
- Timoshenko, S.P. (1921). On the correction for shear of the differential equation for transverse vibration of prismatic bars. **Philosophical Magazine**. 41: 744-746.
- Tosh, M.W., and Kelly, D.W. (2001). Fibre steering for a composite C-beam. **Composite Structures**. 53(2): 133-141.
- Trahair, N. S. (1993). **Flexural-Torsional Buckling of Structures**. London: Chapman and Hall.
- Turvey, G.J. (1996). Lateral buckling tests on rectangular cross-section pultruded GRP cantilever beams. **Composites Part B**. 27B: 34-42.
- Vo, T. P., and Lee, J. (2008). Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory. **Engineering Structures**. 30: 1958-1968.
- Walrath, D.E., and Adams, D.F. (1983). The Iosipescu shear test as applied to composite materials. **Experimental Mechanics**. 23(1): 105-110.

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





คุณสมบัติของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรีด

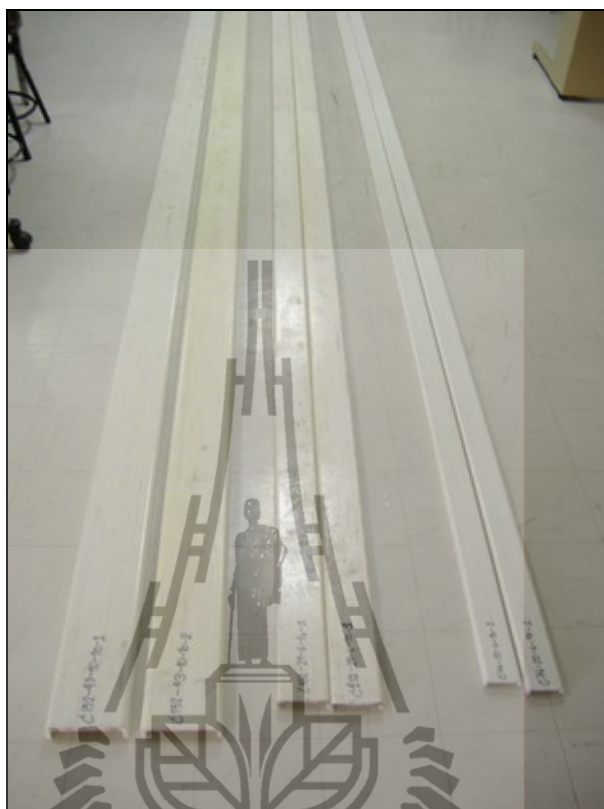
ก.1 บทนำ

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

ก.2 การทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปรางของวัสดุ FRP

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

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อต้องการทราบความคลาดเคลื่อนของรูปรางของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปรางน้ำที่ผลิตจากโรงงานภายในประเทศ และเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับมาตรฐานของ ASTM C3917-02 “Standard Specification for Dimensional Tolerance of Thermosetting Glass-Reinforced Plastic Pultruded Shape” ซึ่งเป็นการตรวจสอบวัสดุ FRP ที่ได้รับจากโรงงานผู้ผลิตมีมาตรฐานด้านรูปรางเป็นที่ยอมรับหรือไม่ ตัวอย่างทดสอบได้จากการสุ่มตัวอย่างขนาดหน้าตัดละ 2 ตัวอย่าง โดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ (1) $76 \times 22 \times 6$ mm (2) $102 \times 29 \times 6$ mm และ (3) $152 \times 43 \times 10$ mm รวมจำนวน 6 ตัวอย่าง ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.1 และตารางที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความคลาดเคลื่อนของรูปร่าง

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

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

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

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



รูปที่ ก.2 การวัดขนาดความหนาของปีกวัสดุ FRP โดยไมโครมิเตอร์



รูปที่ ก.3 การวัดขนาดความกว้างของปีกวัสดุ FRP โดยเวอร์เนียคาลิเปอร์

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

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบความคลาดเคลื่อนของขนาดหน้าตัด

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

ก.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ FRP

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

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

ก.3.1 การทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

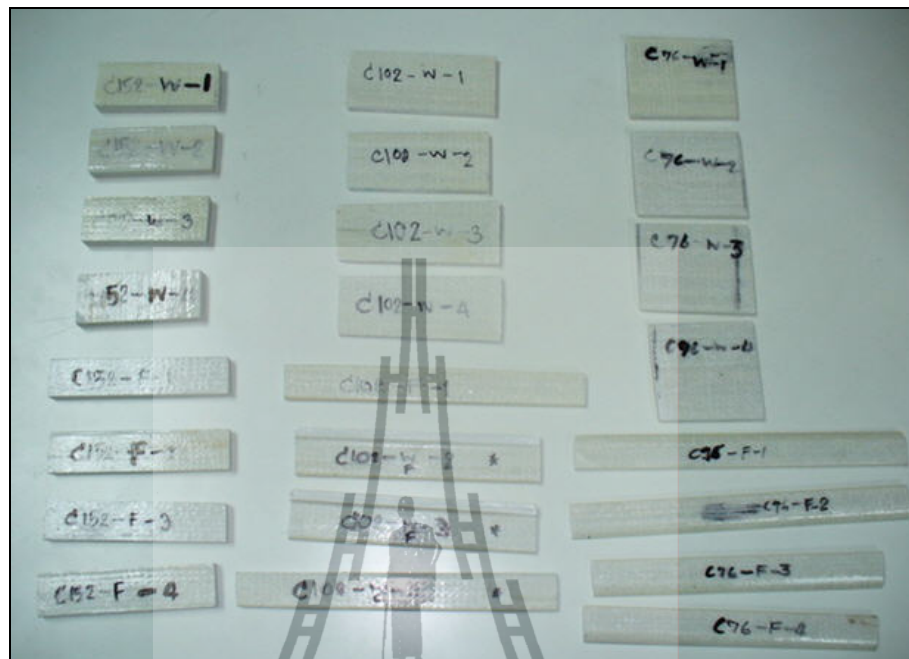
โดยทั่วไปความหนาแน่นของวัสดุ FRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร ขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ FRP ถูกนิยามเป็นอัตราส่วนปริมาตรของวัสดุ FRP ต่อปริมาตรของน้ำที่อุณหภูมิ 23°C (Shah, 2007) การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาความหนาแน่น (density) และความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของวัสดุ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

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

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

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

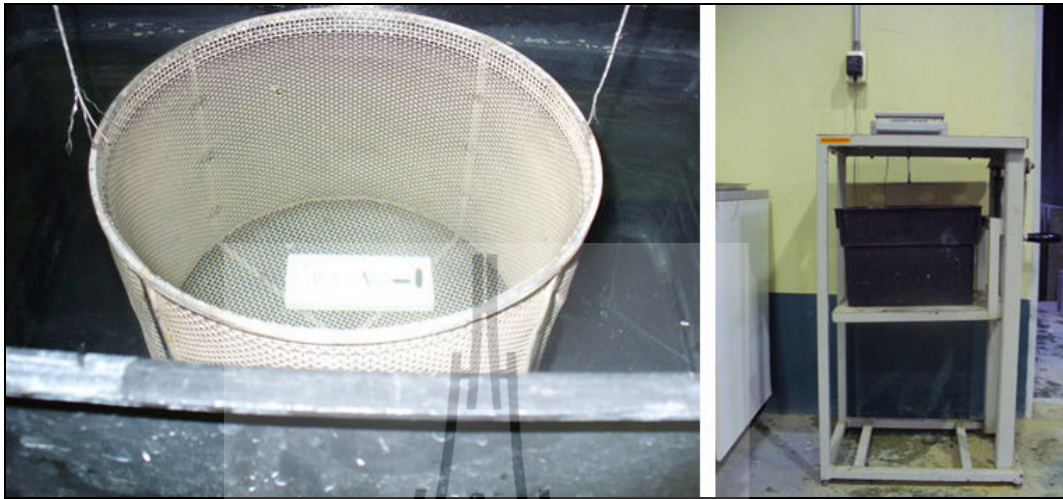
ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ FRP ดังแสดงในรูปที่ ก.4 โดยที่ตัวอย่างแต่ละชิ้นควรมีปริมาตรไม่น้อยกว่า 1 cm³ ตลอดจนมีสภาพพื้นผิว (surface) และมุม (edge) ที่เรียบสม่ำเสมอ นอกจากนี้ตัวอย่างทดสอบแต่ละชิ้นควรมีน้ำหนักโดยประมาณเท่ากับ 50 g (ASTM D792, 2000) รูปที่ ก.5 ถึงรูปที่ ก.6 แสดงตัวอย่างของวิธีการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ ก.4 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ ก.5 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในอากาศ



รูปที่ ก.6 การชั่งน้ำหนักตัวอย่างทดสอบในน้ำ

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

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

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

ก.3.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

โดยทั่วไปคุณสมบัติของการดูดซึมน้ำ (water absorption) ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของวัสดุ การดูดซึมน้ำในปริมาณที่มากเกินไปอาจส่งผลต่อคุณสมบัติด้านกำลัง (strength properties) และความแข็งแรง (stiffness properties) ของวัสดุ FRP (Prian and Barkatt, 1999) ตัวอย่างเช่น ในกรณีของการผ่านจุดเยือกแข็งและการหลอมเหลว (freezing and thawing) และการทำลายด้วยสารเคมีที่ผสมอยู่ในน้ำที่ซึมผ่านเข้าไปในเนื้อวัสดุ FRP กล่าวคือ หากวัสดุ FRP มีความสามารถในการดูดซึมน้ำและความชื้นสูง อาจมีโอกาที่วัสดุจะถูกทำลายโดยสาเหตุดังกล่าวได้ง่าย ส่งผลให้วัสดุมีความคงทนต่ำ ตลอดจนมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาคุณสมบัติการดูดซึมน้ำของวัสดุ FRP โดยความสามารถการดูดซึมน้ำของวัสดุ FRP เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ใช้ทำนายความคงทนของวัสดุ FRP

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ FRP โดยมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าความยาว 76.2 mm กว้าง 25.4 mm และมีความหนาเท่ากับความหนาของวัสดุ (ASTM D570, 1998) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ ก.7 วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D570-98 “Standard Test Method for Water Absorption of Plastics” จำนวนของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ ก.5



รูปที่ ก.7 ลักษณะตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับทดสอบการดูดซึมน้ำ

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

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

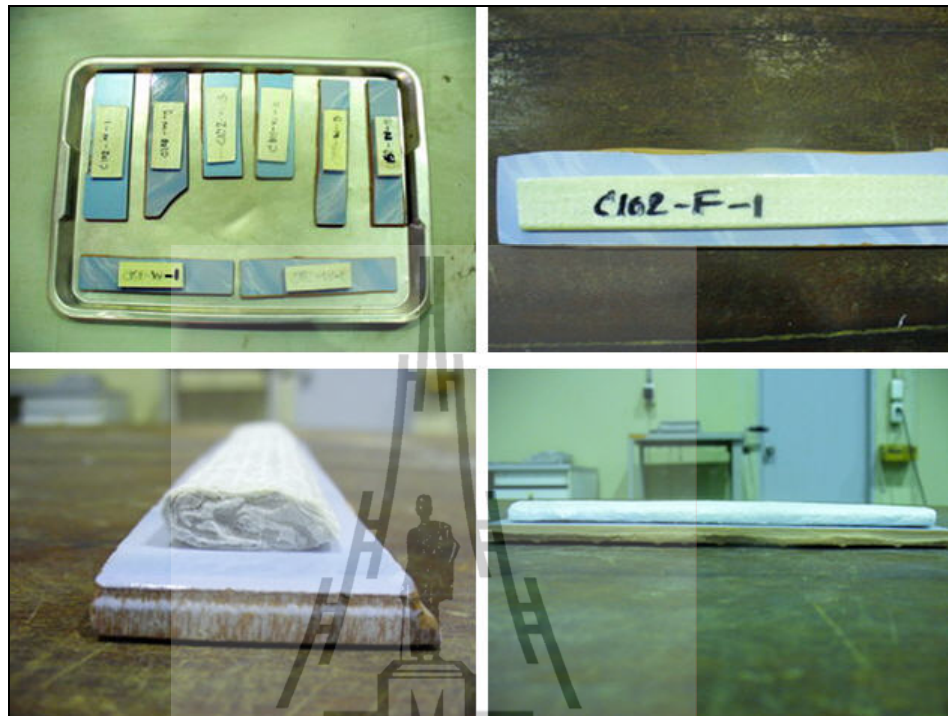
ตารางที่ ก.6 ผลทดสอบการดูดซึมน้ำและความชื้น

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

ก.3.3 การทดสอบปริมาณขององค์ประกอบ

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

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



รูปที่ ก.8 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

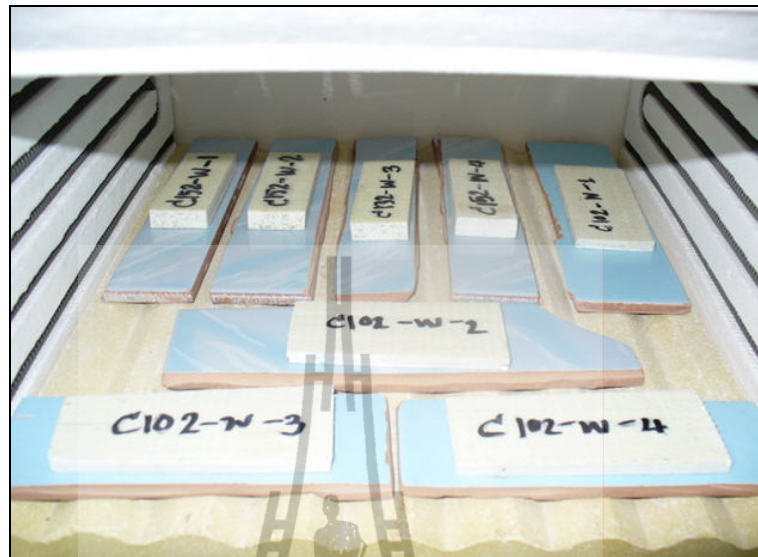
ตารางที่ ก.7 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

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

อุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาปริมาณของเรซิน ใยแก้ว และช่องว่างในวัสดุ PFRP ได้แก่ เตาอบ และเตาเผา ซึ่งสามารถรักษาความร้อนได้คงที่ที่อุณหภูมิ 70°C และ 565°C ตามลำดับ การทดสอบเริ่มต้นด้วยการ preheated ตัวอย่างในเตาอบที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 70°C เพื่อกำจัดความชื้นภายในเนื้อวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ ก.9 จากนั้นตัวอย่างทดสอบจะถูกชั่งน้ำหนัก และนำไปเผาภายในเตาเผาที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 565°C จนกระทั่งปริมาณเรซินถูกเผาจนหมด โดยขั้นตอนดังกล่าวใช้ระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (ASTM D3171, 2004) ดังแสดงในรูปที่ ก.10 จากนั้นนำตัวอย่างทดสอบชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบต่อไป



รูปที่ ก.9 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C



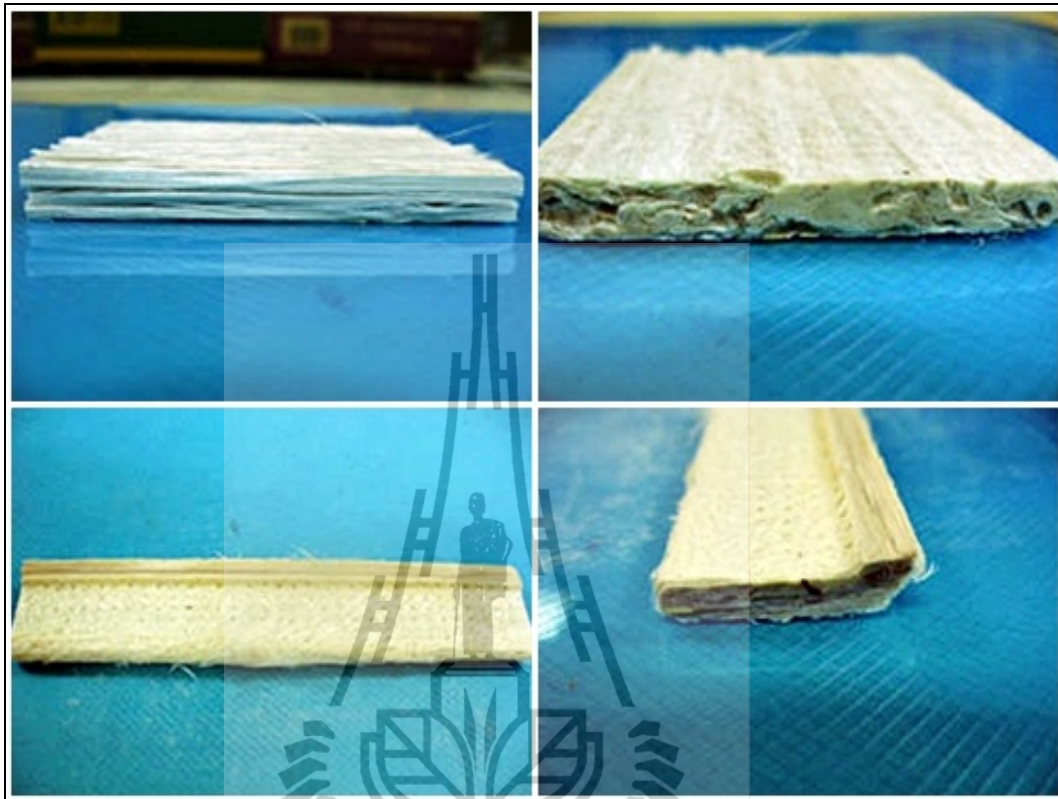
รูปที่ ก.10 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C

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

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด

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

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



รูปที่ ก.11 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ PFRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก

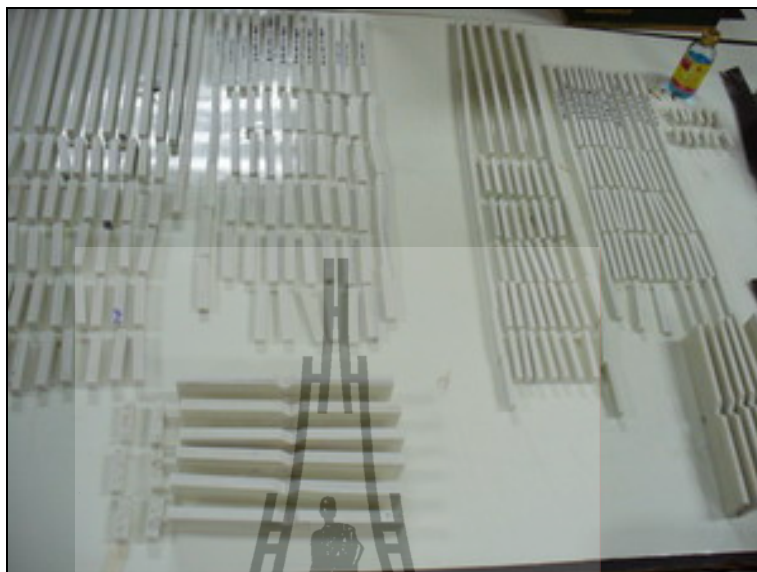


รูปที่ ก.12 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน PFRP

ก.4 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้าง กำลังของวัสดุ ซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ โดยไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนั้น โครงสร้างที่ถูกออกแบบต้องมีความแกร่งที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของโครงสร้าง ที่ได้ถูกออกแบบไว้ ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกลขององค์อาคาร แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้มาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ FRP จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้ เปรียบเทียบกับวัสดุ FRP ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ และนำค่าคุณสมบัติทางกลที่ทดสอบได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงค้ำของวัสดุ FRP หน้าตัดรูปวงรี โดยสมการทางทฤษฎีและวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ต่อไป ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบถูกตัดออกจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล ดังแสดงในรูปที่ ก.13 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FRP ประกอบด้วย 5 การทดสอบ ได้แก่

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



รูปที่ ก.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกล

ก.4.1 การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

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

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

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

ตารางที่ ก.9 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

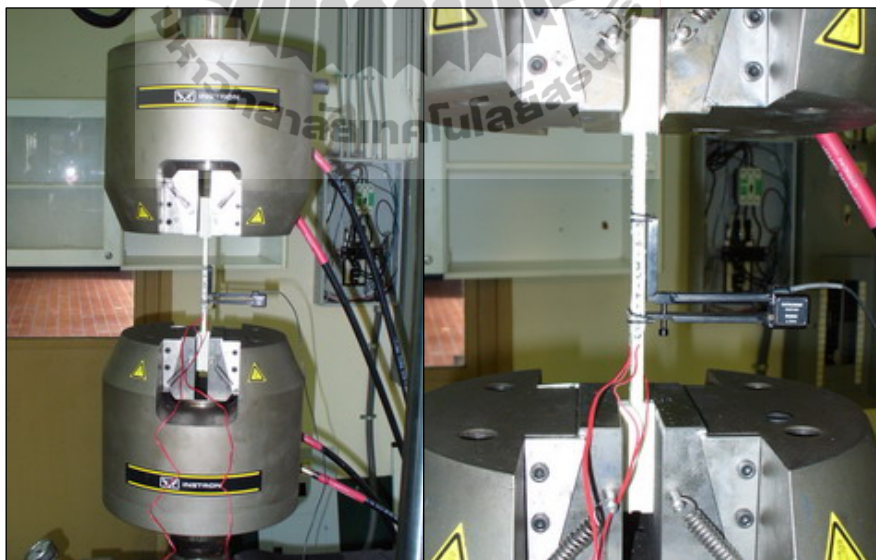
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-TL-W-No.	เอว	10
C76-TL-F-No.	ปีก	10
C102-TL-W-No.	เอว	10
C102-TL-F-No.	ปีก	10
C152-TL-W-No.	เอว	10
C152-TL-F-No.	ปีก	10



รูปที่ ก.14 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

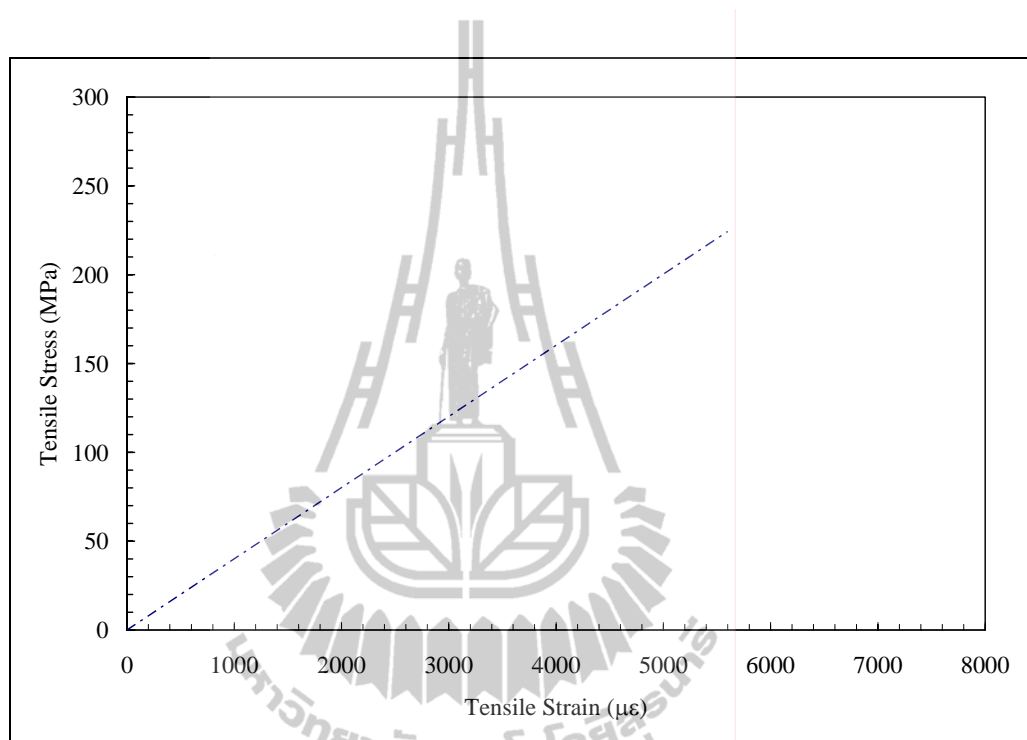
สำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ตัวอย่างทดสอบจะถูกกระทำโดยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) ยี่ห้อ Instron ซึ่งมีกำลังทดสอบสูงสุด 250 kN โดยชิ้นส่วนยึดจับ (grip) ต้องถูกบีบด้วยความดัน (pressure) ที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการเลื่อน (slip) ระหว่างหัวจับและชิ้นส่วนยึดจับ และหลีกเลี่ยงการวิบัติแบบอัดแตก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

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



รูปที่ ก.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

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



รูปที่ ก.16 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.17 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

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

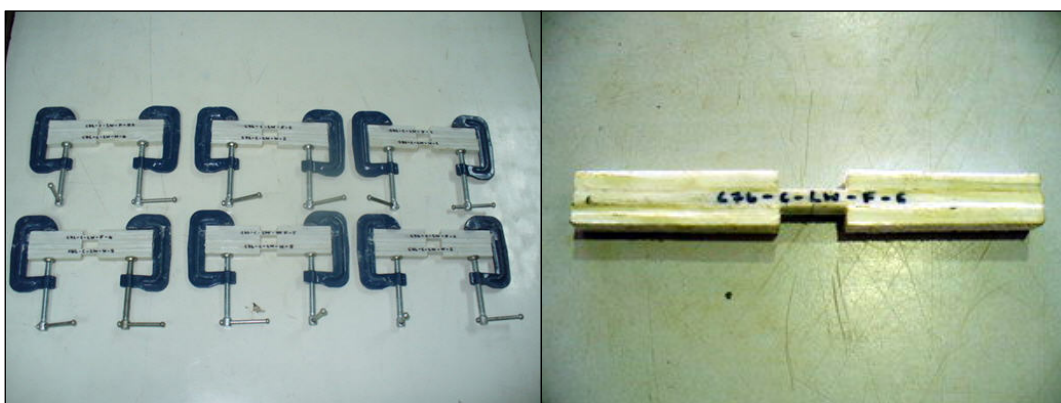
ตารางที่ ก.10 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP

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

ก.4.2 การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal compression test) ปัญหาหลักที่พบระหว่างการทดสอบ คือ ภายใต้อันตรึงกระทำตัวอย่างมักเกิดการโก่งคด (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” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ultimate compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกน (longitudinal compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัด

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



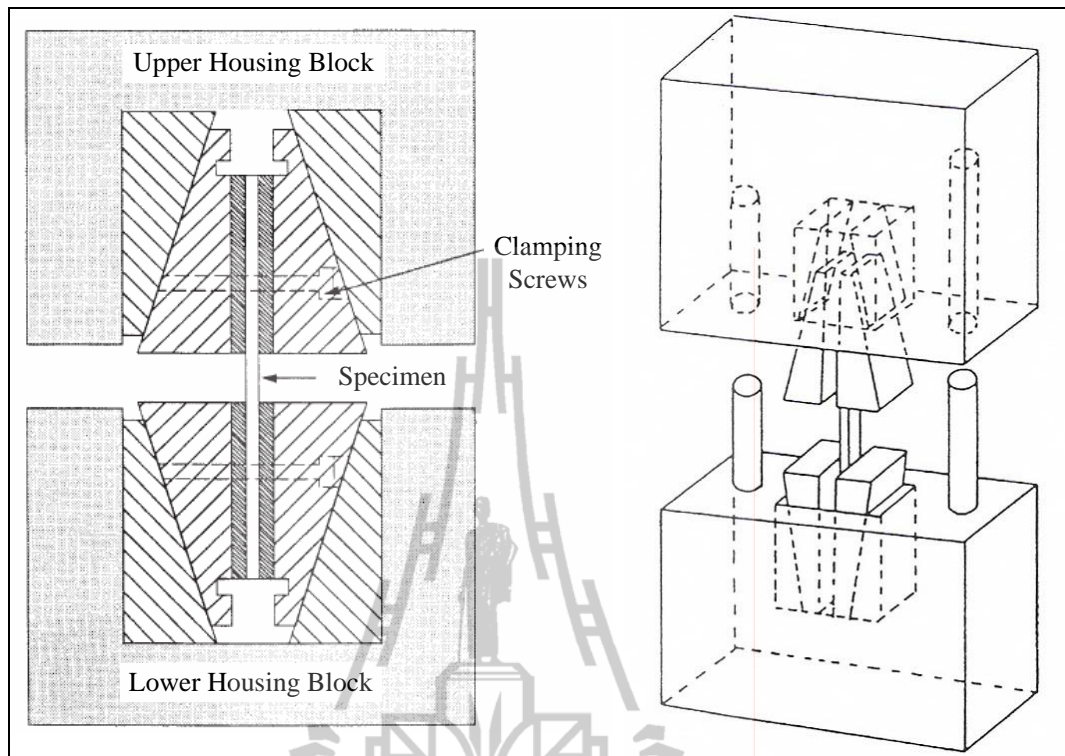
รูปที่ ก.18 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.11 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

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

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



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

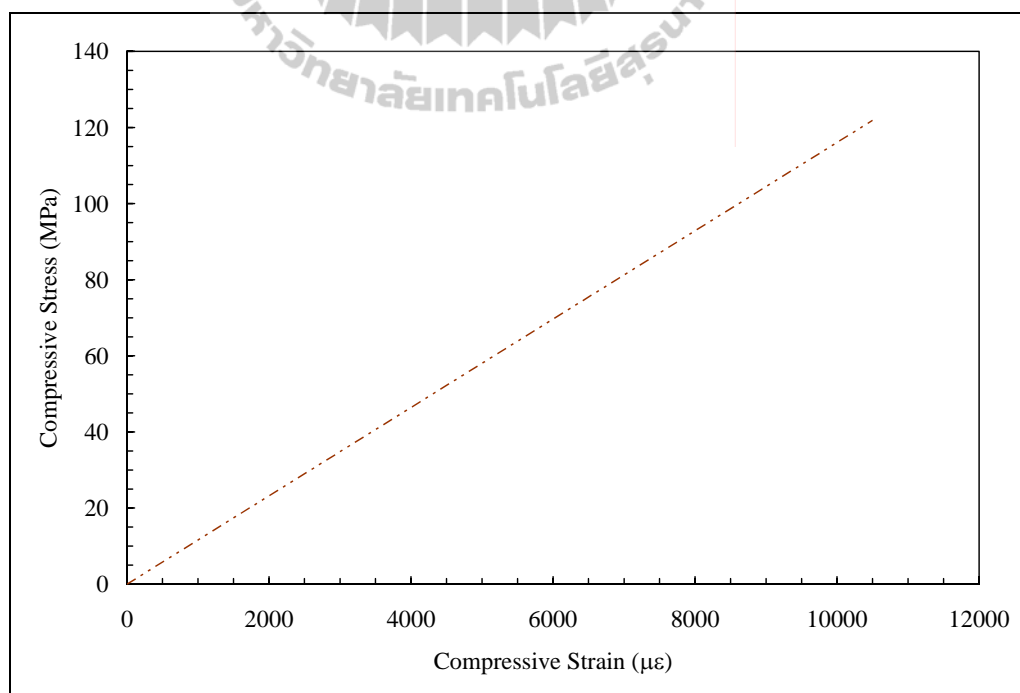


รูปที่ ก.20 Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.21 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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



รูปที่ ก.22 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.23 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRP ดังแสดงในตารางที่ ก.12 พบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้ว จะเกิดการ โกงเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตด้อยคุณภาพ

ตารางที่ ก.12 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP

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

ก.4.3 การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

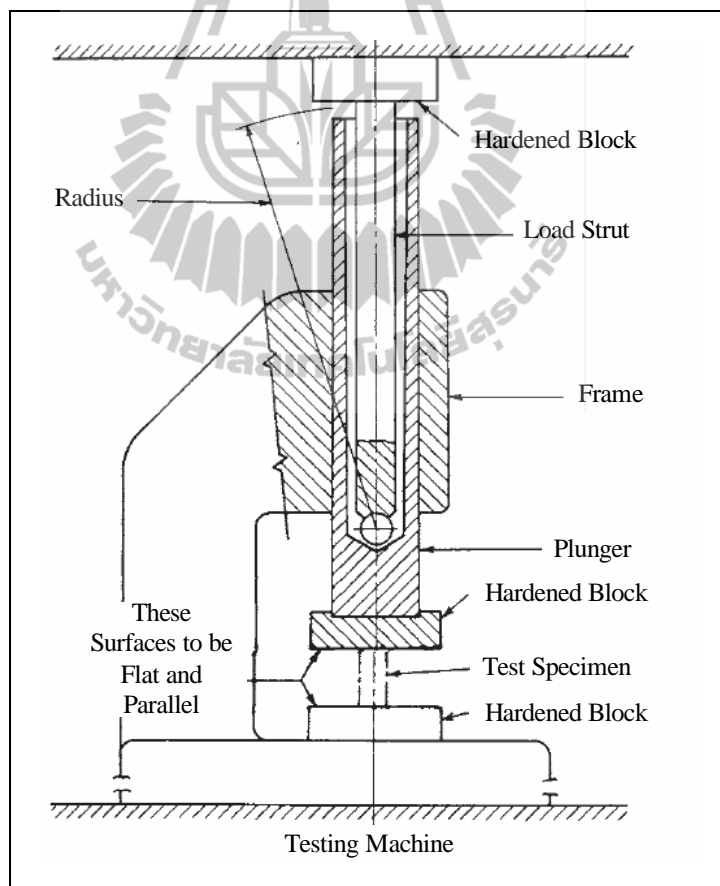
ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวขวางของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ CFRP วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D695-02 “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics” จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่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

ตารางที่ ก.13 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

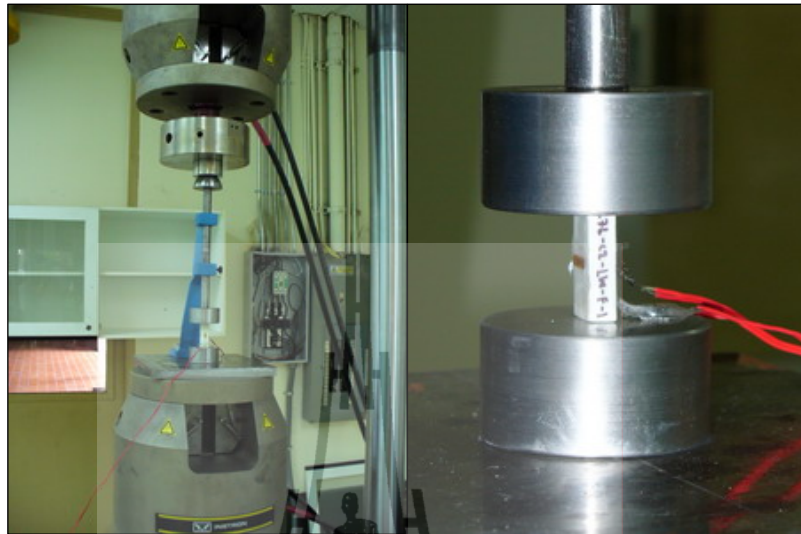
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-CT-W-No.	เอว	10
C76-CT-F-No.	ปีก	10
C102-CT-W-No.	เอว	10
C102-CT-F-No.	ปีก	10
C152-CT-W-No.	เอว	10
C152-CT-F-No.	ปีก	10

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

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

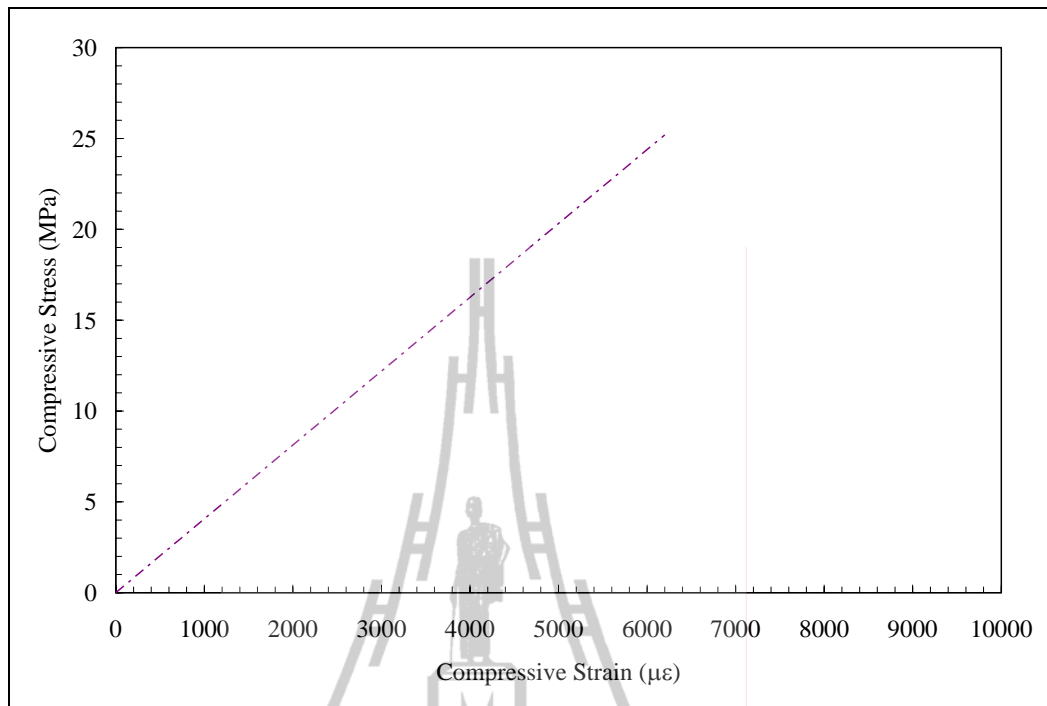


รูปที่ ก.24 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย
(ASTM D695, 2002)



รูปที่ ก.25 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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



รูปที่ ก.26 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ ก.27 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

ตารางที่ ก.14 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยต่ำเนื่องจากภายใต้แรงอัดตั้งฉากเส้นใย เรซินเป็นตัวหลักในการรับแรงกระทำ ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการเลื่อนได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ตามทิศทางที่รับแรงกระทำ การรับแรงในทิศทางขนานเส้นใยมีกำลังและความแกร่งมากกว่าการรับแรงในทิศทางตั้งฉากเส้นใย แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใยแก้วหรือเป็นวัสดุอורתโรโทรปิก (orthotropic material)

ตารางที่ ก.14 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

ก.4.4 การทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

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

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ 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) ควรมีความไม่น้อยกว่า 16 เท่าของความลึก (หนา) ของตัวอย่างทดสอบ อย่างไรก็ตาม สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าโมดูลัสเชิงค้ำ มาตรฐานดังกล่าวได้แนะนำว่าตัวอย่างทดสอบควรมีอัตราส่วนระหว่างจุดรองรับต่อความลึก (span-to-depth ratio) เท่ากับ 60:1 เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉือน (shear effect) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ รูปที่ ก.28 แสดงลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ ก.15

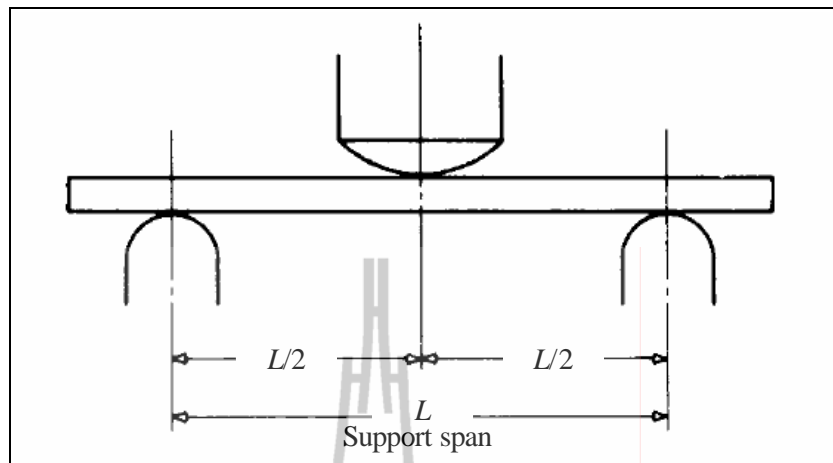


รูปที่ ก.28 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.15 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

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

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

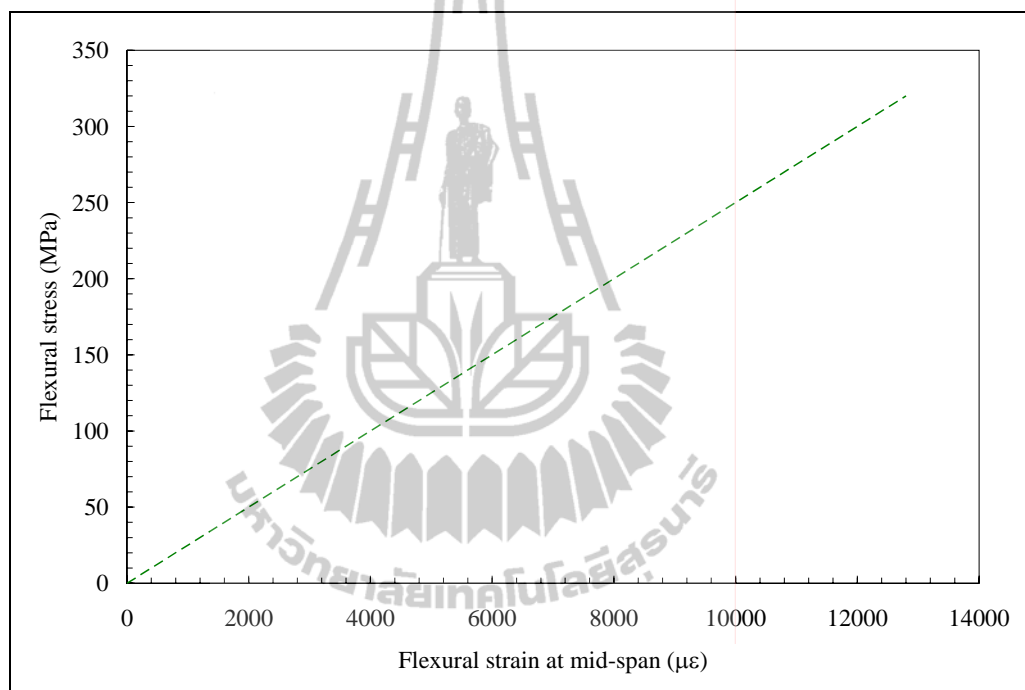


รูปที่ ก.29 ลักษณะจุดรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D790, 2003)

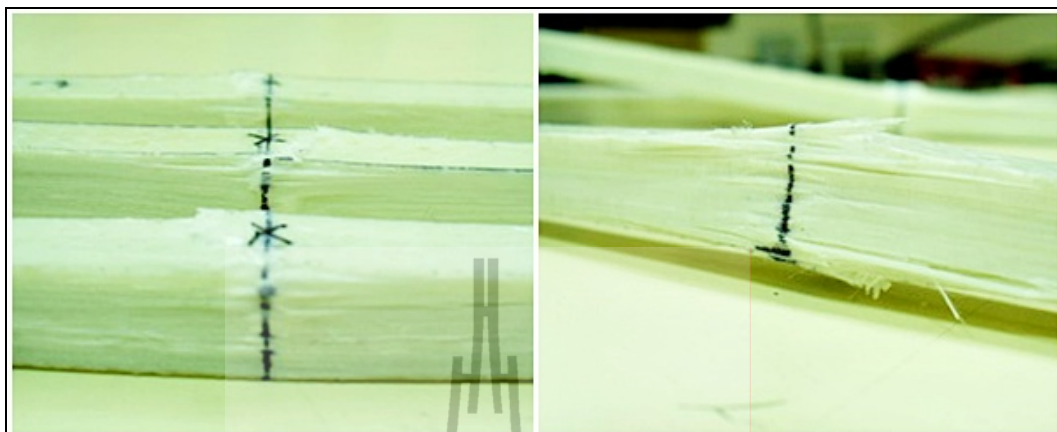


รูปที่ ก.30 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ ก.31 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ ก.32 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเริ่มต้นจากการวิบัติของเรซิน จากนั้นจึงเกิดการขาดออกของเส้นใยแก้วบริเวณที่รับแรงคดของตัวอย่างทดสอบในทิศทางขนานกับเส้นใยแก้ว การวิบัติเริ่มจากผิวนอกของตัวอย่างที่มีหน่วยแรงคดสูงสุด



รูปที่ ก.31 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.32 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.16 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงดัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยสำหรับวัสดุ FRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ FRP มีหน่วยแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยสูง เนื่องจากวัสดุ FRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีปริมาณเส้นใยแก้วสูง ดังนั้นภายใต้แรงดัดเส้นใยแก้วดังกล่าวทำหน้าที่รับหน่วยแรงดึงและแรงอัดเป็นหลักส่งผลให้กำลังวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูง

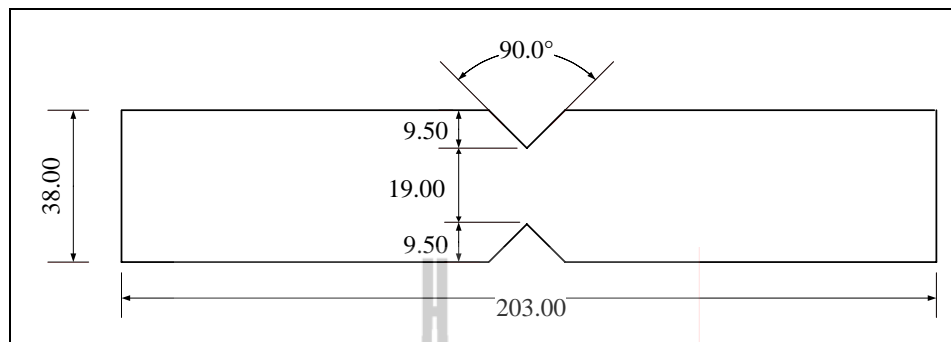
ตารางที่ ก.16 ผลทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงดัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	509.73 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	31.07 GPa	11.00 GPa

ก.4.5 การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนแบบ V-notch (longitudinal V-notch shear test) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย 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) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกน (longitudinal shear modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงเฉือน วิธีการทดสอบกระทำตามมาตรฐาน ASTM D5379-05 “Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method” ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ FRP และบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบทำการตัดแต่ละด้านของขอบโดยทำมุม 90° ดังแสดงรายละเอียดของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ ก.33 จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงดังตารางที่ ก.17

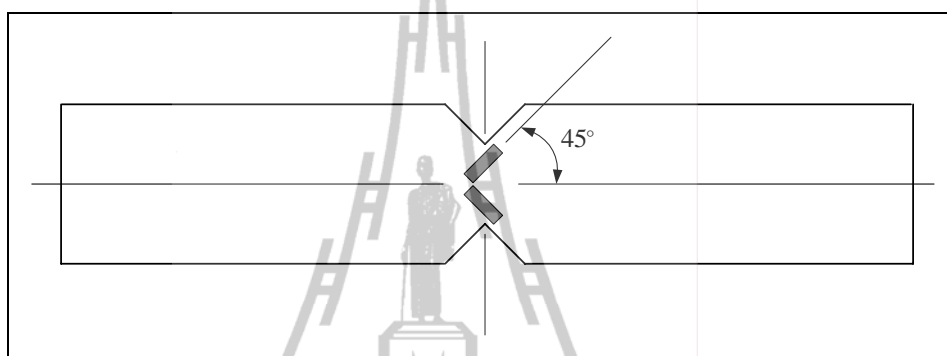


รูปที่ ก.33 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย
(ASTM D5379, 2005)

ตารางที่ ก.17 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

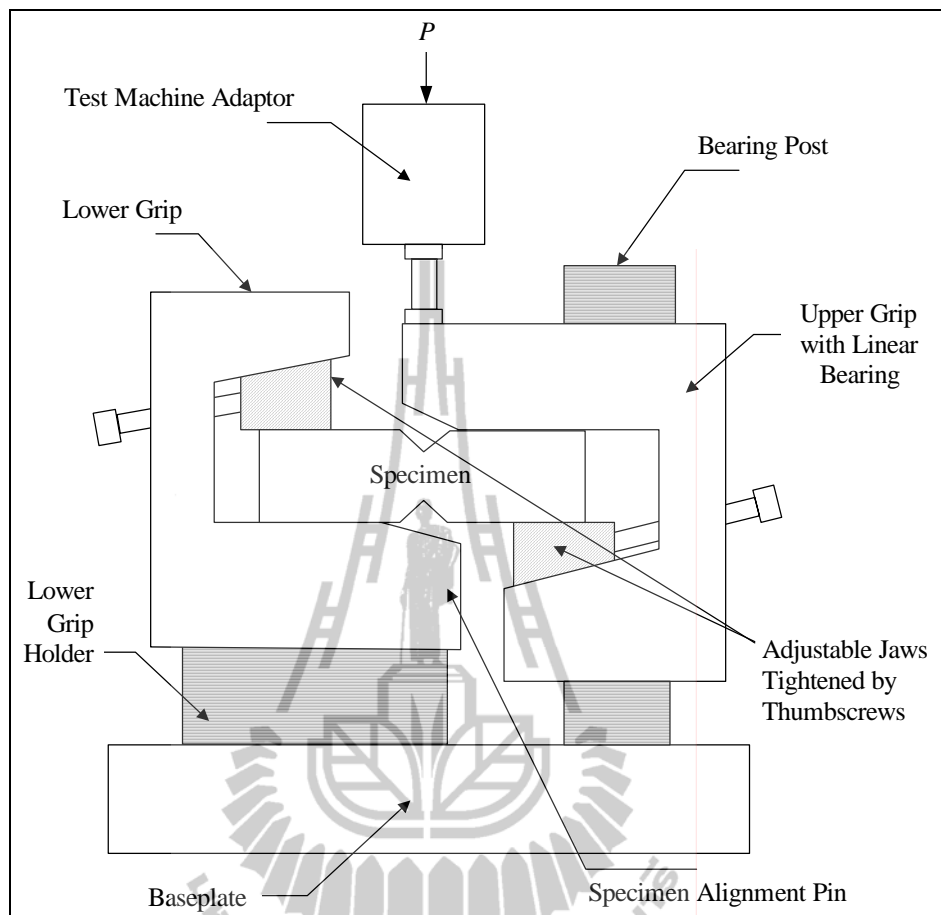
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-SL-W-No	เอว	10
C76-SL-F-No.	ปีก	10
C102-SL-W-No.	เอว	10
C102-SL-F-No.	ปีก	10
C152-SL-W-No.	เอว	10
C152-SL-F-No.	ปีก	10

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



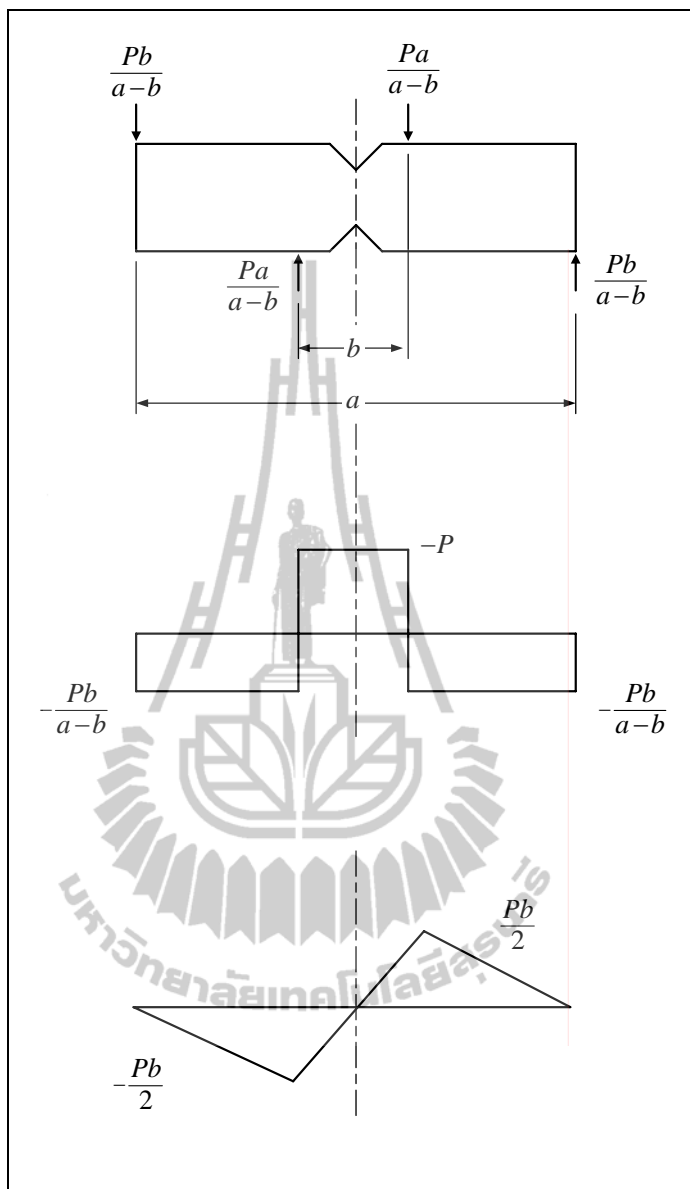
รูปที่ ก.34 ตำแหน่งและทิศทางการติดตั้งมาตรวัดความเครียดสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

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



รูปที่ ก.35 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

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

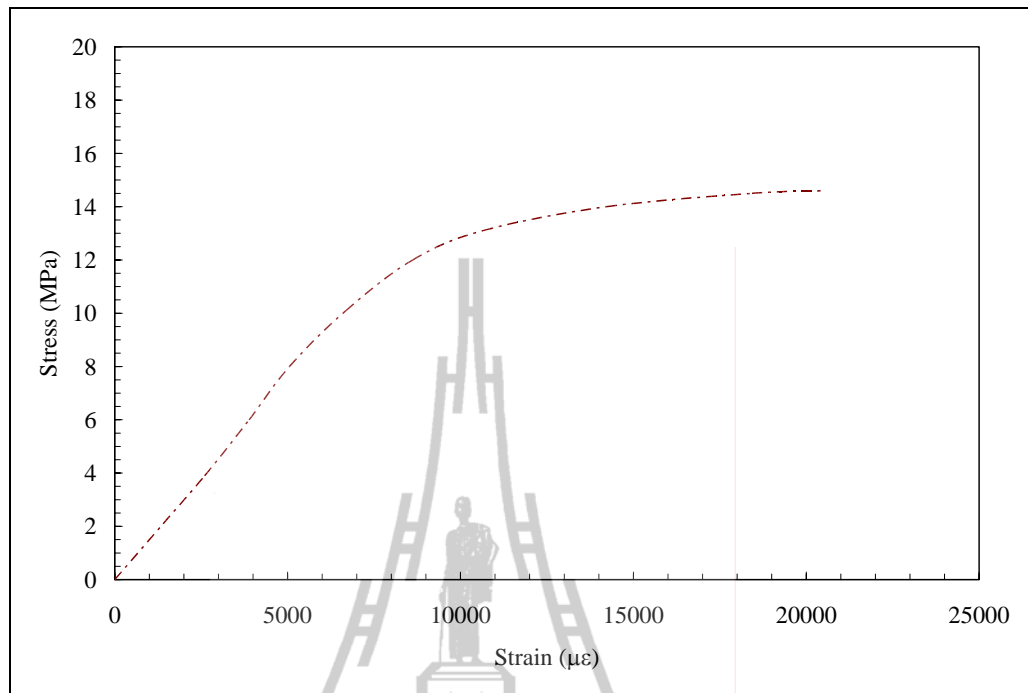


รูปที่ ก.36 แผนผังวัตถุอิสระของแรงเฉือนและโมเมนต์สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (Agarwal et al., 2006)



รูปที่ ก.37 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

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



รูปที่ ก.38 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ ก.39 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเค้นตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ ก.18 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนและโมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเจเลียของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเฉือน โดยวัสดุ CFRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ (27.8%) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion

ตารางที่ ก.18 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion (Full section)
หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามแนวแกนของเส้นใยเจเลีย	37.27 MPa	-
โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเจเลีย	2.18 GPa	2.9 GPa



ข.1 การคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือน สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

การวิเคราะห์ห้ระยะแอ่นตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่นสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) ดังนี้

$$\Delta = \frac{PL^3}{3E_L I_x} + \frac{PL}{A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่	P	คือ	น้ำหนักบรรทุก
	L	คือ	ความยาวคาน
	E_L	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกน (longitudinal modulus)
	G_{LT}	คือ	โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ (in-plane shear modulus)
	I_x	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เซียของหน้าตัดรอบแกนหลัก
	A_w	คือ	พื้นที่หน้าตัดของเอว

จากสมการที่ (ข.1) สามารถจัดรูปใหม่ โดยมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (ข.2)

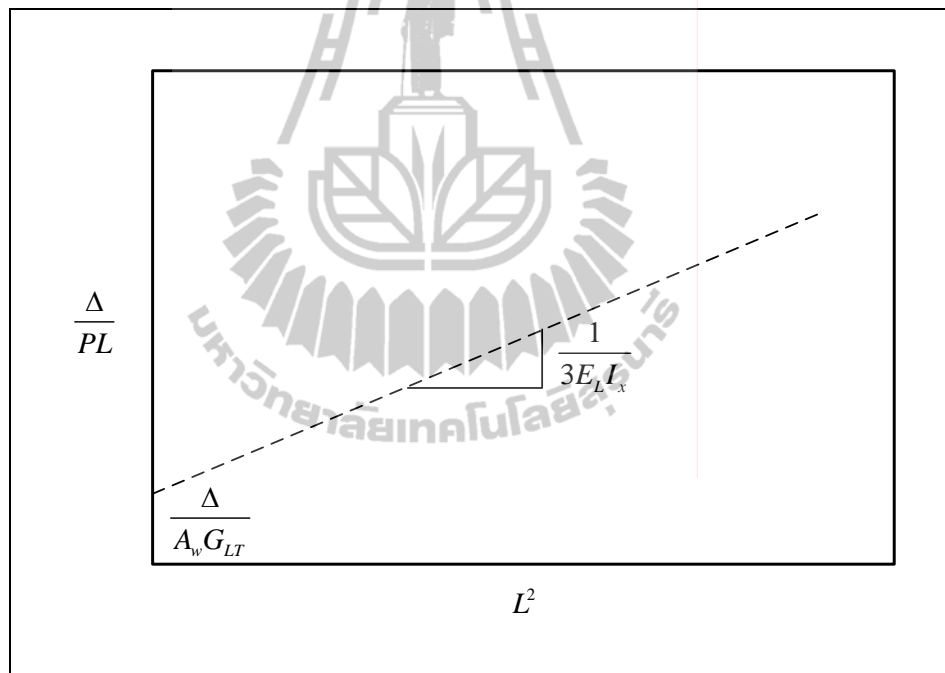
$$\frac{\Delta}{PL} = \frac{1}{3E_L I_x} L^2 + \frac{1}{A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่ $\text{Slope} = \frac{1}{3E_L I_x}$ และ $\text{Intercept} = \frac{1}{A_w G_{LT}}$

จากนั้น สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ดังแสดงในรูปที่ ข.1 ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (ข.3) และสมการที่ (ข.4) ตามลำดับ

$$E_L = \frac{1}{3I_x} \times \frac{1}{\text{Slope}} \quad (\text{ข.3})$$

$$G_{LT} = \frac{1}{A_w} \times \frac{1}{\text{Intercept}} \quad (\text{ข.4})$$



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบคานยื่น

ข.2 การคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือน

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

การวิเคราะห์ระยะแอ่นตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) ดังนี้

$$\Delta = \frac{PL^3}{48E_L I_x} + \frac{PL}{4A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.5})$$

จากสมการที่ (ข.5) สามารถจัดรูปใหม่ โดยมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (ข.6)

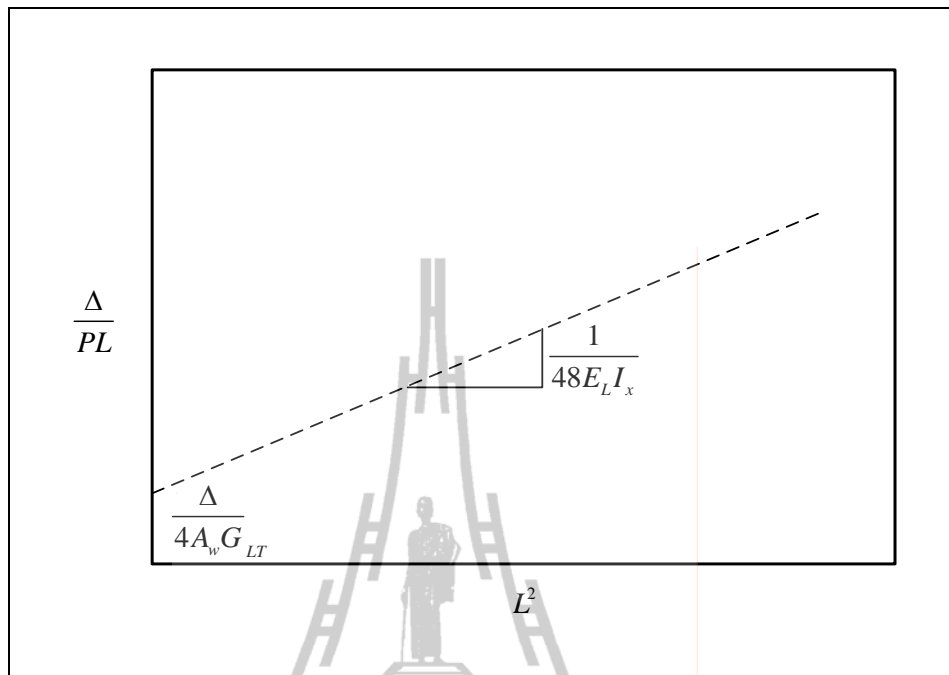
$$\frac{\Delta}{PL} = \frac{1}{48E_L I_x} L^2 + \frac{1}{4A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.6})$$

โดยที่ $\text{Slope} = \frac{1}{48E_L I_x}$ และ $\text{Intercept} = \frac{1}{4A_w G_{LT}}$

จากนั้น สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ดังแสดงในรูปที่ ข.2 ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (ข.7) และสมการที่ (ข.8) ตามลำดับ

$$E_L = \frac{1}{48I_x} \times \frac{1}{\text{Slope}} \quad (\text{ข.7})$$

$$G_{LT} = \frac{1}{4A_w} \times \frac{1}{\text{Intercept}} \quad (\text{ข.8})$$



รูปที่ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย



ข.3 การคำนวณโมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือน

สำหรับคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

การวิเคราะห์ห้ระยะแอนตัวของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่นสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีคานของ Timoshenko (Timoshenko beam theory) ดังนี้

$$\Delta = \frac{PL^3}{192E_L I_x} + \frac{PL}{4A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.9})$$

จากสมการที่ (ข.9) สามารถจัดรูปใหม่ โดยมีลักษณะเป็นสมการเชิงเส้นตรง ดังแสดงในสมการที่ (ข.10)

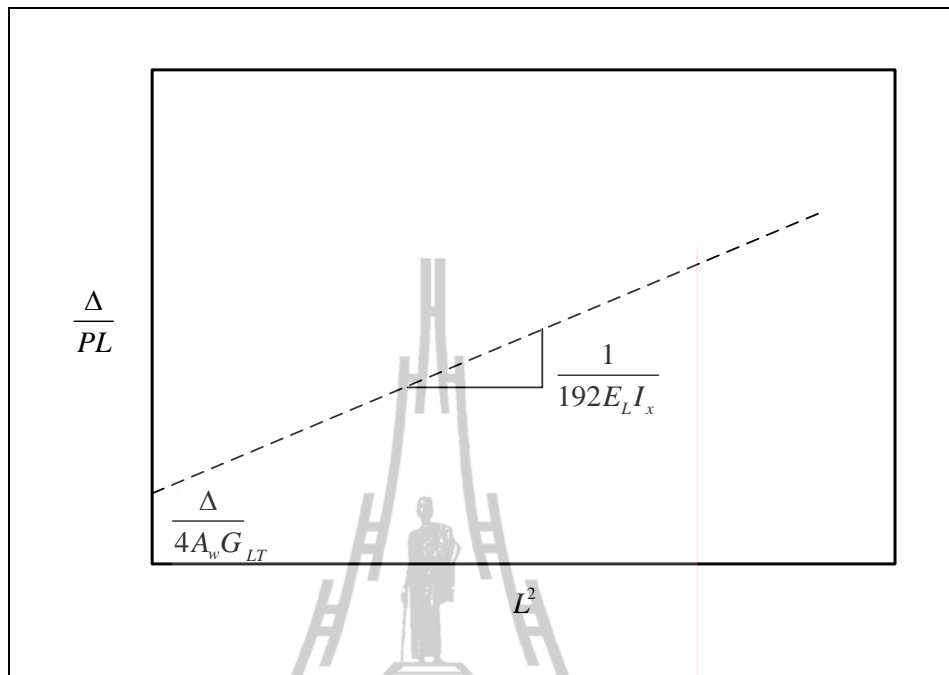
$$\frac{\Delta}{PL} = \frac{1}{192E_L I_x} L^2 + \frac{1}{4A_w G_{LT}} \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่ $\text{Slope} = \frac{1}{192E_L I_x}$ และ $\text{Intercept} = \frac{1}{4A_w G_{LT}}$

จากนั้น สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ดังแสดงในรูปที่ ข.3 ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นและโมดูลัสแรงเฉือนของตัวอย่างทดสอบสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (ข.11) และสมการที่ (ข.12) ตามลำดับ

$$E_L = \frac{1}{192I_x} \times \frac{1}{\text{Slope}} \quad (\text{ข.11})$$

$$G_{LT} = \frac{1}{4A_w} \times \frac{1}{\text{Intercept}} \quad (\text{ข.12})$$



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง Δ/PL และ L^2 ของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น





ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ปัญหา Eigenvalue Buckling

ค.1 การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Eigenvalue buckling

ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ Linear elastic ถ้ากำหนดให้ Linear elastic global stiffness matrix อยู่ในรูป $[K_e]$ แล้ว จะได้ว่า

$$[K_e]\{\Delta\} = \{P\} \quad (\text{ค.1})$$

ในการวิเคราะห์โครงสร้างแบบ Nonlinear จะทำการแบ่งย่อยสมการ Equilibrium equation ของโครงสร้างออกเป็นส่วนเล็ก ๆ เพื่อที่สามารถทำการประมาณส่วนเล็ก ๆ ดังกล่าวเป็นสมการแบบ Linear ได้ ซึ่งช่วยให้แก้สมการดังกล่าวได้ง่ายขึ้น โดย Global stiffness matrix ของส่วนเล็ก ๆ ของสมการดังกล่าวถูกเขียนอยู่ในรูป

$$[K_t]\{d\Delta\} = \{dP\} \quad (\text{ค.2})$$

โดยที่ $[K_t]$ คือ Tangent stiffness matrix
 $\{d\Delta\}$ คือ Vector ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ node ที่เปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนการวิเคราะห์
 $\{dP\}$ คือ Vector ของ loads และ reactions ที่กระทำที่ node ที่เปลี่ยนแปลงตามขั้นตอนการวิเคราะห์

โดยทั่วไปแล้ว องค์ประกอบของ $[K_t]$ จะมีส่วนหนึ่งเป็นแบบ Linear elastic และมีส่วนที่เหลือเป็น function กับ loads หรือ displacement ดังแสดงในสมการที่ (ค.3)

$$[K_e + K_g]\{d\Delta\} = \{dP\} \quad (\text{ค.3})$$

โดยที่ $[K_g]$ คือ Geometric stiffness matrix ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงความแกร่งของโครงสร้างเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือการเปลี่ยนตำแหน่ง

ในการคำนวณหา Elastic critical load ของโครงสร้าง สมการ Global stiffness matrix จะถูกจัดอยู่ในรูปของ Eigenvalue problem โดยที่สมการความสมดุลที่จุดวิกฤตอยู่ในรูป

$$[\mathbf{K}_e + \lambda \mathbf{K}_g] \{\Delta\} = \{0\} \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ $[\mathbf{K}_g]$ คือ Geometric stiffness matrix ซึ่งหาจาก Reference load $\{P_{ref}\}$
 λ คือ Load factor ของ $\{P_{ref}\}$
 $\{\Delta\}$ คือ รูปร่างที่เกิดการโก่งเดาะ

ค่า Critical load หรือ Buckling load เท่ากับค่าต่ำสุดของ λ ที่สอดคล้องกับสมการที่ (ก.4) ในกรณีที่ $\{\Delta\} \neq \{0\}$ คูณกับ $\{P_{ref}\}$ หรือ $\lambda \{P_{ref}\}$ และค่า $\{\Delta\}$ ที่สอดคล้องกับ $\lambda \{P_{ref}\}$ จะเป็นรูปร่างของการโก่งเดาะ

โดยทั่วไป สำหรับการหา Element stiffness matrix, $[\mathbf{K}_e]$ ใช้หลักการ principle of virtual displacements โดยจะพิจารณาถึงปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ได้แก่ (1) คุณสมบัติของวัสดุซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์ของหน่วยแรง (stress) และความเครียด (strain) ของวัสดุ (2) การกำหนดสถานะการเปลี่ยนตำแหน่งจริง (real displacement) และสถานะการเปลี่ยนตำแหน่งสมมติ (virtual displacement) ของชิ้นส่วนของโครงสร้าง และ (3) สมการอนุพันธ์ (differential equation) ระหว่างความเครียดและการเปลี่ยนตำแหน่ง

สำหรับโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้และอยู่ในสถานะที่สมดุล ภายใต้การกระทำของแรงภายนอก External virtual work เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งเสมือนที่ยอมรับได้ (admissible virtual displacement) จะมีค่าเท่ากับ Internal virtual work เนื่องจากการเปลี่ยนตำแหน่งเสมือนดังกล่าว ดังแสดงในสมการที่ (ก.5)

$$\delta W = \delta W_{ext} - \delta W_{int} = 0 \quad (\text{ก.5})$$

ในการวิเคราะห์โครงสร้างโดย Principle of virtual displacements จะหา Element stiffness matrix ของการเขียน Internal virtual work ให้เป็น function ของ strains ดังแสดงในสมการที่ (ก.6)

$$\delta W_{\text{int}} = \int_{\text{vol}} \{\delta \mathbf{e}\}^T [\mathbf{E}] \{\mathbf{e}\} d(\text{vol}) \quad (\text{ก.6})$$

โดยที่	$\{\mathbf{e}\}$	คือ	Real strain มีค่าเท่ากับ $[\mathbf{N}]^T [\Delta]$
	$\{\delta \mathbf{e}\}$	คือ	Virtual strain มีค่าเท่ากับ $[\mathbf{N}]^T [\delta \Delta]$
	$[\mathbf{E}]$	คือ	Elastic constant
	$[\mathbf{N}]$	คือ	Shape function

ในส่วน External virtual work เนื่องจากแรงกระทำ โดยการกำหนดให้ชิ้นส่วนของโครงสร้างถูกแรงกระทำที่ node 1 ถึง node n เป็น F_1, F_2, \dots, F_n ดังนั้น External virtual work สามารถเขียนอยู่ในรูปดังแสดงในสมการที่ (ก.7)

$$\delta W_{\text{ext}} = \sum_{i=1}^n \delta \Delta_i F_i \quad (\text{ก.7})$$

จาก Principle of virtual displacements ดังนั้น จากสมการที่ (ก.5) จะได้ว่า

$$\{\delta \Delta\}^T \left[\int_{\text{vol}} \{\mathbf{N}\} [\mathbf{E}] \{\mathbf{N}\}^T d(\text{vol}) \right] \{\Delta\} = \sum_{i=1}^n \delta \Delta_i F_i = \{\delta \Delta\}^T \{\mathbf{F}\} \quad (\text{ก.8})$$

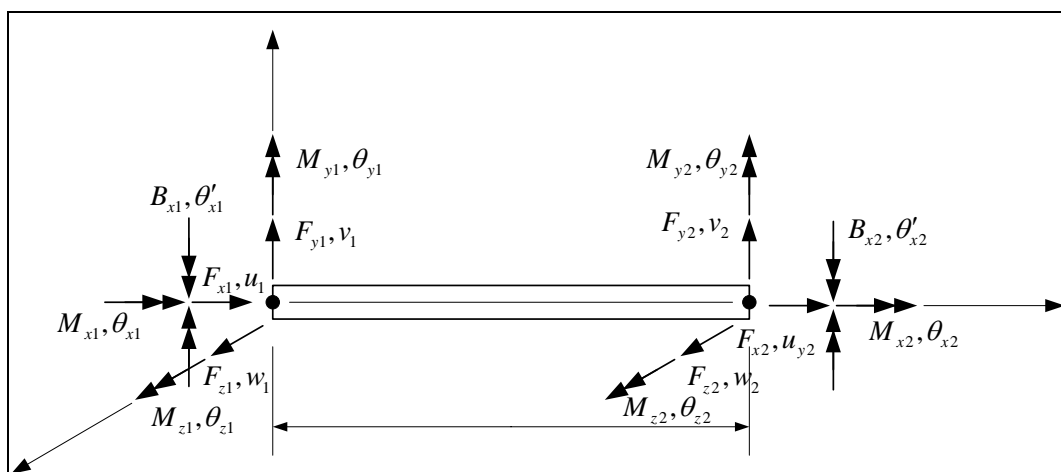
$$\text{หรือ} \quad \{\delta \Delta\}^T [\mathbf{k}] \{\Delta\} = \{\delta \Delta\}^T \{\mathbf{F}\} \quad (\text{ก.9})$$

ดังนั้น Element stiffness matrix สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (ก.10)

$$[\mathbf{k}] = \left[\int_{\text{vol}} \{\mathbf{N}\} [\mathbf{E}] \{\mathbf{N}\}^T d(\text{vol}) \right] \quad (\text{ก.10})$$

โดยทั่วไป ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะถูกแรงกระทำเนื่องจากแรงในแนวแกน (axial) แรงบิด (torsion) และแรงดัดในแกนหลัก (major flexural) และแกนรอง (minor flexural) โดยในกรณีของ Uniform torsion member เหมาะสำหรั้นำไปใช้ในชิ้นส่วนของโครงสร้างที่ถูกบิดเป็นมุมน้อย ๆ หรืออาจไม่เกิดการบิดเลย โดยไม่พิจารณาถึงการบิดเบี้ยวออกจากระนาบ (out-of-plane warping) ของหน้าตัด อย่างไรก็ตาม ความต้านทานต่อการ Warping ของหน้าตัดชิ้นส่วนของโครงสร้างมีความสำคัญในการวิเคราะห์ชิ้นส่วน โครงสร้างที่มีหน้าตัดแบบเปิด (open section) เช่น wide-flange, channel และ angle เป็นต้น ซึ่งความต้านทานดังกล่าวอาจเป็นตัวแปรหลักที่ควบคุมพฤติกรรมของชิ้นส่วน โครงสร้างในการต้านทานต่อแรงบิดได้

โดยถ้าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวแกนถูกยึดรั้งไม่ให้เกิดขึ้นแล้ว อัตราการบิด (rate of twist) ที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดใด ๆ ของชิ้นส่วน โครงสร้างจะมีค่าไม่คงที่ ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยวออกจากระนาบหน้าตัดที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของชิ้นส่วน และปีกของหน้าตัดอาจเกิดการค้ำร่วมกับการเปลี่ยนตำแหน่งทางด้านข้าง (flexural-torsional) โดยพฤติกรรมการบิดในลักษณะนี้ ถูกเรียกว่า Non-uniform torsion ซึ่งจะถูกวิเคราะห์ได้โดยการเพิ่มจำนวน degree of freedom ของชิ้นส่วน โครงสร้างในรูปของอัตราการบิด (θ'_{x1}) และ Conjugate variable (B) ซึ่งมักถูกเรียกว่า Bimoment สำหรับอีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา Eigenvalue buckling เป็นอีลิเมนต์แบบ BEAM188/3D linear finite strain beam ซึ่งมี 2 node โดยจำนวนของ degree of freedom จากเดิมที่มี 12 degree of freedom ต่ออีลิเมนต์ จะถูกเพิ่มผลของอัตราการบิดอีก 2 degree of freedom โดยจำนวนของ degree of freedom ของอีลิเมนต์แสดงในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 Degree of freedom ของ Beam element

สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีหน้าตัดคงที่ Element stiffness matrix เนื่องจากแรงต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังนี้

สำหรับแรงในแนวแกน (axial force)

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & -\frac{EA}{L} \\ -\frac{EA}{L} & \frac{EA}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.11})$$

แรงดัดแกนหลัก (flexural major axis)

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} & -\frac{12EI_z}{L^3} & \frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} \\ -\frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{12EI_z}{L^3} & -\frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{6EI_z}{L^2} & \frac{2EI_z}{L} & -\frac{6EI_z}{L^2} & \frac{4EI_z}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.12})$$

แรงดัดแกนรอง (flexural minor axis)

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI_y}{L^3} & -\frac{6EI_y}{L^2} & -\frac{12EI_y}{L^3} & \frac{6EI_y}{L^2} \\ \frac{6EI_y}{L^2} & \frac{4EI_y}{L} & \frac{6EI_y}{L^2} & \frac{2EI_y}{L} \\ -\frac{12EI_y}{L^3} & \frac{6EI_y}{L^2} & \frac{12EI_y}{L^3} & -\frac{6EI_y}{L^2} \\ \frac{6EI_y}{L^2} & \frac{2EI_y}{L} & -\frac{6EI_y}{L^2} & \frac{4EI_y}{L} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.13})$$

แรงบิดแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform torsion)

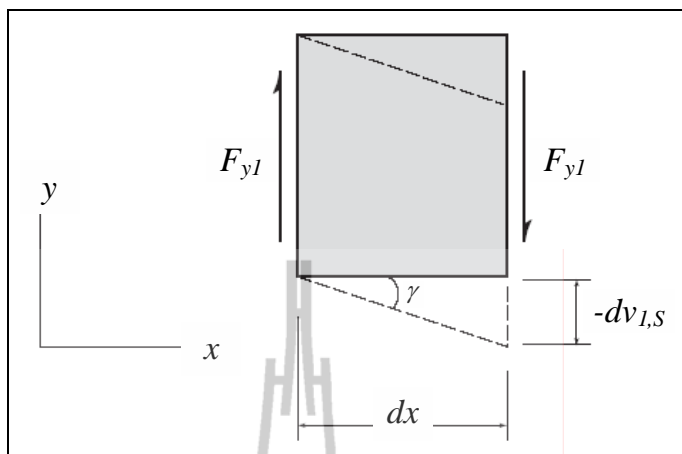
$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \theta_{x1} & \theta_{x2} & \theta'_{x1} & \theta'_{x2} \\ \left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & -\left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) \\ -\left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & \left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) \\ \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & \left(\frac{2GJL}{15} + \frac{4EC_w}{L}\right) & -\left(\frac{GJL}{30} - \frac{2EC_w}{L}\right) \\ \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & -\left(\frac{GJL}{30} - \frac{2EC_w}{L}\right) & \left(\frac{2GJL}{15} + \frac{4EC_w}{L}\right) \end{bmatrix}$$

(ค.14)

นอกจากนี้ อิลลิเมนต์ดังกล่าวได้พิจารณาผลการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (shear deformation) ของชิ้นส่วนโครงสร้างภายใน Element stiffness matrix สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีความชะลูดการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือนมีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงคด อย่างไรก็ตาม สำหรับชิ้นส่วนของโครงสร้างที่มีความยาวสั้น หรือมีอัตราส่วน L/d น้อยกว่า 10 ผลการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือนควรถูกนำมาพิจารณาในการวิเคราะห์โครงสร้าง (Kassimali, 1999) ดังนั้น ภายใต้แรงคด Element stiffness matrix จึงควรปรับปรุงโดยรวมผลการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือนดังกล่าว รูปที่ ค.2 แสดงชิ้นส่วนที่พิจารณาผลการเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน จากรูปพบว่า ความสัมพันธ์ของความเครียดเฉือน (shear strain) ภายใต้แรงเฉือนมีค่าดังแสดงในสมการที่ (ค.15)

$$\gamma = -\frac{d_{v1,s}}{dx} \quad (\text{ค.15})$$

โดยที่ γ คือ ความเครียดเฉือน
 $d_{v1,s}$ คือ การแอ่นตัวเนื่องจากผลแรงเฉือน



รูปที่ ค.2 การเปลี่ยนรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน (Kassimali, 1999)

จากกฎของฮุค (Hooke's law) สำหรับแรงเฉือน

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (\text{ค.16})$$

และ $\tau = \frac{F_{y1}}{k_{\text{tim}}A}$ (ค.17)

ดังนั้น $\gamma = -\left(\frac{1}{k_{\text{tim}}AG}\right)F_{y1}$ (ค.18)

เมื่อ $\beta_s = \frac{12EI}{k_{\text{tim}}AGL^2}$ (ค.19)

โดยที่	τ	คือ	หน่วยแรงเฉือน
	k_{tim}	คือ	สัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (Timoshenko shear coefficient)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดทั้งหมด
	β_s	คือ	ค่าคงที่ของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน

ที่ผ่านมาในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko (k_{tim}) ก่อนข้างยุ่งยาก และซับซ้อน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากดังกล่าว Bank (1989a); Nagaraj, and Gangarao (1997) ได้นำเสนอการประมาณค่า Transverse shear rigidity, $k_{tim}AG$ แทนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko โดยตรง โดยเสนอเป็นความสัมพันธ์ในรูปของสมการที่ (ค.20)

$$k_{tim} \approx \frac{A_w}{A} \quad (ค.20)$$

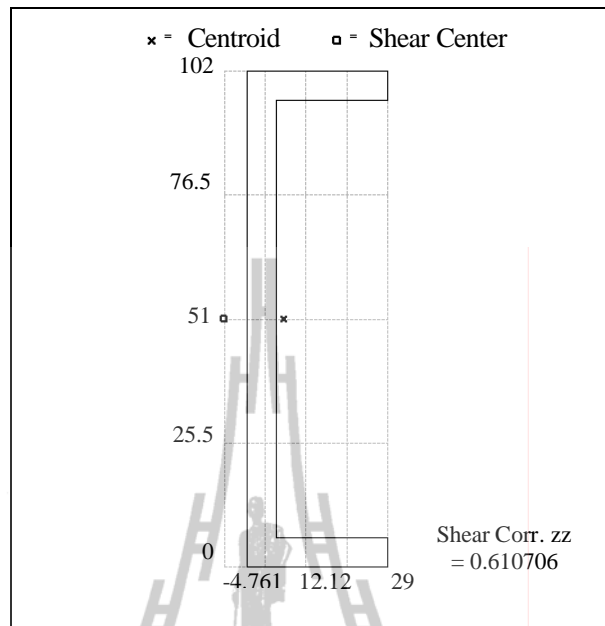
โดยที่ A_w คือ พื้นที่หน้าตัดของเอว

ตารางที่ ค.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดรูปร่างที่ใช้ในการศึกษา โดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko ที่คำนวณจากสมการที่ (ค.20), (k_{tim}^{app}) และผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS (k_{tim}^{ANSYS}) จากตารางพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko ที่คำนวณจากสมการที่ (ค.20) มีค่าสูงกว่าผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม ANSYS ประมาณ 5.5% ดังนั้น สมการที่ (ค.20) สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko ได้ถูกต้องเพียงพอสำหรับหน้าตัดรูปร่างที่ใช้ในการศึกษา

นอกจากนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดรูปต่าง ๆ โดยอ้างอิงกับขนาดหน้าตัดของรูปร่างที่ใช้ศึกษา เช่น หน้าตัดรูปตัว I หน้าตัดรูปกล่อง และหน้าตัด wide-flange ดังแสดงในตารางที่ ค.2 จากตารางพบว่า หน้าตัด wide-flange มีความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณจากสมการที่ (ค.20) และผลการวิเคราะห์มากที่สุดเท่ากับ 7.2% รองมาคือ หน้าตัดรูปกล่อง และหน้าตัดรูปตัว I โดยมีความแตกต่างโดยประมาณเท่ากับ 5.4% และ 1.4% ตามลำดับ

ตารางที่ ค.1 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดรูปร่าง

ขนาดหน้าตัด	k_{tim}^{app}	k_{tim}^{ANSYS}	$k_{tim}^{app} / k_{tim}^{ANSYS}$ (%)
C76×22×6 mm	0.648	0.618	4.85
C102×29×6 mm	0.648	0.611	6.05
C152×43×6 mm	0.651	0.616	5.68
ค่าเฉลี่ย			5.53



รูปที่ ค.3 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko โดยโปรแกรม ANSYS

ตารางที่ ค.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเฉือนของ Timoshenko สำหรับหน้าตัดต่าง ๆ

ขนาดหน้าตัด	k_{tim}^{app}	k_{tim}^{ANSYS}	$k_{tim}^{app} / k_{tim}^{ANSYS}$ (%)
I76×22×6 mm	0.648	0.643	0.78
I102×29×6 mm	0.648	0.637	1.73
I152×43×6 mm	0.651	0.641	1.56
ค่าเฉลี่ย			1.36
B76×22×6 mm	0.814	0.775	5.03
B102×29×6 mm	0.807	0.763	5.77
B152×43×6 mm	0.811	0.769	5.46
ค่าเฉลี่ย			5.42
WF76×6 mm	0.324	0.304	6.58
WF102×6 mm	0.327	0.303	7.92
WF152×6 mm	0.326	0.303	7.06
ค่าเฉลี่ย			7.19

จากนั้นทำการวิเคราะห์หา Element stiffness matrix เนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเนื่องจากแรงเฉือน ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ (ค.10) จะได้ว่า

แรงดัดแกนหลัก (flexural major axis)

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & -\frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} \\ \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & \frac{EI_z(4+\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & \frac{EI_z(2-\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} \\ -\frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & \frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} \\ \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & \frac{EI_z(2-\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & \frac{EI_z(4+\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.21})$$

แรงดัดแกนรอง (flexural minor axis)

$$[\mathbf{k}] = \begin{bmatrix} \frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & \frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & -\frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & \frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} \\ \frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & \frac{EI_y(4+\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & \frac{EI_y(2-\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} \\ -\frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & \frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} \\ \frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & \frac{EI_y(2-\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & \frac{EI_y(4+\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.22})$$

สุดท้าย รวมผลของแรงกระทำต่าง ๆ ในชิ้นส่วนของโครงสร้างที่พิจารณาจะได้ Element stiffness matrix, $[\mathbf{K}_e]$ และ Geometric stiffness matrix, $[\mathbf{K}_g]$ ของ Beam element แบบ 2 nodes ดังแสดงในสมการที่ (ค.23) และสมการที่ (ค.24) โดย Geometric stiffness matrix ได้ถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Yang and McGuire (1986)

$$\mathbf{[k_e]} = \begin{bmatrix}
 \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & 0 & -\frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & 0 & 0 & \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & \left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) \\
 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & 0 & \frac{EI_y(4+\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_y(2-\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{EI_z(4+\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z(2-\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 \\
 -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_z}{L^3(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Sym.} & 0 & 0 & \left(\frac{6GJ}{5L} + \frac{12EC_w}{L^3}\right) & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & -\left(\frac{GJ}{10} + \frac{6EC_w}{L^2}\right) & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_y(4+\beta_{sz})}{L(1+\beta_{sz})} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EI_z(4+\beta_{sy})}{L(1+\beta_{sy})} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{2GJL}{15} + \frac{4EC_w}{L}\right) & -\left(\frac{GJL}{30} - \frac{2EC_w}{L}\right) & -\left(\frac{2GJL}{15} + \frac{4EC_w}{L}\right)
 \end{bmatrix}$$

(ก.5)

$[k_g] =$

u_1	v_1	w_1	θ_{x1}	θ_{y1}	θ_{z1}	u_2	v_2	w_2	θ_{x2}	θ_{y2}	θ_{z2}	θ'_{x1}	θ'_{x2}
$\frac{F_{x2}}{L}$	0	0	0	0	0	$-\frac{F_{x2}}{L}$	0	0	0	0	0	0	0
$\frac{6F_{x2}}{5L}$	0	$\frac{11M_{y1} - M_{y2}}{10L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{F_{x2}}{10}$	$\frac{F_{x2}}{10}$	0	$-\frac{6F_{x2}}{5L}$	0	$-\frac{M_{y1} - 11M_{y2}}{10L}$	$-\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{F_{x2}}{10}$	$\frac{M_{y1}}{10}$	$-\frac{M_{y2}}{10}$
$\frac{6F_{x2}}{5L}$	$\frac{11M_{z1} - M_{z2}}{10L}$	$-\frac{F_{x2}}{10}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	0	0	0	$-\frac{6F_{x2}}{5L}$	$-\frac{M_{z1} - 11M_{z2}}{10L}$	$-\frac{F_{x2}}{10}$	$-\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{M_{z1}}{10}$	$-\frac{M_{z2}}{10}$
	$\frac{6F_{x2}I_\rho}{5AL}$	$-\frac{2M_{z1} - M_{z2}}{5}$	$\frac{2M_{y1} - M_{y2}}{5}$	0	$\frac{11M_{y1} - M_{y2}}{10L}$	$\frac{11M_{z1} - M_{z2}}{10L}$	$-\frac{6F_{x2}I_\rho}{5A}$	$-\frac{2M_{z1} + M_{z2}}{10}$	$\frac{2M_{y1} + M_{y2}}{10}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$
		$\frac{2F_{x2}L}{15}$	0	0	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{F_{x2}}{10}$	$-\frac{M_{z1} + 2M_{z2}}{10}$	$-\frac{F_{x2}L}{30}$	$\frac{M_{x2}}{2}$	$-\frac{(3M_{z1} - M_{z2})L}{30}$	$\frac{M_{z1}L}{30}$	$\frac{M_{z1}L}{30}$	$\frac{M_{z1}L}{30}$
			$\frac{2F_{x2}L}{15}$	0	0	$\frac{F_{x2}}{10}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{M_{y1} + 2M_{y2}}{10}$	$-\frac{M_{x2}}{2}$	$-\frac{F_{x2}L}{30}$	$-\frac{(3M_{y1} - M_{y2})L}{30}$	$\frac{M_{y1}L}{30}$	$\frac{M_{y1}L}{30}$
	$\frac{F_{x2}}{L}$	0	0	0	0	$\frac{F_{x2}}{L}$	0	0	0	0	0	0	0
	$\frac{6F_{x2}}{5L}$	0	$\frac{M_{y1} - 11M_{y2}}{10L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	0	$\frac{6F_{x2}}{5L}$	0	$\frac{M_{y1} - 11M_{y2}}{10L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$-\frac{F_{x2}}{10}$	$-\frac{M_{y1}}{10}$	$\frac{M_{y2}}{10}$
		$\frac{6F_{x2}}{5L}$	$-\frac{M_{z1} - 11M_{z2}}{10L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	0	0	$\frac{6F_{x2}}{5L}$	$-\frac{M_{z1} - 11M_{z2}}{10L}$	$\frac{F_{x2}}{10}$	$\frac{M_{x2}}{L}$	$-\frac{M_{z1}}{10}$	$\frac{M_{z2}}{10}$
			$\frac{6F_{x2}I_\rho}{5AL}$	$-\frac{2M_{z1} + M_{z2}}{5}$	$\frac{2M_{y1} + M_{y2}}{5}$	0	$-\frac{6F_{x2}I_\rho}{5A}$	$-\frac{2M_{z1} - 2M_{z2}}{5}$	$-\frac{M_{y1} - 2M_{y2}}{5}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{10AL}$
			$\frac{2F_{x2}L}{15}$	0	0	0	$\frac{2F_{x2}L}{15}$	0	$-\frac{M_{z1} - 3M_{z2}}{30}$	$-\frac{M_{z2}L}{30}$	$-\frac{(M_{z1} - 3M_{z2})L}{30}$	$\frac{M_{z1}L}{30}$	$\frac{M_{z1}L}{30}$
				0	0	0	0	0	$\frac{2F_{x2}L}{15}$	$\frac{M_{y2}L}{30}$	$\frac{(M_{y1} - 3M_{y2})L}{30}$	$\frac{M_{y1}L}{30}$	$\frac{M_{y1}L}{30}$
										$\frac{2F_{x2}I_\rho}{15A}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{30A}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{30A}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{30A}$
											$\frac{2F_{x2}I_\rho}{15A}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{30A}$	$\frac{F_{x2}I_\rho}{30A}$

Sym.

(ก.6)



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ง.1 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ง.1.1 วารสารระดับนานาชาติ (International Journal)

Thumrongvut, J., and Seangatith, S. (2011). **Experimental evaluation on fixed end supported PFRP channel beams and LRFD approach.** Applied Mechanics and Materials. (Accepted)

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)

ง.1.2 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

Seangatith, S., and Thumrongvut, J. (2011). **Experimental investigation on simply supported PFRP channel beams subjected to three-point loading.** International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (MPMT 2011), Chengdu, China, October 28-30. (Accepted)

Thumrongvut, J., and Seangatith, S. (2011). **Experimental evaluation on fixed end supported PFRP channel beams and LRFD approach.** International Conference on Vibration, Structural Engineering and Measurement (ICVSEM2011), Shanghai China, October 21-23. (Accepted)

Thumrongvut, J., and Seangatith, S. (2011). **Responses of PFRP cantilevered channel beams under tip point loads.** Eighth International Conference on Composite Science and Technology (ICCST-8), Kuala Lumpur, Malaysia, March 22-24, pp. 100. (CD-Rom Format)

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, pp. 678-679. (CD-Rom Format)

ง.1.3 การประชุมวิชาการระดับชาติ (National Conference)

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, pp. 259. (CD-Rom Format)

ง.2 บทความวิจัยอื่น ๆ ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ง.2.1 วารสารระดับชาติ (National Journal)

นันทิกา นามวิจิตร สิทธีชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ (2554). **พฤติกรรมและกำลังรับแรงอัดของ Concrete หน้าตัดกลมที่ถูกโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็ก.** วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อ.บ. (Accepted for publication)

Seangatith, S., and Thumrongvut, J. (2009). **Experimental investigation on square steel tubed RC columns under axial compression.** Suranaree Journal of Science and Technology, Vol.16 No.3, pp. 205-220.

สิทธีชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา ชำรงวุฒิ (2551). **การตรวจสอบ Tubed Concrete Column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน.** วิศวกรรมสาร ม.ช. ปีที่ 35, ฉบับที่ 1, หน้า 81-99.

จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธีชัย แสงอาทิตย์ (2549). **ผลของความยาวระยะฝั่งเหล็กวางน้ำที่มีต่อคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำเร็จรูป.** วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1, หน้า 11-19.

ง.2.2 การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (International Conference)

Seangatith, S., and Thumrongvut, J. (2011). **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 Special Administrative Region, China, January 26-28, pp. 221-222. (CD-Rom Format)

Namvijitr, N., Seangatith, S., Thumrongvut, J., and Sukprasert, S. (2010). **Behavior of circular steel tubed concrete specimens preconfined with steel jackets under axial compression.** The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010), Nong Khai, Thailand, March 4-6, pp. 83-88.

ง.2.3 การประชุมวิชาการระดับชาติ (National Conference)

กรรณ คำลือ จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2554). **การตรวจสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องภายใต้แรงกระทำตามขวาง.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16. โรงแรมเดอะชาयน์, ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554, หน้า 260. (CD-Rom Format)

ชวลีพร อุษยีนยงค์ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ ศาสน์ สุขประเสริฐ (2554). **ผลการโอบรัดก่อนด้วยปลอกเหล็กต่อพฤติกรรมของคานกริดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสภายใต้การรับแรงในแนวแกน.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 16. โรงแรมเดอะชาयน์, ชลบุรี, 18-20 พฤษภาคม 2554 หน้า 251. (CD-Rom Format)

จักษดา ชำรงวุฒิ กรรณ คำลือ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ วินัย มณีรัตน์ (2552). **การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูป.** การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 5, โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ท เขาใหญ่, นครราชสีมา, 20-22 ตุลาคม 2552, หน้า STR 35-40.

จักษดา ชำรงวุฒิ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ หวังแก้ว บุญสวน (2552). **Tubed Concrete Column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่าและสมการออกแบบของเสาเชิงประกอบ.** การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, สุรสัมมนาการ, นครราชสีมา, 13-15 พฤษภาคม 2552, เล่มที่ 6 (STR), หน้า 1931-1937.

- จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2551). **การทดสอบ Tubed RC Column หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, โรงแรม จอมเทียน ปาล์ม บีช, ชลบุรี, 14-16 พฤษภาคม 2551, หน้า STR 253-258.
- จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2550). **การเปรียบเทียบผลการทดสอบ Tubed RC Column กับแบบจำลองการโอบรัดของ ACI**. การประชุมวิชาการบัณฑิตศึกษามทส. ครั้งที่ 1, ศูนย์สมมนาการ, นครราชสีมา, 1-2 พฤศจิกายน 2550. (CD-Rom Format)
- จักษดา ชำรงวุฒิ กรรณ คำลือ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ วินัย มณีรัตน์ (2550). **การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของรอยต่อของคานคอนกรีตสำเร็จรูป**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, โรงแรมอมรินทร์ลา구나, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550, เล่มที่ 7 (STR), หน้า 110-115.
- สิทธิชัย แสงอาทิตย์ และ จักษดา ชำรงวุฒิ (2550). **พฤติกรรมทางโครงสร้างของ Tubed Column หน้าตัดสี่เหลี่ยมด้านเท่า**. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 12, โรงแรมอมรินทร์ลา구나, พิษณุโลก, 2-4 พฤษภาคม 2550, เล่มที่ 7 (STR), หน้า 51-56.
- จักษดา ชำรงวุฒิ และ สิทธิชัย แสงอาทิตย์ (2549). **ผลของการโอบรัดของปลอกเหล็ก และปลอก Stainless steel ต่อพฤติกรรมเสาคอนกรีต**. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 2, โรงแรมเจริญศรี แกรนด์ รอยัล, อุตรธานี, 25-27 ตุลาคม 2549, หน้า STR 9-13.
- Thumrongvut, J., and Seangathith, S. (2006). **Experimental on concrete columns confined with steel jackets subjected to concentric axial compression**. 32nd Congress on Science and Technology of Thailand, Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, October 10-12. (CD-Rom Format)

ง.2.4 รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ (Technical Report)

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ กรรณ คำลือ (2554). การทดสอบคานคอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปแบบต่อเนื่องที่ถูกเสริมรอยต่อเพิ่มด้วยลวดเกลียวอัดแรงภายใต้แรงกระทำตามขวาง. รายงานฉบับสมบูรณ์, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (แหล่งทุน - บริษัท เอส-คอน คอนกรีต จำกัด)

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ กรรณ คำลือ (2552). การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วนสำเร็จรูปที่ถูกเสริมกำลังดัดด้วยเหล็กเสริมสั้น. รายงานฉบับสมบูรณ์, หน่วยวิจัยเพื่อเทคโนโลยีการก่อสร้าง (CTRU), สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (แหล่งทุน - บริษัท ไทย แมค ฟริแคชท์ จำกัด)

สิทธิชัย แสงอาทิตย์ จักษดา ชำรงวุฒิ และ กรรณ คำลือ (2550). การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของรอยต่อของคานคอนกรีตสำเร็จรูป. รายงานฉบับสมบูรณ์, หน่วยวิจัยเพื่อเทคโนโลยีการก่อสร้าง (CTRU), สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (แหล่งทุน บริษัท ยงสวัสดิ์คอนสตรัคชั่น โปรดักส์ จำกัด)



On the Structural Responses of Simply Supported PFRP Channel Beams under Three-point Loading

Jaksada Thumrongvut^{1*} and Sittichai Seangatith²

Abstract— In this study, the experimental results on the simply supported PFRP channel beams subjected to three-point loading are presented. The aims of this paper are to investigate the effects of the span (L) on the structural behaviors, the critical buckling loads and the modes of failure of the beams, and to compare the obtained deflections with those obtained from the Timoshenko's shear deformation beam theory equation in order to check the sufficiency of the equation. The beam specimens have the cross-sectional dimensions of $152 \times 43 \times 10$ mm with span-to-depth ratio (L/d) ranging from 13 to 33. A total of sixteen specimens were tested. Based on the experimental results, it was found that the loads 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 geometrically nonlinear. The general modes of failure are the flexural-torsional buckling. Finally, the Timoshenko's shear deformation beam equation can adequately predict the vertical deflection of the beams.

Index Terms— Pultruded fiber reinforced plastic, Channel profile, Flexural-torsional buckling, Simply Supported, Three-point Loading

I. INTRODUCTION

FIBER reinforced plastic (FRP) composite materials have been increasingly used in the fields of structural engineering applications over the past few decades [1]. The FRP composite is a material composed of fiber reinforcement bonded to a polymer resin or matrix (e.g., polyester, vinyl ester and epoxy) with distinct interfaces between them [2]. In the form of FRP, the fibers and polymer resins still have their own physical and chemical properties. The fibers provide strength and stiffness, and resins provide shape and protect the fibers from damage. The FRP composite have many advantages over the conventional civil engineering materials such as steel and reinforced concrete. These properties include a high strength-

to-weight ratio, high corrosion resistance, tailoring of the material to specific applications and ease of installation [3].

Among various types of manufacturing processes, the pultrusion process appears to offer the highest productivity-to-cost ratio. The FRP manufactured by this process is called pultruded fiber reinforced plastic (PFRP). Generally, they have the standard PFRP structural profiles similar to the structural steel, including wide-flange sections, I-sections, angles, channels and etc. However, due to relatively low stiffness of the material and thin-walled sectional geometry, the strength is not usually the governing design parameter of the PFRP structural profiles. Mostly, their design is governed by the serviceability parameters such as large deflection or buckling instability, depending on the geometry of the cross-section, the material properties, and the loading conditions [4]. In addition, the critical obstacles to their widespread applications in construction are the lack of simplified and reliable design criteria [5].

The research and development of all PFRP structures in civil engineering have progressed considerably in several countries [6]. In the past decades, several researches have been carried out on the experimental and theoretical evaluations of the flexural-torsional buckling of the PFRP structural beams. However, most of these studies have highlighted on the flexural-torsional behavior of the PFRP beams having doubly symmetric cross-sections such as wide-flange, I, and box profiles [7]-[16]. Only few research works on the mono-symmetric channel profiles were carried-out [17]. In recent years, the applications of the channel profile have been increased considerably in a variety of the secondary structures such as purlins, trusses, and bracing members because they can be easily fabricated and erected. Also, in order to create further confidence in the application of the profile, it is necessary to enhance knowledge of its structural performance, particularly the global behaviors and the global instability. This paper is intended to satisfy a portion of that need. Therefore, the objectives of this paper are to present the experimental results on the structural behaviors and mode of failure of the simply supported PFRP channel beams under three-point loading, and to compare the obtained deflections with those obtained from the Timoshenko's shear deformation beam theory equation in order to check the sufficiency of the equation.

Manuscript received June 30, 2011.

^{1*} Jaksada Thumrongvut, is the Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand (corresponding author to e-mail: jaksada@g.sut.ac.th).

² Sittichai Seangatith, is the Associate Professor, School of Civil Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand (e-mail: sittichai@sut.ac.th).

II. EXPERIMENTAL PROCEDURES

A. Test Specimens

The PFRP channel members used in this study were made of E-glass fiber reinforced polyester resin, and manufactured by a pultrusion process. They have the cross-sectional dimensions of $152 \times 43 \times 10$ mm with span-to-depth ratio (L/d) ranging from 13 to 33. A total of sixteen specimens were tested. Two tests were performed on each span-to-depth ratio. Details of the test profiles, dimensions, and geometric properties are presented in Table I. The specimen numbers were designated in the form of "Cd-S-L". For example, the specimen number C152-S-3.5 is the PFRP channel specimens, having depth (d) of 152 mm, S (simply supported) and span of 3.5 m, respectively.

TABLE I
Geometric properties of the pultruded FRP channel specimens

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-2.0	$152 \times 43 \times 10$	2.0	13.2	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-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	19.7	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-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	26.3	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-5.0	$152 \times 43 \times 10$	5.0	32.9	285281	76000	1.379×10^9	2

C. Test Set-up Configuration

The typical test set-up configuration and instrumentation to measure critical buckling load for the static simply supported with three-point loading test of the PFRP beam is shown in Fig. 1. To prevent beams from sudden falling off in the case of lateral buckling, the beams were restrained laterally at the support by using safety vertical rods fixed at the bottom support. This design prevents the out-of-plane twisting of the ends of the beams. At the mid-span, a bolt with M16 nut was firmly installed on the neutral axis of the cross-section, so that the concentrated vertical load can be applied passing directly through the shear center of the cross-section. The loads were initially applied by sequentially adding steel pendulums on a loading platform. The incremental loads were added until reaching the critical buckling loads and the failure of the beams. It should be noted that the critical buckling load is the values of the corresponding highest end loads at which prior to failure of the beams. Two strain gauges were installed at the top and bottom of the flange at the mid-span section, as presented in Fig. 1(a), to measure the longitudinal strain in flexural span. In addition, two 100 mm linear variable differential transducers (LVDTs) were used to measure the vertical and lateral deflection of the beams in mid-span section, as shown in Fig. 1(b). The overall deflections were automatically recorded by a MW100 YOKOGAWA data

B. Material Properties

To correlate the analytical results with the obtained test results, the values of the longitudinal modulus (E_L) and the in-plane shear modulus (G_{LT}) were determined from the tension test in accordance with ASTM D3039 and the in-plane shear coupon test in accordance with ASTM D5379, respectively. This shear coupon test is in the form of V-notched beam test with the pure shear under a four-point asymmetric bending configuration. From the coupon tests, it was found that the average values of E_L and G_{LT} were 35.20 GPa and 2.18 GPa, respectively. In addition, the results from the distributed analysis of all the mechanical properties were in good agreement with the values of the coefficient of determination (COD) which is close to 1.0.

acquisition unit. Finally, the failure mechanisms were also monitored and recorded.

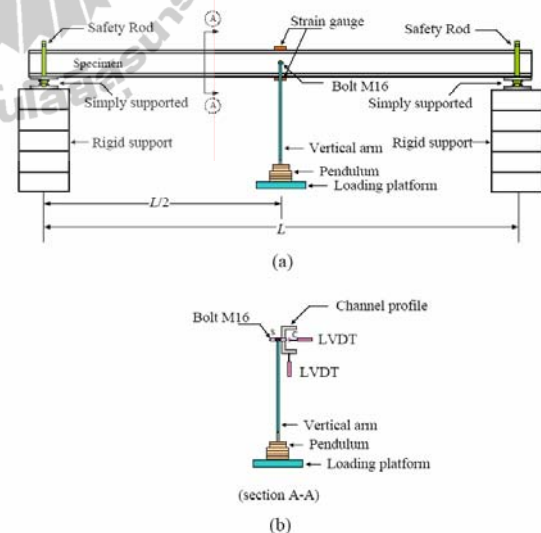
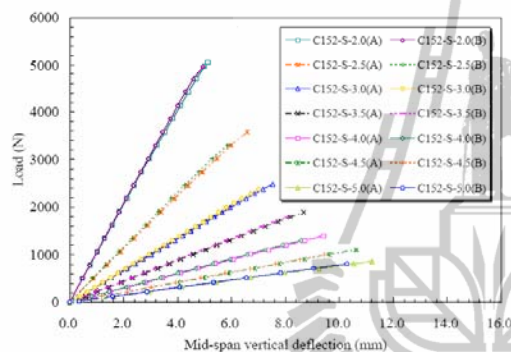


Fig. 1. Test setup (a) A schematic view and (b) Load applied through the shear center

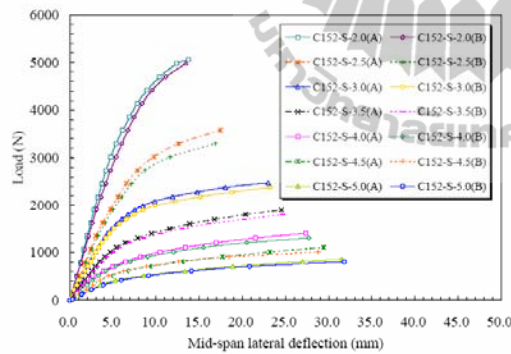
III. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Behaviors and Modes of Failure

Fig. 2(a) and 2(b) illustrate the behaviors of the PFRP beams in terms of applied load and mid-span vertical and lateral deflection, respectively. It can be seen that the behavior of all beams has a linear elastic response up to 90-95% of the obtained critical buckling load. After that, the curves are becoming nonlinear and leading to the buckling failure of the beam. From the tests also showed that the short span beam has a slightly higher degree of nonlinear response before failure than that of the longer span beam. The distinction is due to the fact that the response of the longer span beams is less stiff than that of the shorter span beams.



(a) mid-span vertical deflection



(b) mid-span lateral deflection

Fig. 2. Load and mid-span deflection relationship of specimens

For the mid-span lateral deflection, the response curves show that the PFRP beams used in this study are in general similar to each other. The load versus mid-span lateral deflection relationships of the beam specimens are geometrically nonlinear, 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 flexural-torsional buckling mode of failure. No external material damage was observed. Fig. 3 shows the typical failure modes of the pultruded beams. Fig. 4 represents the response curves between load and longitudinal strain at the top and bottom of the flange at the mid-span section. It is well known that the top and bottom strain at the same position are always in opposite. For this reason, the strains at the top of the flange are compression, while the strains at the bottom of the flange are tension. The tests also showed that both compressive and tensile strain behave linearly up to the failure. The maximum compressive and tensile strains of all beams are in the range of 500-1000 $\mu\epsilon$, and corresponding to the experimental study by Razzaq *et al.* [18].



Fig. 3. Typical modes of failure

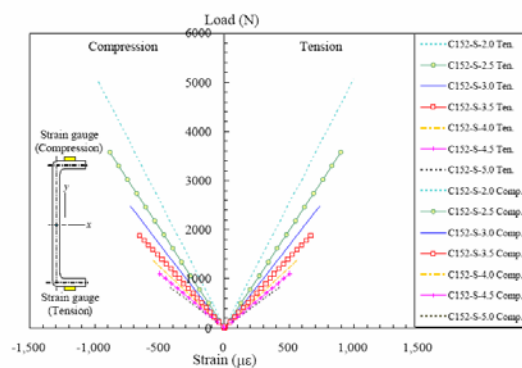


Fig. 4. Load versus longitudinal strain of specimens

Table II shows the experimentally obtained critical buckling load ($P_{cr,EXP}$) of the beams. This indicates that the critical load increases as the span of beam decreases. Also, the degree of flexural-torsional buckling of the channel beams in this study depends on the spans of the beams. With the increasing span, the flexural-torsional buckling mode is more noticeable. In contrast, it was also found that the obtained maximum deflection ($\Delta_{ver,EXP}$) at the mid-span section increased when the span of beam increases.

B. Prediction of deflections

Mottram [8] emphasized that there is a possible risk in analysis and design of FRP beams without including shear deformation. Timoshenko's beam theory [19] can be used to determine the vertical deflection of pultruded beams, which takes into account shear deformation. The usages of shear deformation beam theory are especially significant in pultruded beams because of the relatively high E_L/G_{LT} ratios due to the relatively low shear modulus of pultruded materials [20]. The total beam deflection is a sum of the deflection due to bending deformation and the deflection due to shear deformation. The general expression of the vertical deflection

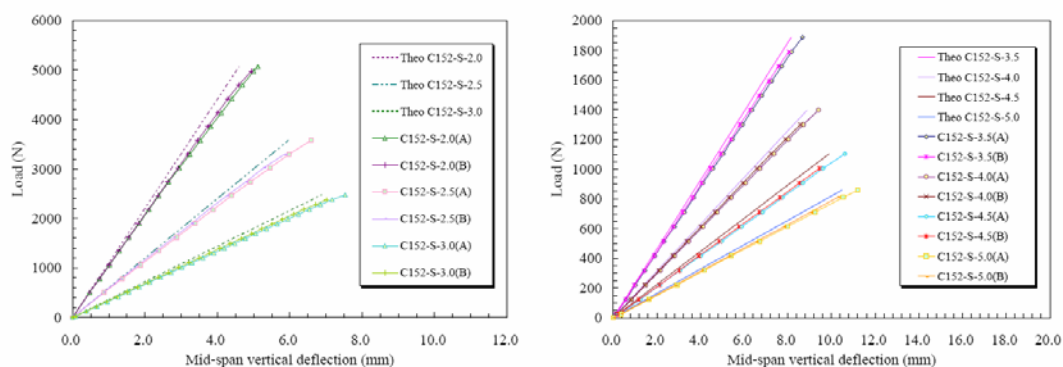
for a three-point loading test with the load applied at mid-span is:

$$\Delta_{max} = \Delta_{flexure} + \Delta_{shear} = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{PL}{4kGA} \tag{1}$$

in which EI is the flexural rigidity, kGA is the transverse shear rigidity. For homogeneous pultruded beam, having the same properties in the flanges and webs of the profile, the transverse shear rigidity can be approximated by the in-plane shear modulus multiplied by the area of the web ($kGA \approx G_{LT}A_w$) [20], [21]. Table II also presents the obtained vertical deflection compared with those predicted by equation (1). From the analytical results, the $\Delta_{ver,EXP} / \Delta_{ver,Theo}$ ratios are in the range of 1.05 to 1.10, this indicating that the experimental results are in good agreement with the predicted results. In addition, the effect of shear deformation increases when the span of beam decreases. Based on the results of this study, Fig. 5 shows the plots between the test results with the predicted results from the Timoshenko's beam theory equation in order to check the adequacy of the equation. It can be seen that the theoretical equation can be used to adequately predict the vertical deflection of the specimens.

TABLE II
Experimental critical buckling load and deflection of the PFRP beams

Specimens number	L/d	Experimental			Analytical (1)		
		Test A	Test B	Average	Average	Timshenko	$\frac{\Delta_{ver,EXP}}{\Delta_{ver,Theo}}$
		$P_{cr,A}$ [N]	$P_{cr,B}$ [N]	$P_{cr,EXP}$ [N]	$\Delta_{ver,EXP}$ [mm]	$\Delta_{ver,Theo}$ [mm]	$\Delta_{ver,Theo}$
C152-S-2.0	13.2	5069	4976	5023	5.03	4.56	1.10
C152-S-2.5	16.4	3578	3298	3438	6.23	5.73	1.09
C152-S-3.0	19.7	2477	2379	2428	7.27	6.75	1.08
C152-S-3.5	23.0	1889	1790	1839	8.36	7.95	1.05
C152-S-4.0	26.3	1398	1300	1349	9.00	8.57	1.05
C152-S-4.5	29.6	1104	1006	1055	10.03	9.45	1.06
C152-S-5.0	32.9	859	809	834	10.75	10.18	1.06



(a) specimens with span of 2.0 to 3.0 m
(b) specimens with span of 3.5 to 5.0 m
Fig. 5. Load versus deflection curves obtained from the experiment and theoretical calculation

IV. CONCLUSION

Based upon the results, the following conclusions can be drawn:

- 1) The relationship between the load and mid-span vertical deflection of the PFRP channel beams are almost linear up to the failure. In contrast, the load versus mid-span lateral deflection relationships are geometric nonlinear response and the response curves exhibit gradually increasing nonlinearity toward the buckling failure of the beam. All of specimens were failed in the form of twisting and large lateral displacement occurred simultaneously in the form of the flexural-torsional buckling.
- 2) Based on the experimental results, the responses between the load and longitudinal strain at the top and bottom of the flange at the mid-span section are linear up to the failure, and the critical buckling load increases as the span-to-depth ratios of beam decreases.
- 3) By comparing the obtained vertical deflection with those predicted by the Timoshenko's shear deformation beam equation, it was found that they are in good agreement. It is concluded that the shear deformation beam theory is especially important in pultruded beams, which is of key importance for the serviceability design.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge all the supports of Suranaree University of Technology for this study, which is a part of the research project "The Development of Design Equation for Pultruded-Fiber Reinforced Plastic Having C-Section under Compression and Flexure".

REFERENCES

- [1] T. P. Vo, and J. Lee, "Flexural-torsional behavior of thin-walled composite box beams using shear-deformable beam theory," *Engineering Structures*, vol. 30, pp. 1958-1968, 2008.
- [2] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1975.
- [3] J. F. Davalos, P. Z. Qiao, and H. A. Salim, "Flexure-torsional buckling of pultruded fiber reinforced plastic composite I-beams: experimental and analytical evaluations," *Composite Structures*, vol. 38, no. 1-4, pp. 241-250, 1997.
- [4] N. I. Kim, D. K. Shin, and M.Y. Kim, "Exact lateral buckling analysis for thin-walled composite beam under end moment," *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 1739-1751, 2007.
- [5] J. Thunrongvut, and S. Seangattith, "Experimental study on lateral-torsional buckling of PFRP cantilevered channel beams," in *Proc. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12)*, Hong Kong Special Administrative Region, China, 2011.
- [6] C. E. Bakis, L. C. Bank, V. L. Brown, E. Cosenza, J. F. Davalos, J. J. Lesko, A. Machida, S. H. Rizkalla, and T. C. Triantafillou, "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review," *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, no. 2, pp. 73-87, 2002.
- [7] E. Barbero, S-H. Fu, and I. Raftoyiannis, "Ultimate bending strength of composite beams," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 292-306, 1991.
- [8] J. T. Mottram, "Lateral-torsional buckling of a pultruded I-beam," *Composites*, vol. 32, no. 2, pp. 81-92, 1992.
- [9] R. J. Brooks, and G. J. Turvey, "Lateral buckling of pultruded GRP I-section cantilevers," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1-4, pp. 203-215, 1995.
- [10] M. D. Pandey, M. Z. Kabir, and A. N. Sherbourne, "Flexural-torsional stability of thin-walled composite I-section beams," *Composite Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 321-342, 1995.
- [11] J. Loughlan, "The buckling of composite stiffened box sections subjected to compression and bending," *Composite Structures*, vol. 35, no. 1, pp. 101-116, 1996.
- [12] J. F. Davalos, and P. Z. Qiao, "Analytical and experimental study of lateral and distortional buckling of FRP wide-flange beams," *Journal of Composites for Construction*, vol. 1, no. 4, pp. 150-159, 1997.
- [13] D. H. Hodges, and D. A. Peters, "Lateral-torsional buckling of cantilevered elastically coupled composite strip and I-beams," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 9, pp. 1585-1603, 2001.
- [14] T. M. Roberts, and H. Al-Ubaidi, "Flexural and torsional properties of pultruded fiber reinforced plastics I-profiles," *Journal of Composites for Construction*, vol. 6, no. 1, pp. 28-34, 2002.
- [15] M. B. Sirjani, and Z. Razzaq, "Stability of FRP beams under three-point loading and LRFD approach," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 24, no. 18, pp. 1921-1927, 2005.
- [16] J. Thunrongvut, and S. Seangattith, "Responses of PFRP cantilevered channel beams under tip point loads," *Key Engineering Materials*, vol. 471-472, pp. 578-583, 2011.
- [17] L. Y. Shan, and P. Z. Qiao, "Flexural-torsional buckling of fiber-reinforced plastic composite open channel beams," *Composite Structures*, vol. 68, pp. 211-224, 2005.
- [18] Z. Razzaq, R. Prabhakaran, and M. M. Sirjani, "Load and resistance factor design (LRFD) approach for reinforced-plastic channel beam buckling," *Composites Part B: Engineering*, vol. 27, no. 3, pp. 361-369, 1996.
- [19] S. P. Timoshenko, *Strength of Materials*. D.Van Nostrand Company, Inc, 1940.
- [20] L. C. Bank, "Flexural and shear moduli of full-section fiber reinforced plastic (FRP) pultruded beams," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 17, no. 1, pp. 40-45, 1989.
- [21] V. Nagaraj, and H. V. S. GangaRao, "Static behavior of pultruded GFRP beams," *Journal of Composites for Construction*, vol. 1, pp. 120-129, 1997.

ประวัติผู้เขียน

นาย จักรดา ชำรงวุฒิ เกิดเมื่อวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับประถมศึกษาและมัธยมศึกษา จากโรงเรียนอานวยศิษย์ศึกษาและโรงเรียนวัดราชพิชิต ตามลำดับ จากนั้น เริ่มศึกษาระดับปริญญาตรี ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2544 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2548 หลังจากจบ การศึกษาได้รับทุนเรียนดีเด่น (Outstanding Academic Performance Scholarship) จากมหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี เพื่อศึกษาต่อระดับปริญญาเอก ในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ.2548 ขณะ que ศึกษาอยู่ได้มี โอกาสเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งทำให้ ผู้วิจัยได้นำประสบการณ์ และความรู้ที่ได้จากการเป็นผู้ช่วยสอนและวิจัยมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย ได้เป็นอย่างดี และมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ดังนี้

วารสารระดับนานาชาติ	4	บทความ
วารสารระดับชาติ	4	บทความ
การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	6	บทความ
การประชุมวิชาการระดับชาติ	11	บทความ
รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์	3	เล่ม