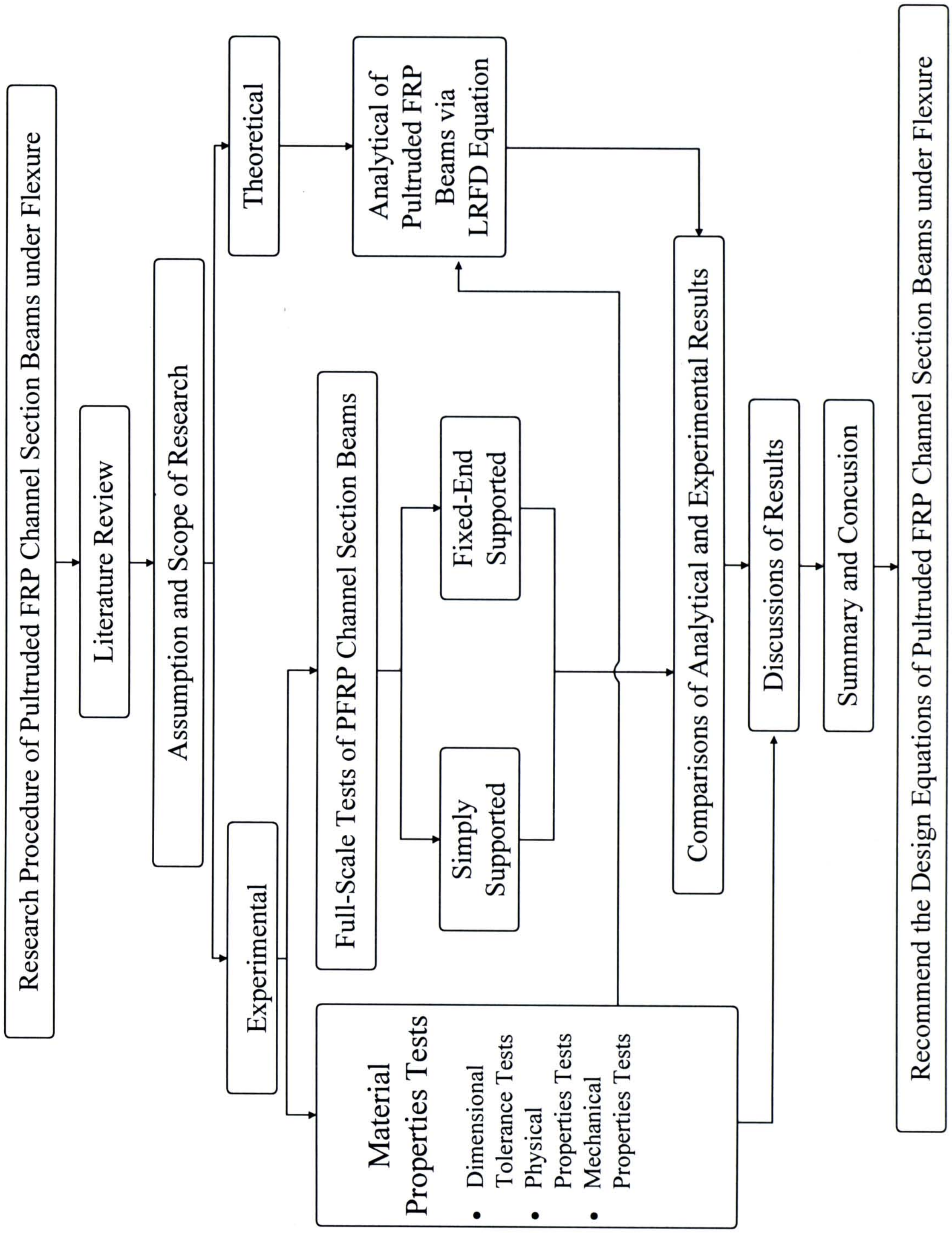
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

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

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

สุดท้ายเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ได้จากสมการออกแบบโดยวิธี LRFD กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยสรุปขั้นตอนการศึกษาสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินงานวิจัย

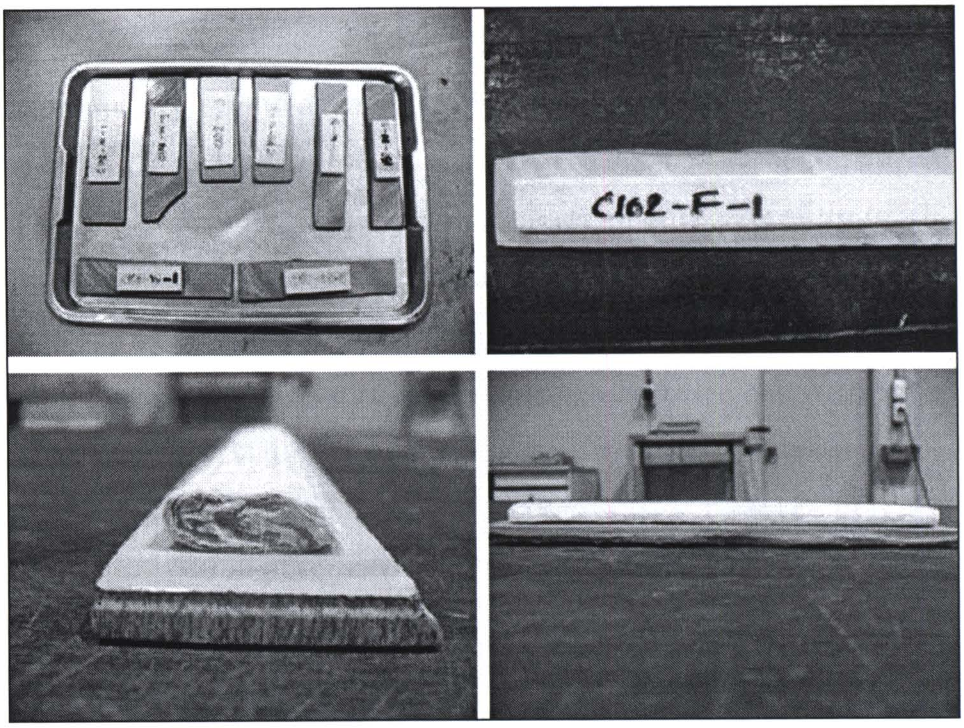
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ PFRP

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

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ PFRP

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

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดจากชิ้นส่วนปีกและเอวของวัสดุ PFRP โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบทั้งหมดต้องผ่านการทดสอบหาความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ (ASTM D3171, 1999) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.2 วิธีการทดสอบกระทำตามวิธีการ G (Matrix burn off in a muffle furnace) ในมาตรฐาน ASTM D3171-99 “Standard Test Method for Constituent Content of Composite Materials” ด้วยกระบวนการนี้ องค์ประกอบของเรซินจะถูกแยกออกจากตัวอย่างทดสอบโดยการให้ความร้อนจากเตาเผา (furnace) ในขณะที่องค์ประกอบของเส้นใยแก้วยังคงอยู่เช่นเดิม จำนวนตัวอย่างทดสอบที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ลักษณะตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

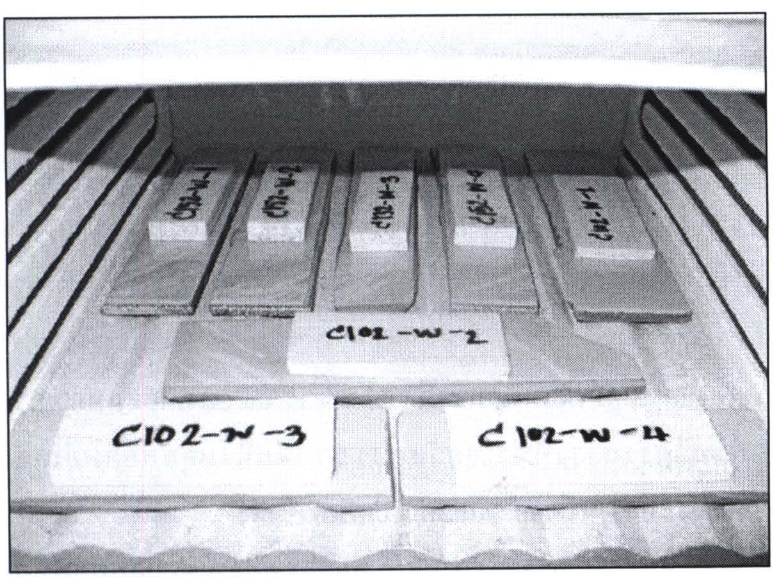
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ

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

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

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

รูปที่ 3.3 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกอบด้วยอุณหภูมิ 70°C



รูปที่ 3.4 ลักษณะตัวอย่างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิ 565°C

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP

คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่มีความสำคัญมากในการออกแบบโครงสร้าง กำลังของวัสดุซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่จะต้านทานต่อแรงกระทำต่าง ๆ โดยไม่เกิดการวิบัติ นอกจากนั้นโครงสร้างที่ถูกออกแบบต้องมีความแกร่งที่พอเพียงภายใต้แรงกระทำโดยที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนทำให้โครงสร้างเสียความสามารถในการปฏิบัติหน้าที่ตามจุดประสงค์ของโครงสร้างที่ได้ถูกออกแบบไว้ ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง การวิเคราะห์ทางทฤษฎี และผลที่ได้จากการทดสอบวัสดุมีความสำคัญที่เท่าเทียมกัน โดยที่ทฤษฎีจะถูกนำมาใช้ในการหาสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางกลขององค์อาคาร แต่สมการเหล่านั้นจะไม่สามารถนำมาใช้ออกแบบได้ถ้าไม่ทราบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ ซึ่งจะได้มาจากการทดสอบวัสดุเท่านั้น ดังนั้นการทดสอบนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกลต่าง ๆ ของวัสดุ PFRP จากนั้นนำค่าที่ทดสอบได้เปรียบเทียบกับวัสดุ PFRP ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตในต่างประเทศ และนำค่าคุณสมบัติทางกลที่ทดสอบได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการรับแรงดัดของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการทางทฤษฎีต่อไป ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบถูกตัดออกจากชิ้นส่วนใหญ่ (full scale) การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP ประกอบด้วย 5 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย การทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย และการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.1 การทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

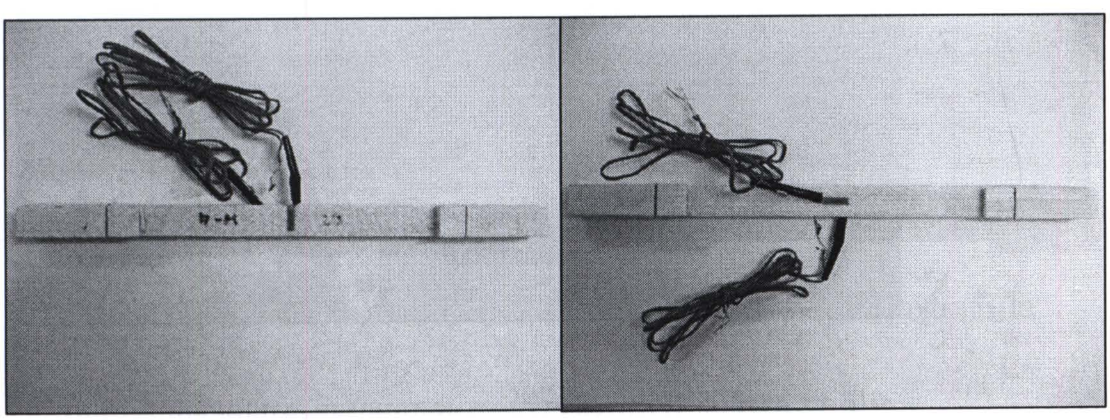
กำลังรับแรงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile strength) และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกน (longitudinal tensile modulus) เป็นคุณสมบัติที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP (Shah, 2007) วัตถุประสงค์ของการทดสอบนี้เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง

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

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

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

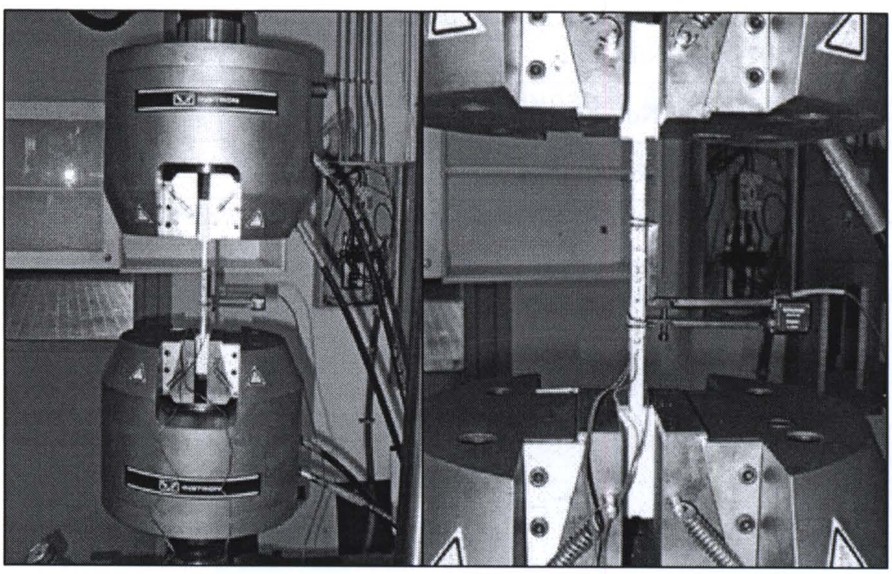
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-TL-W-No.	เอว	10
C76-TL-F-No.	ปีก	10
C102-TL-W-No.	เอว	10
C102-TL-F-No.	ปีก	10
C152-TL-W-No.	เอว	10
C152-TL-F-No.	ปีก	10



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

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

ในการทดสอบค่าความเครียดเชิงดึงถูกบันทึกโดย Extensometer และมาตรวัดความเครียดเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ โดย Extensometer ถูกติดตั้งบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางความยาวของตัวอย่างทดสอบ โดยมาตรวัดความเครียดยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujoรุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ถูกติดตั้งแบบ back-to-back บริเวณกึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับ (crosshead) ด้วยอัตราคงที่ (constant rate) เท่ากับ 2 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ (ASTM D3039, 2006) รูปที่ 3.6 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยการบันทึกข้อมูลในการทดสอบใช้Data Acquisition System (DAQ) ยี่ห้อ YOKOGAWA-DA100 บันทึกค่าหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติอย่างสมบูรณ์



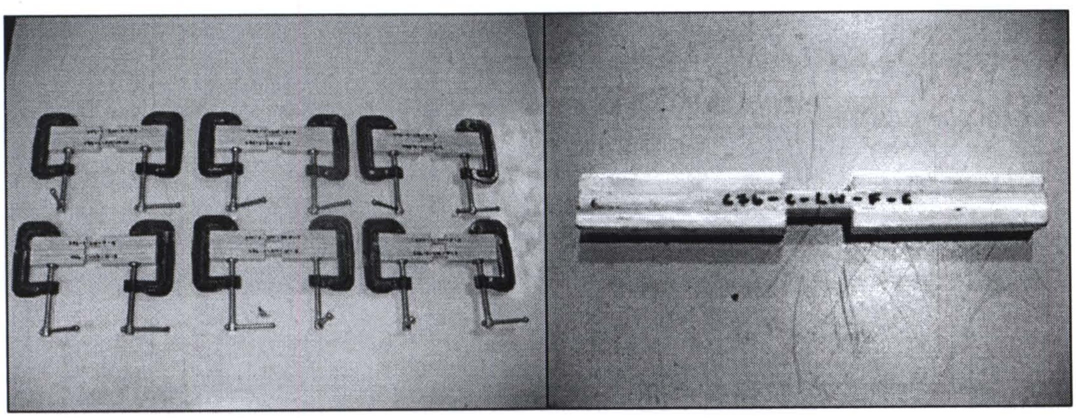
รูปที่ 3.6 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.2 การทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย(longitudinal compression test) ปัญหาหลักที่พบระหว่างการทดสอบ คือ ภายใต้แรงกระทำตัวอย่างมักเกิดการโก่งเดาะ(buckling) ตามทิศทางของเส้นใย (fiber direction) หรืออาจเกิดการวิบัติก่อนเวลาอันควร (premature failure) โดยมีลักษณะการวิบัติแบบ Localized brooming บริเวณส่วนปลายของตัวอย่างทดสอบ (Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006) ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว มาตรฐาน ASTM D3410-03 “Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Composite

Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading” จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด(ultimate compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRPโดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกน (longitudinal compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัด

ตัวอย่างทดสอบถูกตัดออกตามแนวแกนของเส้นใยจากชิ้นส่วนปีกและชิ้นส่วนเอวของวัสดุ PFRP รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.3



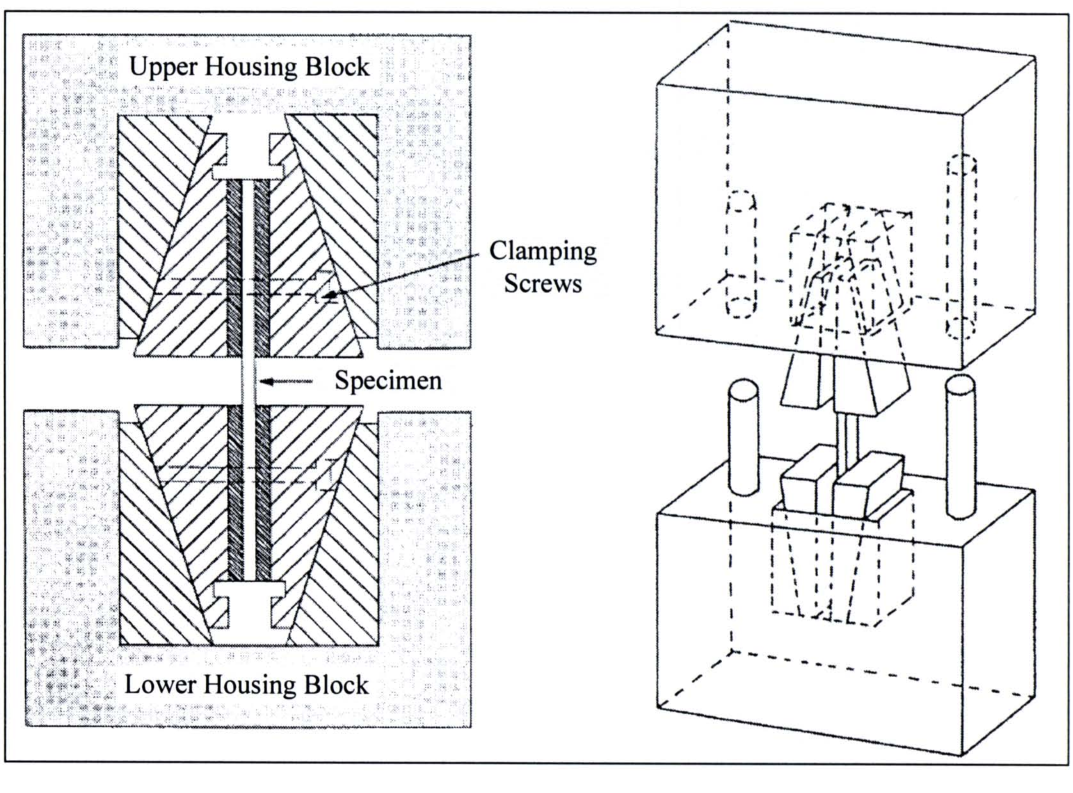
รูปที่ 3.7 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

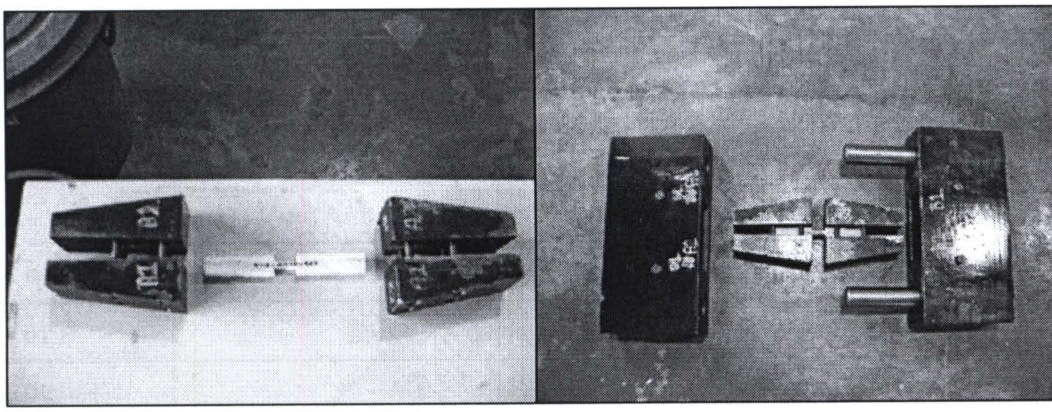
Whitney, Daniel, and Pipes (1981) กล่าวว่าการติดตั้งและการจัดวางตำแหน่ง (alignment) ตัวอย่างทดสอบในแนวดิ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการรับแรงอัดของวัสดุ ที่ผ่านมาได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ Test fixture สำหรับใช้ในการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เพื่อลดการเยื้องศูนย์ในขั้นตอนการติดตั้ง ตลอดจนช่วยป้องกันการโก่งเดาะตามแนวแกนของตัวอย่างทดสอบ โดยอุปกรณ์ Test fixture ที่นิยมใช้การทดสอบมากที่สุด คือ IITRI Test fixture ซึ่งถูกพัฒนาโดย Illinois Institute of Technology Research Institute (IITRI) (Hofer and Rao, 1977) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 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 3.10 แสดงการติดตั้งตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

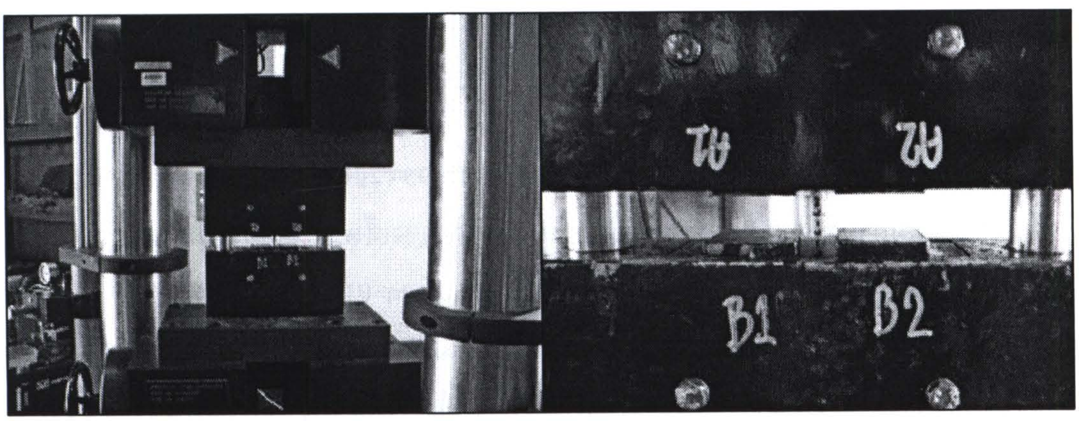


รูปที่ 3.8 รายละเอียดของ Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

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



รูปที่ 3.9 Test fixture สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.10 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.3 การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

การทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย (transverse compression test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ultimate compressive strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวาง (transverse compressive modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

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

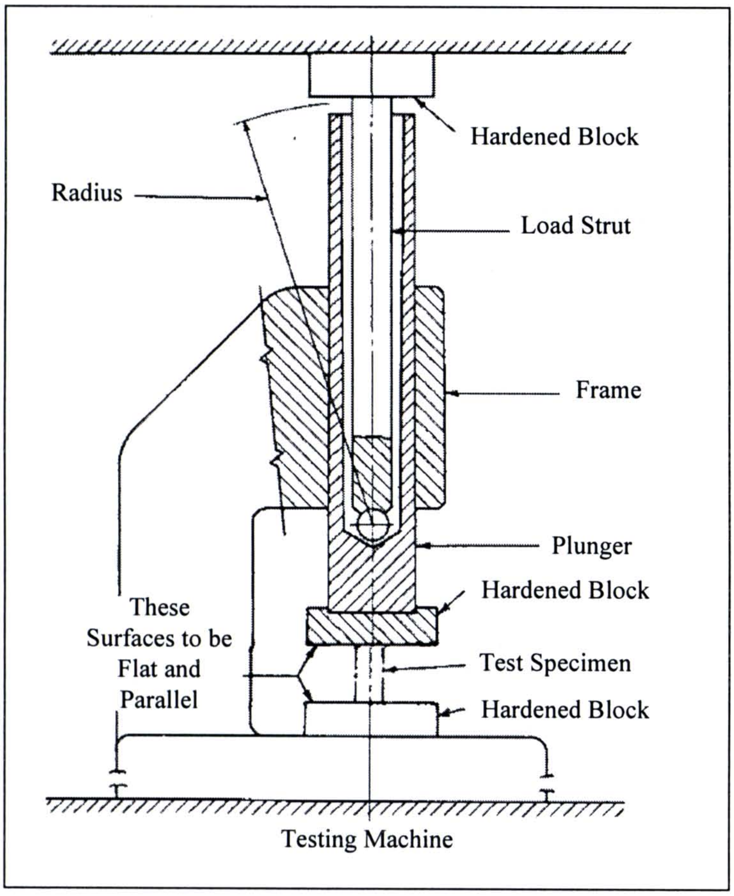
จะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใยได้ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

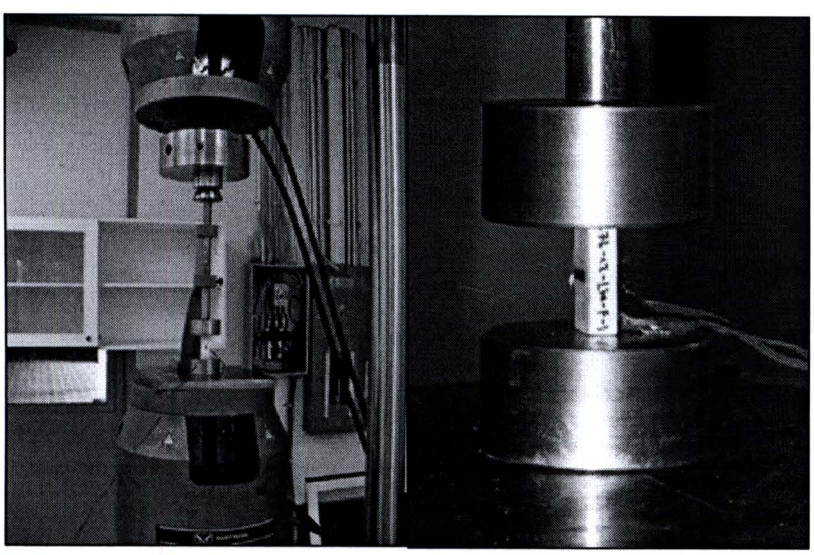
ชื่อตัวอย่างทดสอบ	บริเวณที่ตัดชิ้นตัวอย่าง	จำนวนตัวอย่าง
C76-CT-W-No.	เอว	10
C76-CT-F-No.	ปีก	10
C102-CT-W-No.	เอว	10
C102-CT-F-No.	ปีก	10
C152-CT-W-No.	เอว	10
C152-CT-F-No.	ปีก	10

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

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



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย (ASTM D695, 2002)

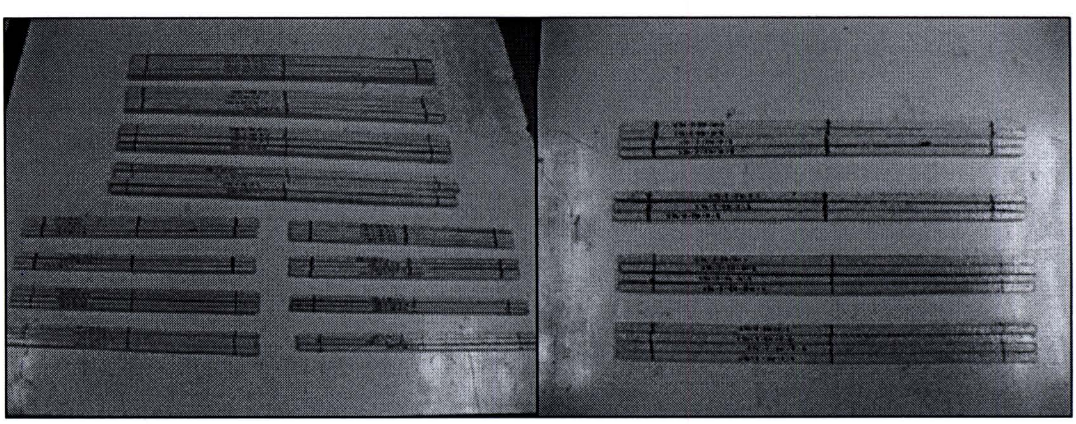


รูปที่ 3.12 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

3.2.2.4 การทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

สำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย (longitudinal flexural test) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงดัดสูงสุด (ultimate flexural strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP โดยที่โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกน (longitudinal flexural modulus) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

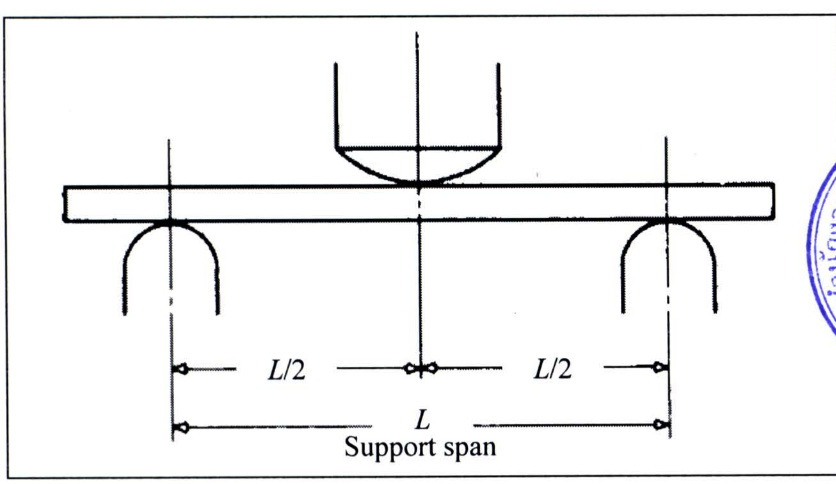


รูปที่ 3.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

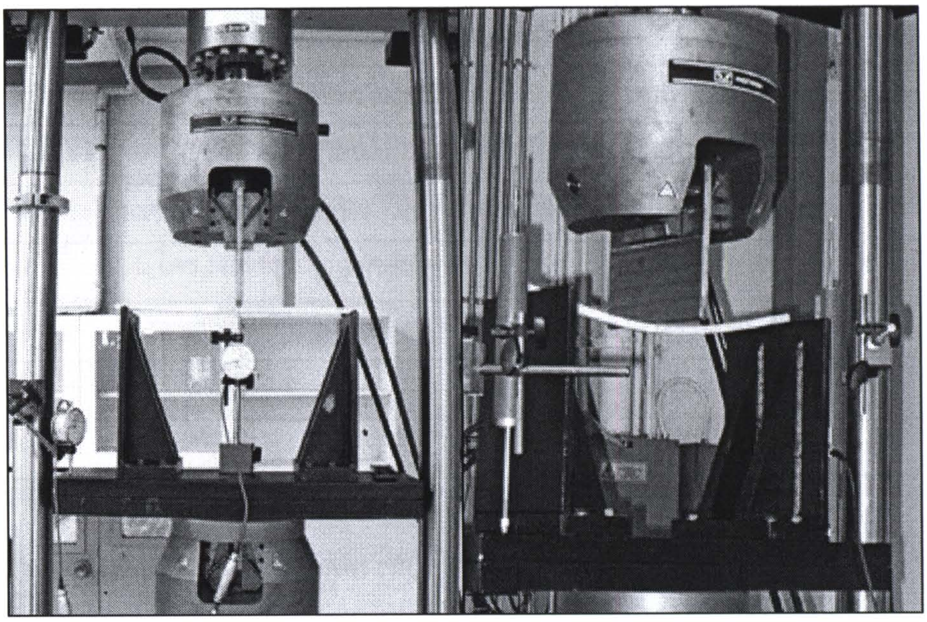
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

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

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



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

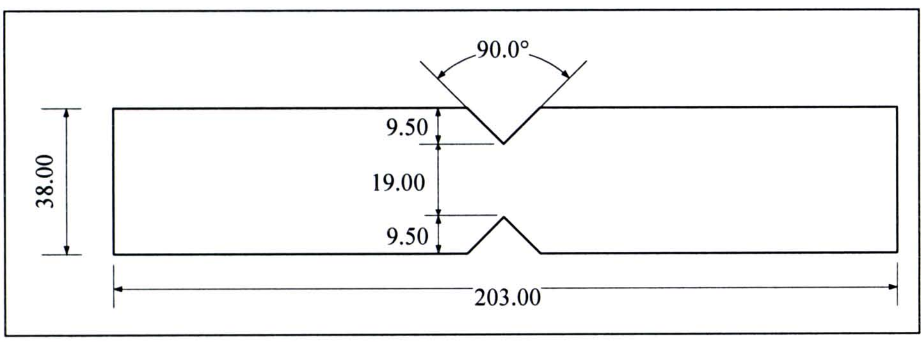


รูปที่ 3.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย

3.2.2.5 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 ได้นำรูปแบบของการทดสอบดังกล่าวตีพิมพ์เผยแพร่และออกเป็นมาตรฐาน ASTM D5379 (2005)

การทดสอบแรงเฉือนแบบ V-notch มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสามารถในการรับแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย ได้แก่ กำลังรับแรงเฉือนสูงสุด (ultimate shear strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือน (shear modulus) และลักษณะการวิบัติของชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP 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 PFRP และบริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบทำการตัดแต่ละด้านของขอบโดยทำมุม 90° ดังแสดงรายละเอียดของตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.16 จำนวนตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ตัวอย่างจะถูกทดสอบจนถึงจุดวิบัติ รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยได้ถูกแสดงดังตารางที่ 3.6 สำหรับการหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของตัวอย่างทดสอบ ได้ทำการติดมาตรวัดความเครียดยี่ห้อ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น BFLA-5-5 จำนวน 2 ตัว ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวอย่างบริเวณรอยบาก (notch) โดยทำมุมกับแนวแกนของเส้นใยเท่ากับ ± 45° (Hodgkinson, 2000)



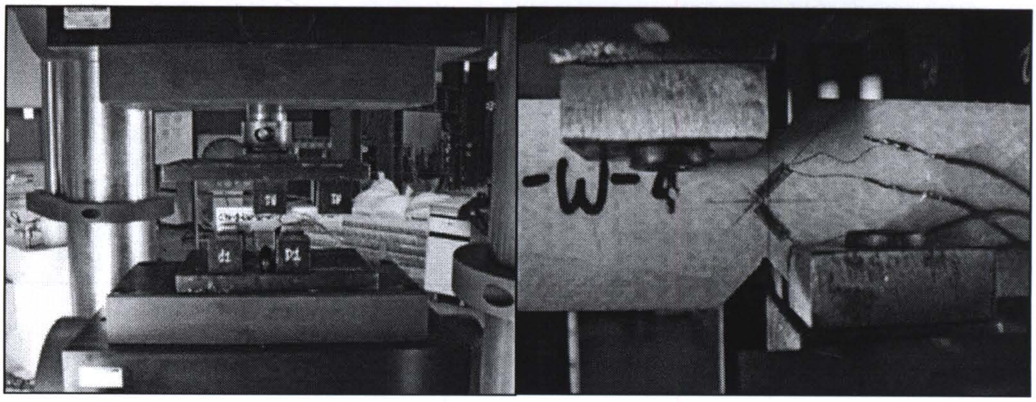
รูปที่ 3.16 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย (ASTM D5379, 2005)

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

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

สำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 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) ลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบใช้การเคลื่อนที่ของหัวจับด้วยอัตราคงที่เท่ากับ 1.3 mm/min จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ รูปที่ 3.17 แสดงการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 3.17 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซี

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

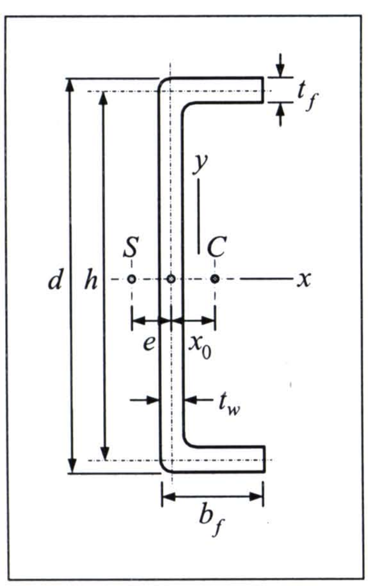
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาสมการออกแบบองค์อาคารภายใต้แรงดัดของ AISC/ASD (AISC 316-89) และ AISC/LRFD (AISC 350-99) พบว่าสำหรับหน้าตัดที่สมมาตรรอบแกนเดียว (monosymmetric section) เช่น หน้าตัดรูปตัวซี สมการของการโก่งเดาะด้านข้าง (lateral buckling) ภายใต้แรงดัดดังกล่าวได้ถูกพิสูจน์ (proof) จากสมมติฐานเบื้องต้นว่า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

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้แรงกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด ตามเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาเป็นหน้าตัดรูปตัวซีโดยมี 3 ขนาดหน้าตัด ได้แก่ $76\times22\times6$ $102\times29\times6$ และ $152\times43\times10$ mm โดยเป็นหน้าตัดมาตรฐานและนิยมใช้ในงานโครงสร้าง (Creative Pultrusions, 2004; Shan and Qiao, 2005) โดยงานวิจัยนี้ การออกแบบการทดลองได้ตรวจสอบลักษณะการวิบัติแบบโก่งเดาะเฉพาะที่โดยใช้สมการที่นำเสนอโดย Kollar (2002) และ Kollar (2003) ซึ่งผลการตรวจสอบที่ได้ระบุว่าขนาดมิติและความหนาของหน้าตัดรูปรางน้ำที่ใช้ในงานวิจัยไม่เกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ โดยโมเมนต์แบบโก่งเดาะเฉพาะที่จะมีค่าสูงกว่าโมเมนต์แบบโก่งเดาะโดยรวมประมาณ 3-4 เท่า

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

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



รูปที่ 3.18 ลักษณะหน้าตัดรูปตัวซีของคาน PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.7 รายละเอียดของหน้าตัดรูปตัวซีของคาน PFRP

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 PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่าย (simply supported) โดยเน้นศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) และผลของความยาวคานต่อน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load)

ตัวอย่างทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยเป็นคานพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (glass fiber-reinforced plastic: GFRP) ซึ่งผลิตโดยวิธี Pultrusion หรือเรียกอีกชื่อว่า Pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) ที่มีหน้าตัดรูปตัวซี ส่วนประกอบหลักของชิ้นส่วนวัสดุเสริมเส้นใยใช้เส้นใยแก้วชนิด E-glass 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 3.8 ถึงตารางที่ 3.10 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-S-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัวซีที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm S หมายถึงลักษณะของจุดรองรับแบบง่าย สุดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C76-S-2.0 หมายถึงคานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบง่าย ขนาด $76 \times 22 \times 6$ mm และยาว 2.0 m

ตารางที่ 3.8 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76\times22\times6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	$(d\times b\times t)$ (mm)	L (m)	L/d	I_y (mm^4)	J (mm^4)	C_w (mm^6)	Number
C76-S-1.0	$76\times22\times6$	1.0	13.2	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.2	$76\times22\times6$	1.2	15.8	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.5	$76\times22\times6$	1.5	19.7	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-1.7	$76\times22\times6$	1.7	22.4	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.0	$76\times22\times6$	2.0	26.3	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.2	$76\times22\times6$	2.2	28.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.5	$76\times22\times6$	2.5	32.9	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-2.7	$76\times22\times6$	2.7	35.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.0	$76\times22\times6$	3.0	39.5	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.2	$76\times22\times6$	3.2	42.1	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.5	$76\times22\times6$	3.5	46.1	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-3.7	$76\times22\times6$	3.7	48.7	21812	8208	2.660×10^7	2
C76-S-4.0	$76\times22\times6$	4.0	52.6	21812	8208	2.660×10^7	2

ตารางที่ 3.9 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102\times29\times6$ 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	$102\times29\times6$	1.0	9.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.2	$102\times29\times6$	1.2	11.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.5	$102\times29\times6$	1.5	14.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-1.7	$102\times29\times6$	1.7	16.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.0	$102\times29\times6$	2.0	19.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.2	$102\times29\times6$	2.2	21.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.5	$102\times29\times6$	2.5	24.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-2.7	$102\times29\times6$	2.7	26.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.0	$102\times29\times6$	3.0	29.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.2	$102\times29\times6$	3.2	31.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.5	$102\times29\times6$	3.5	34.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-3.7	$102\times29\times6$	3.7	36.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.0	$102\times29\times6$	4.0	39.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.2	$102\times29\times6$	4.2	41.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.5	$102\times29\times6$	4.5	44.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-4.7	$102\times29\times6$	4.7	46.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-S-5.0	$102\times29\times6$	5.0	49.0	53996	11088	1.161×10^8	2

ตารางที่ 3.10 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152\times43\times10$ 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	$152\times43\times10$	1.5	9.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-1.7	$152\times43\times10$	1.7	11.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.0	$152\times43\times10$	2.0	13.2	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.2	$152\times43\times10$	2.2	14.5	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.5	$152\times43\times10$	2.5	16.4	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-2.7	$152\times43\times10$	2.7	17.8	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.0	$152\times43\times10$	3.0	19.7	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.2	$152\times43\times10$	3.2	21.1	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.5	$152\times43\times10$	3.5	23.0	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-3.7	$152\times43\times10$	3.7	24.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.0	$152\times43\times10$	4.0	26.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.2	$152\times43\times10$	4.2	27.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.5	$152\times43\times10$	4.5	29.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-4.7	$152\times43\times10$	4.7	30.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-S-5.0	$152\times43\times10$	5.0	32.9	285281	76000	1.379×10^9	2

ขั้นตอนการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบและการทดสอบได้ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) ตัดตัวอย่างตามความยาวที่ออกแบบ โดยก่อนการทดสอบ บริเวณกึ่งกลางของตัวอย่างทดสอบถูกเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.19

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

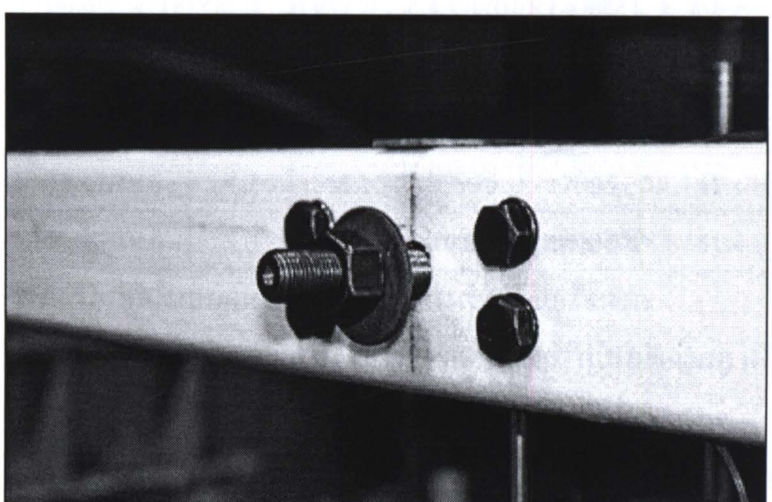
3) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย โดยออกแบบให้จุดรองรับดังกล่าวเป็นจุดรองรับแบบไร้แรงเสียดทาน (frictionless) ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test) รูปที่ 3.21 ถึงรูปที่ 3.22 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย

4) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

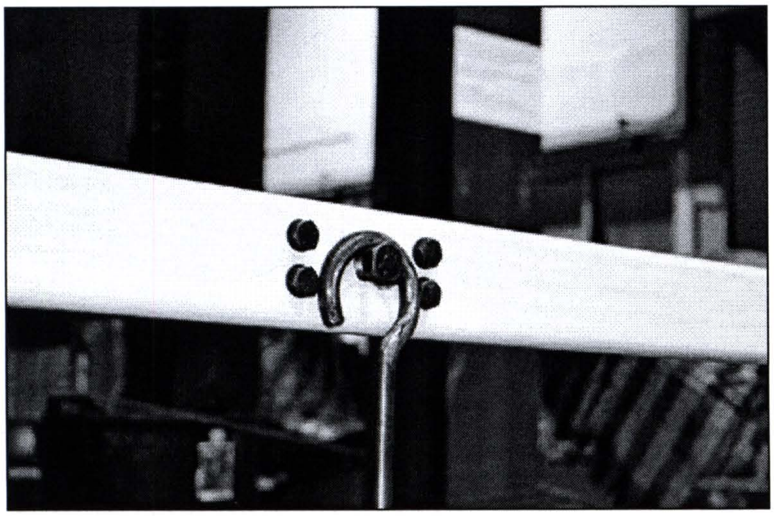
5) ระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง (vertical deflection) และระยะการแอ่นตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.23

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

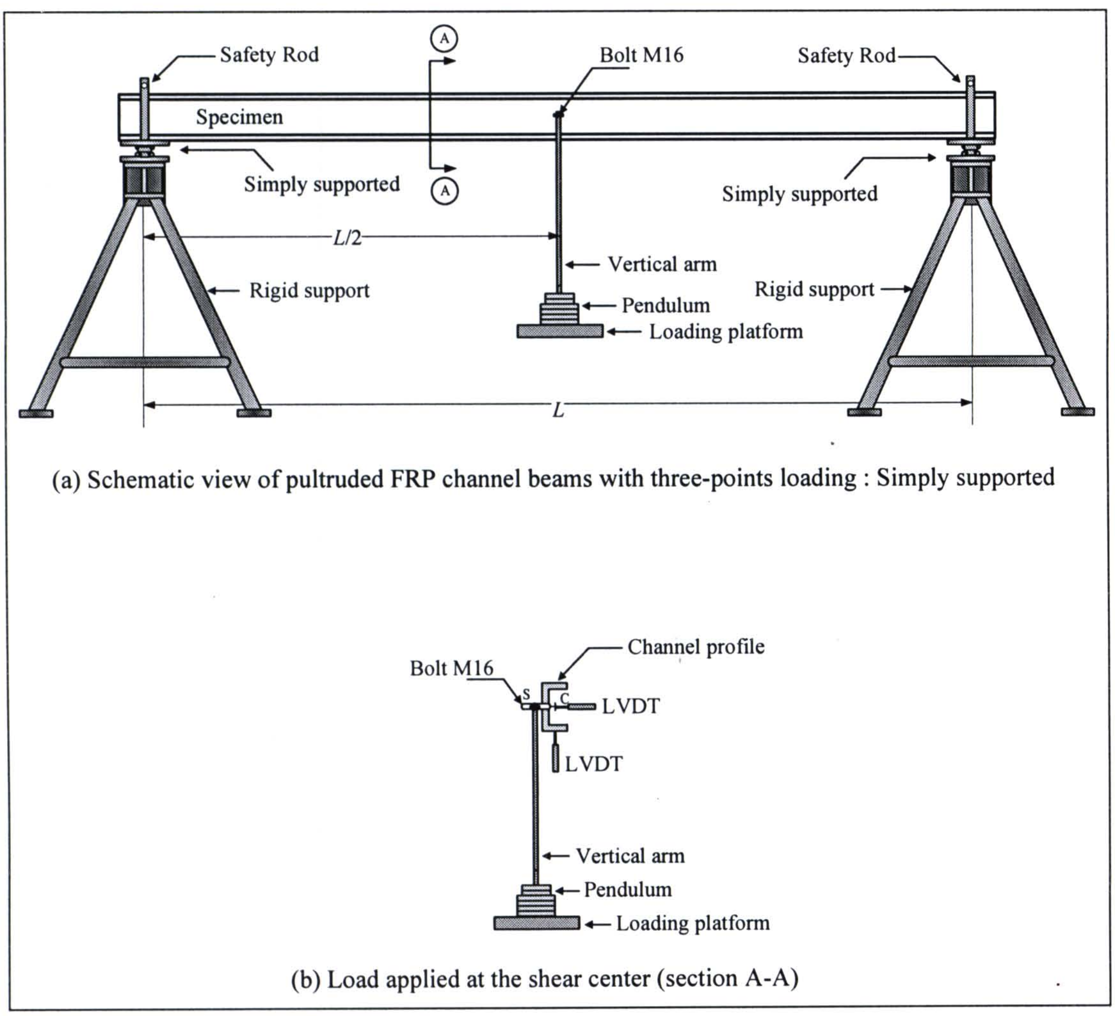
7) เริ่มต้นการทดสอบโดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกอย่างช้า ๆ โดยตุ้มน้ำหนัก (pendulum) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ตลอดการทดสอบ MW100 YOKOGAWA Data Acquisition Unit (DAQ) ถูกใช้ในการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จนตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ



รูปที่ 3.19 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจุดรองรับแบบง่าย



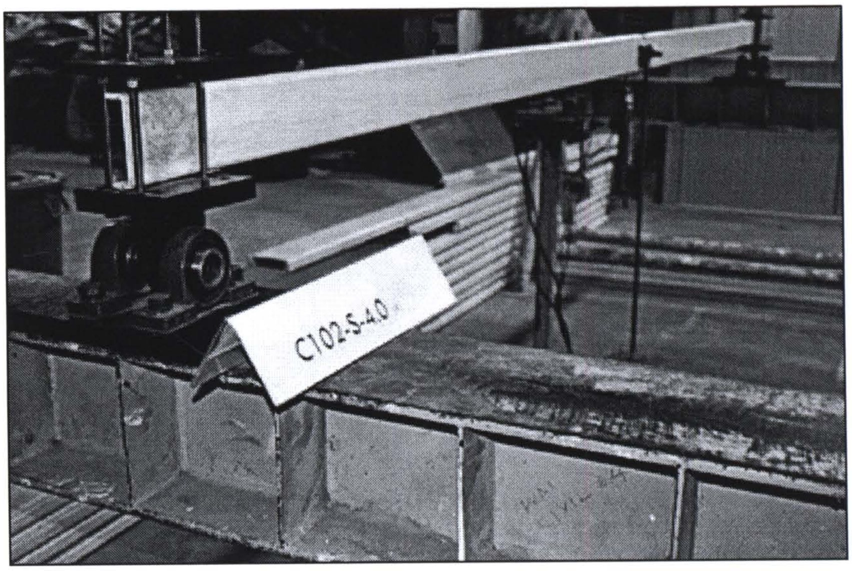
รูปที่ 3.20 การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบง่าย



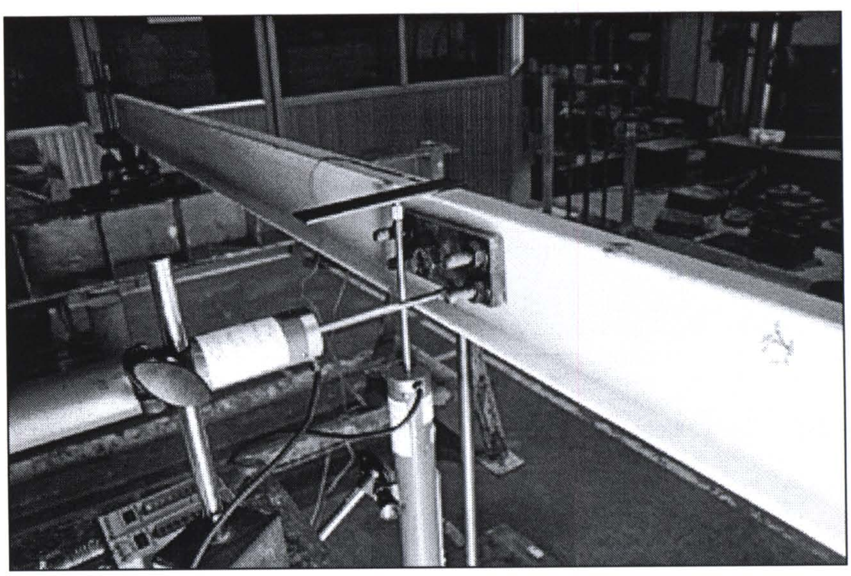
(a) Schematic view of pultruded FRP channel beams with three-points loading : Simply supported

(b) Load applied at the shear center (section A-A)

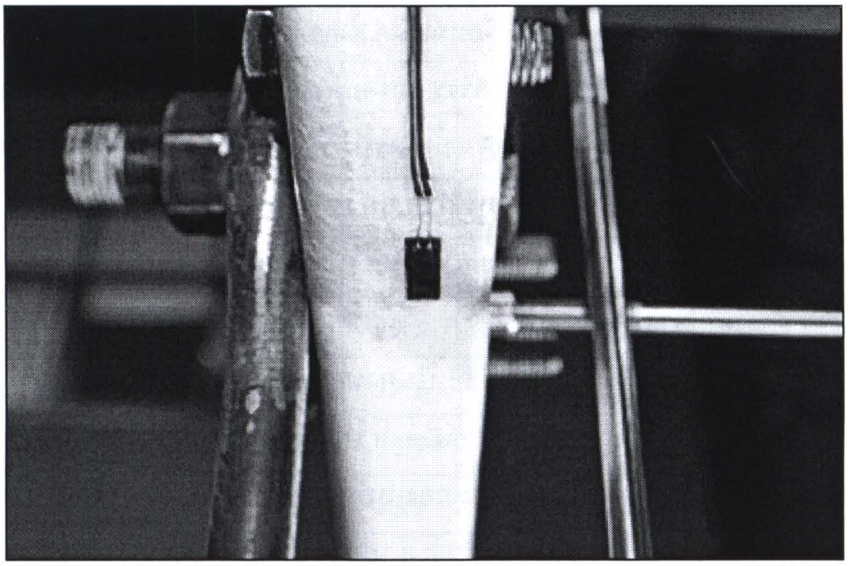
รูปที่ 3.21 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



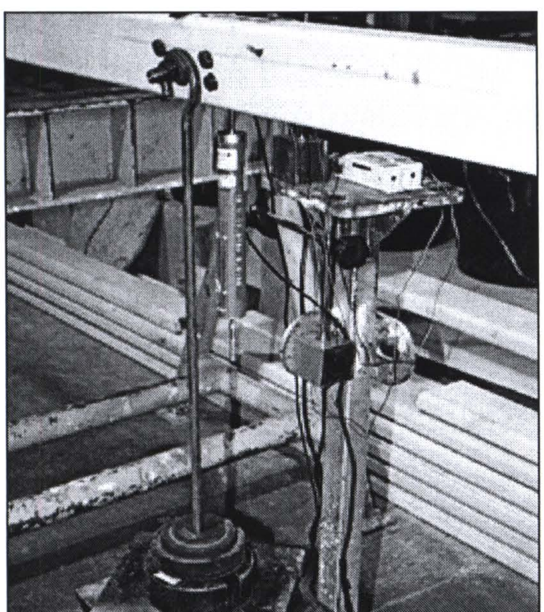
รูปที่ 3.22 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.23 การวัดระยะแอ่นตัวแนวดิ่งและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.24 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 3.25 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงดัดของคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

วัตถุประสงค์ของการทดสอบเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะ พฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะการวิบัติของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น (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) ที่มีหน้าตัดรูปตัวซี 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 โดยอัตราส่วนดังกล่าวครอบคลุมช่วงการใช้งานและการออกแบบคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 3.11 ถึงตารางที่ 3.13 แสดงรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบและสมบัติของหน้าตัด โดยแบ่งตามขนาดหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนทั้งสิ้น 82 ตัวอย่าง โดยที่สัญลักษณ์ของชื่อตัวอย่างทดสอบ CXXX-F-ZZ ถูกตั้งขึ้นโดยใช้หลักการดังต่อไปนี้ CXXX หมายถึงตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัวซีที่มีความลึก 3 ขนาด ได้แก่ 76 102 และ 152 mm F หมายถึงลักษณะของจุดรองรับแบบยึดแน่น สุดท้าย ZZ หมายถึงความยาวของตัวอย่างทดสอบมีหน่วยเป็น m ตัวอย่างเช่น C152-F-4.0 หมายถึง คานที่ทำจากวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น ขนาด $152 \times 43 \times 10$ mm และยาว 4.0 m

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

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

ตารางที่ 3.12 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102\times29\times6$ 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	$102\times29\times6$	1.0	9.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-1.2	$102\times29\times6$	1.2	11.8	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-1.5	$102\times29\times6$	1.5	14.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-1.7	$102\times29\times6$	1.7	16.7	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-2.0	$102\times29\times6$	2.0	19.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-2.2	$102\times29\times6$	2.2	21.6	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-2.5	$102\times29\times6$	2.5	24.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-2.7	$102\times29\times6$	2.7	26.5	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-3.0	$102\times29\times6$	3.0	29.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-3.2	$102\times29\times6$	3.2	31.4	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-3.5	$102\times29\times6$	3.5	34.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-3.7	$102\times29\times6$	3.7	36.3	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-4.0	$102\times29\times6$	4.0	39.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-4.2	$102\times29\times6$	4.2	41.2	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-4.5	$102\times29\times6$	4.5	44.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-4.7	$102\times29\times6$	4.7	46.1	53996	11088	1.161×10^8	2
C102-F-5.0	$102\times29\times6$	5.0	49.0	53996	11088	1.161×10^8	2

ตารางที่ 3.13 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152\times43\times10$ 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	$152\times43\times10$	2.5	16.4	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-2.7	$152\times43\times10$	2.7	17.8	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-3.0	$152\times43\times10$	3.0	19.7	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-3.2	$152\times43\times10$	3.2	21.1	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-3.5	$152\times43\times10$	3.5	23.0	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-3.7	$152\times43\times10$	3.7	24.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-4.0	$152\times43\times10$	4.0	26.3	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-4.2	$152\times43\times10$	4.2	27.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-4.5	$152\times43\times10$	4.5	29.6	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-4.7	$152\times43\times10$	4.7	30.9	285281	76000	1.379×10^9	2
C152-F-5.0	$152\times43\times10$	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 PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.26 ดังนั้นแรงกระทำเป็นจุดในแนวดิ่ง (concentrated vertical load) สามารถกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือนของหน้าตัด และตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (three-points loading test)

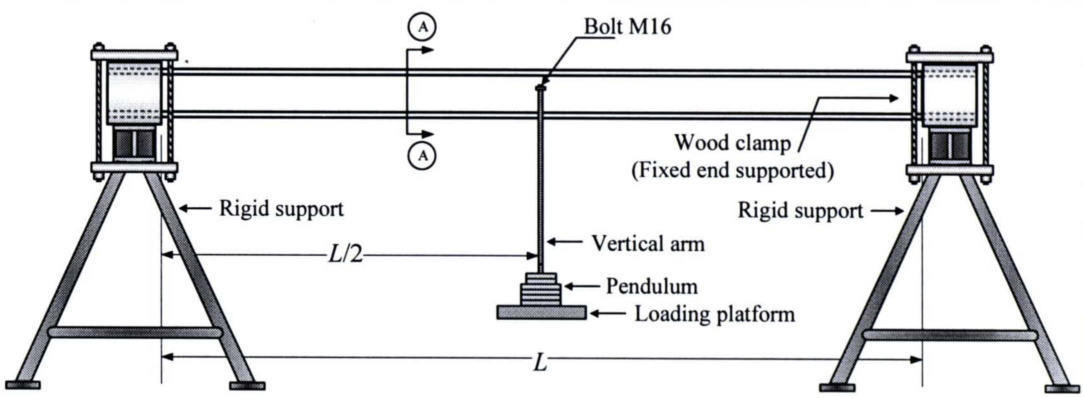
2) ติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับ โดยปลายทั้งสองด้านของตัวอย่างถูกทำให้ยึดแน่นโดยกล่องไม้เนื้อแข็งสำหรับจับตัวอย่างทดสอบ จากนั้นทำการยึดจุดรองรับดังกล่าวโดยใช้แผ่นเหล็ก 2 แผ่นบีบรัดด้านบนและด้านล่างของกล่องไม้ รูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28 แสดงแผนภาพและตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบยึดแน่น

3) เมื่อติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้าที่แล้ว ตัวอย่างทดสอบถูกตรวจสอบความตรงในแนวราบโดยใช้ระดับน้ำ

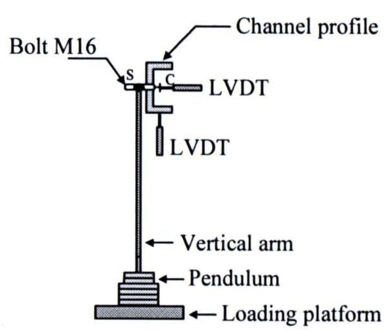
4) ระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง (vertical deflection) และระยะการแอ่นตัวด้านข้าง (lateral deflection) ของคานถูกวัดโดย Linear Variable Differential Transducer (LVDT) จำนวน 2 ตัว ติดตั้งบริเวณปีกด้านบนและกึ่งกลางความลึก ($d/2$) ของหน้าตัด ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.29

5) ติดตั้งมาตรวัดความเครียด (strain gauge) จำนวน 2 ตัว บริเวณส่วนปีกบนและปีกล่างของตัวอย่างหน้าตัดรูปตัวซีเพื่อตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างภายใต้แรงดัด

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

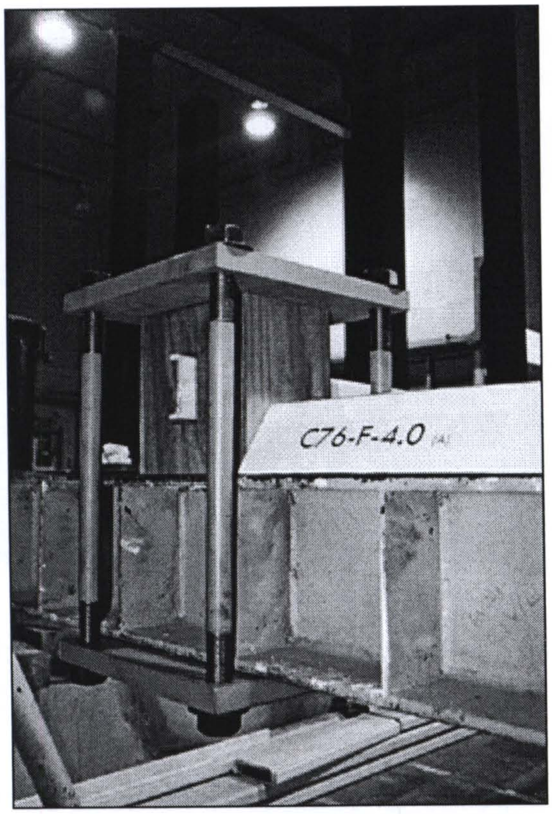


(a) Schematic view of pultruded FRP channel beams with three-points loading : Fixed end supported

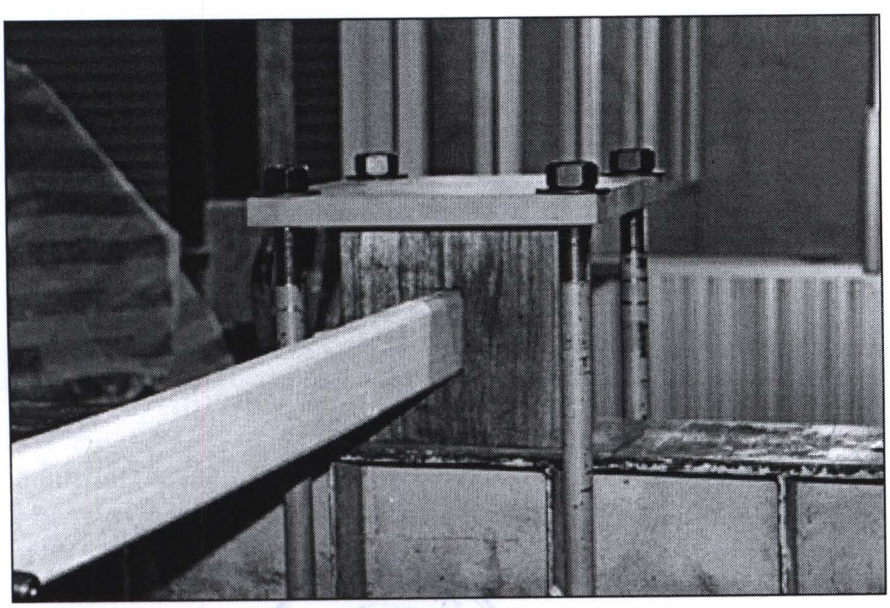


(b) Load applied at the shear center (section A-A)

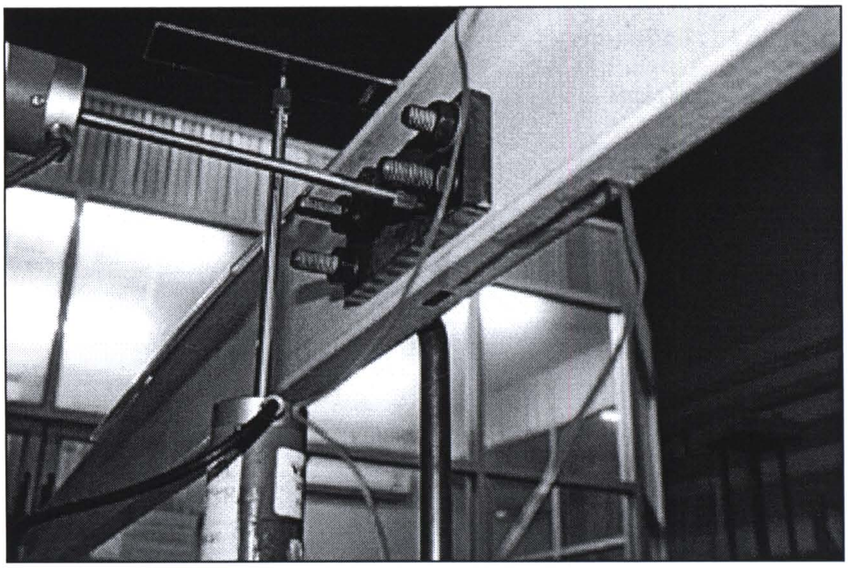
รูปที่ 3.26 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



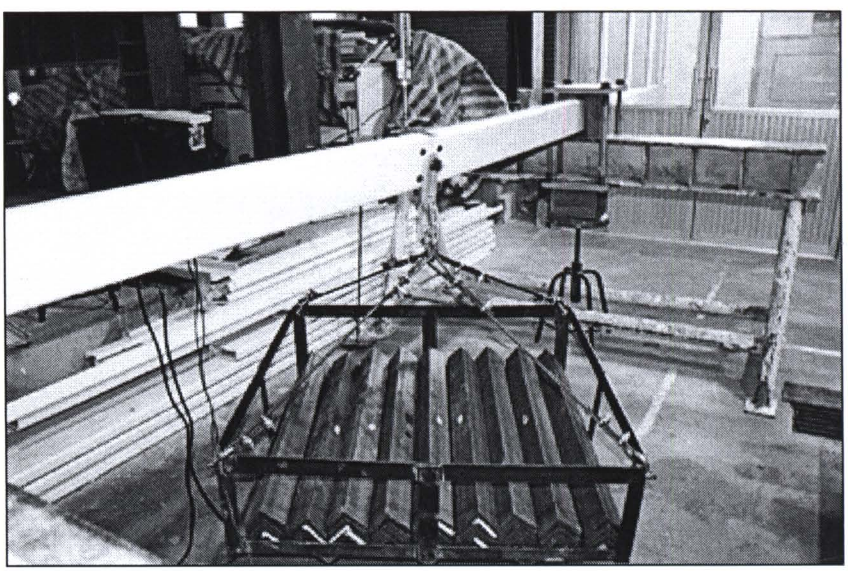
รูปที่ 3.27 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.28 จุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.29 การวัดระยะแอ่นตัวแนวดิ่งและด้านข้างและการติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 3.30 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

3.4 การวิเคราะห์กำลังรับแรงดัดของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการออกแบบ

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

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

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

โดยที่	L	คือ	ความยาวคาน
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ
	G	คือ	โมดูลัสแรงเฉือนของเหล็กรูปพรรณ
	I_y	คือ	โมเมนต์อินเนอร์เชียของหน้าตัดรอบแกนรอง
	J	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดของหน้าตัด
	C_w	คือ	ค่าคงที่เนื่องจากการบิดเบี้ยวของหน้าตัด
	C_b	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่โมเมนต์ภายในมีค่าไม่สม่ำเสมอ หาได้จากสมการที่ (3.3)

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

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

โดยที่ $M_{\max}$ คือ โมเมนต์สูงสุดในช่วงความยาวคาน

M_A คือ โมเมนต์ที่จุด 1/4 ของความยาวคาน

M_B คือ โมเมนต์ที่จุดกึ่งกลางของความยาวคาน

M_C คือ โมเมนต์ที่จุด 3/4 ของความยาวคาน

ดังนั้น จากผลการคำนวณตามสมการที่ (3.3) พบว่ากรณีจุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น C_b เท่ากับ 1.32 และ 1.92 ตามลำดับ

โดยปกติวัสดุ PFRP จะถูกพิจารณาเป็นวัสดุที่มีลักษณะแบบ Orthotropic material ซึ่งคุณสมบัติทางกลขึ้นกับทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย ดังนั้นคุณสมบัติทางกลในสมการที่ (3.2) (E,G) สามารถถูกแทนที่ด้วยค่า E_L และ G_{LT} ดังนั้น สมการออกแบบสำหรับการหาค่าโมเมนต์โก่งเดาะของวัสดุ PFRP ที่วิบัติโดยการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด $(M_{cr,\mathrm{LRFD}})$ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

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

โดยที่ E_L คือ โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกน (longitudinal modulus)

G_{LT} คือ โมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบ (in-plane shear modulus)

นอกจากนี้ เนื่องจากความหนาของปีกและความหนาของเอวมีขนาดเท่ากัน ดังนั้น โมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวจึงสามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม หากหน้าตัดดังกล่าวมีความหนาปีกและความหนาเอวไม่เท่ากัน ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นตามแนวแกนและโมดูลัสแรงเฉือนในแนวระนาบของส่วนปีกและเอวอาจมีค่าแตกต่างกัน