



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

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

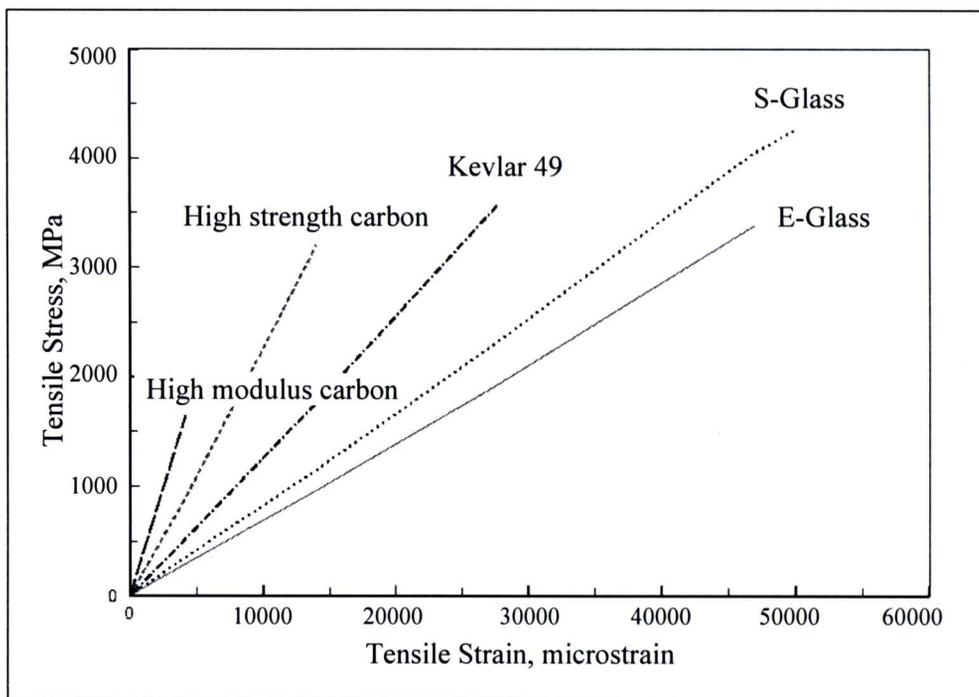
ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะโดยทั่วไปของวัสดุ PFRP ส่วนประกอบของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิตวัสดุโดยวิธี Pultrusion โดยมีจุดประสงค์หลัก เพื่อทำความเข้าใจและเข้าใจพฤติกรรมโดยรวมของวัสดุชนิดนี้ นอกจากนี้จะกล่าวถึง การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างหลัก รูปพรรณและวัสดุ PFRP ภายใต้แรงดัดรวมทั้งบททวนงานวิจัยที่ผ่านมาและมีส่วนคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ศึกษา ตลอดจนการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของวัสดุ PFRP หน้าตัดรูปตัวซีโดยสมการคำนวณทางทฤษฎี

2.2 วัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของวัสดุ PFRP

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

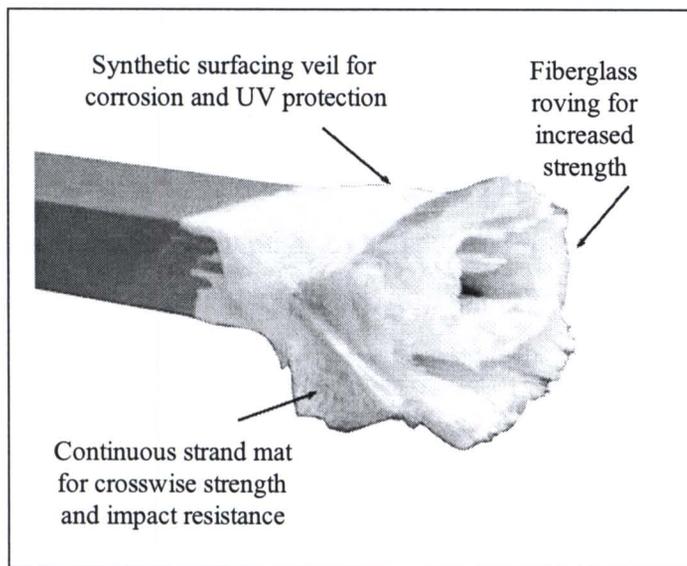
เส้นใยอาราไมด์ (aramid fiber) หรือเคฟลาร์ (Kevlar) และเส้นใยโบรอน (boron fiber) เป็นต้น (Agarwal, Broutman, and Chandrashekhara, 2006) รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ ภายใต้งแรงดึง จากรูปเห็นได้ว่า เส้นใยมีกำลังรับแรงดึงที่สูงมาก (มากกว่า 1,500 MPa)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



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ

(Daniel and Isahi, 1994)

ในกระบวนการผลิต เส้นใยแก้วจะถูกผสมผสานเข้ากับวัสดุเชื่อมประสานจำพวกเรซิน (resin) เช่น Thermosetting plastics ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ (polyesters) ไวนิลเอสเตอร์ (vinylesters) อีพ็อกซี (epoxy) โพลียูรีเทน (polyurethane) และฟีนอลิก (phenolic) เป็นต้น ส่วนเรซินอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจคือ 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 PFRP จะแตกต่างไปจากเหล็กโครงสร้าง และอลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุ PFRP เป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (inhomogeneous) และวัสดุแบบอโธโทรปิก (orthotropic) (Creative Pultrusion, 2004) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุ PFRP เป็นแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีพฤติกรรมการวิบัติใกล้เคียงกับวัสดุเปราะ (Harte and Fleck, 2000) อย่างไรก็ตาม Kollar and Springer (2003) กล่าวว่าเมื่อพิจารณาขนาดหน้าตัดของวัสดุ PFRP เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (fiber diameter) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก จะสามารถพิจารณาวัสดุประกอบนี้เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) โดยสมมติฐานดังกล่าวถูกนำมาเป็นพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์วัสดุ PFRP แบบกลศาสตร์มหภาค (macro-mechanics)

2.2.2 วัสดุดิบและส่วนประกอบของวัสดุ PFRP

ในหัวข้อนี้กล่าวถึง คุณสมบัติและลักษณะเฉพาะของวัสดุดิบที่นำมาผลิตชิ้นส่วนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุ PFRP ในงานวิศวกรรมโยธา วัสดุดิบที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุ PFRP ได้แก่ เส้นใยแก้วและเรซิน วัสดุดิบทั้งสองชนิดมีหลายประเภท สามารถเลือกและออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน รูปแบบของโครงสร้าง และน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งาน

2.2.2.1 เส้นใยแก้ว

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

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

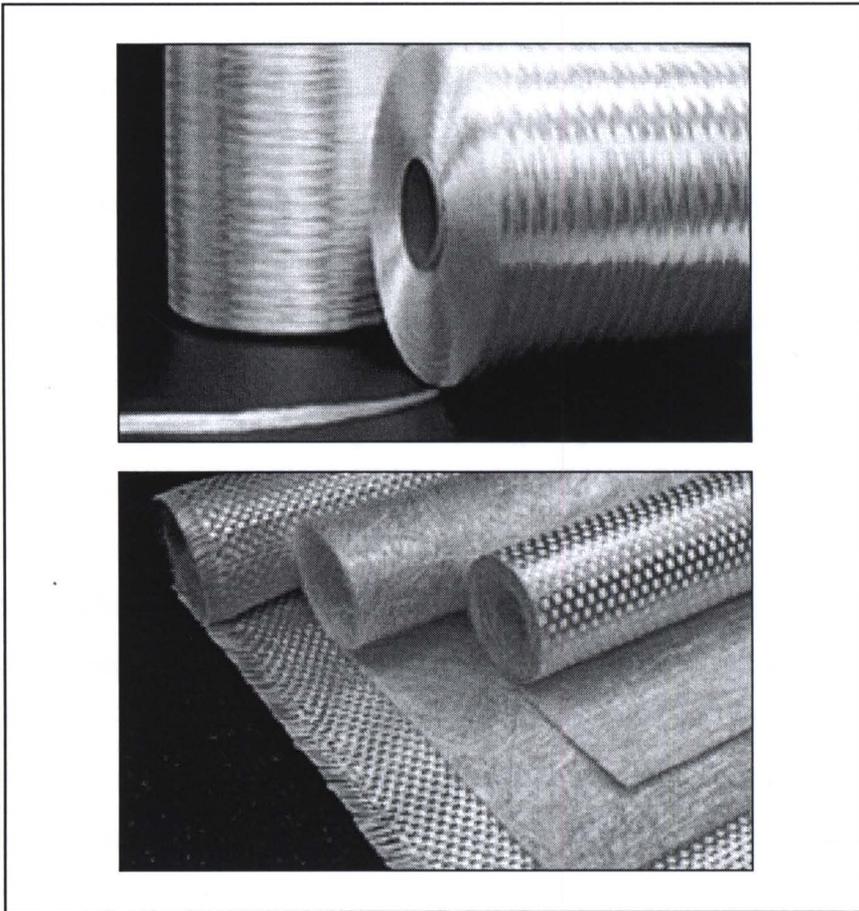
- 1) E-glass (electrical glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (electrical insulation) เนื่องจากมีอัตราค่าไดอิเล็กตริกหรือเรียกอีกชื่อว่า Borosilicate glass
- 2) S-glass (high-strength glass) คือ เส้นใยแก้วที่มีกำลังและโมดูลัสสูง
- 3) C-glass (corrosion glass) คือ เส้นใยแก้วที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี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

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

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ (Bank, 2006)

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

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



รูปที่ 2.3 เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ CFRP (Owens Corning, 2008)

การเลือกชนิด รูปแบบ ลักษณะ และปริมาณของใยแก้วที่นำมาใช้งาน เป็นสิ่งสำคัญและมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของวัสดุ CFRP (Seangatith, 1997) ได้แก่

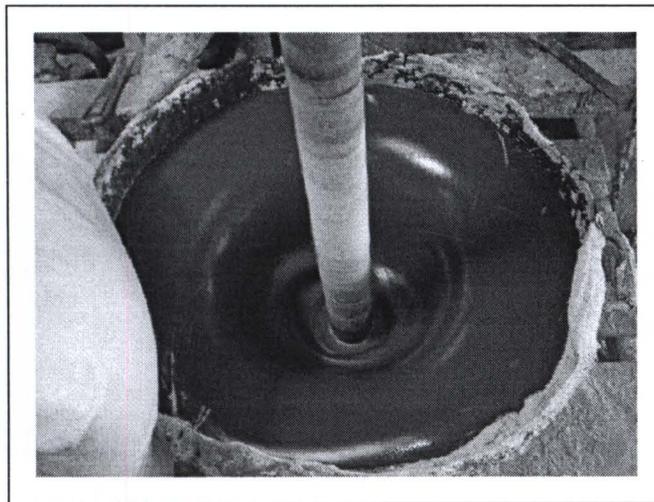
- 1) กำลังรับแรงดึง (tensile strength) และ โมดูลัสแรงดึง (tensile modulus)
- 2) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) และ โมดูลัสแรงอัด (compressive modulus)
- 3) กำลังต้านทานการล้า (fatigue) และการคืบ (creep)
- 4) กำลังรับแรงกระแทก (impact strength) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (energy absorption)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

2.2.2.2 เรซิน

เรซินเป็นวัสดุโพลีเมอร์พลาสติกชนิดหนึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสาน (binder) ส่งถ่ายแรงระหว่างเส้นใย ป้องกันเส้นใยจากการกัดกร่อนทางเคมีและรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV radiation) ดังนั้น เรซินต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและความร้อนที่เข้ากันได้กับเส้นใยแก้ว รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างเรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ CFRP โดยทั่วไป เรซินที่นิยมใช้ในการผลิตวัสดุ CFRP 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 CFRP ได้แก่ โพลีโพรพิลีน โพลีไวนิลคลอไรด์ โพลีสไตรีน และโพลีเอทิลีน เป็นต้น

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



รูปที่ 2.4 เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ CFRP

ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างคุณสมบัติโดยทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์

(Daniel and Isahi, 1994)

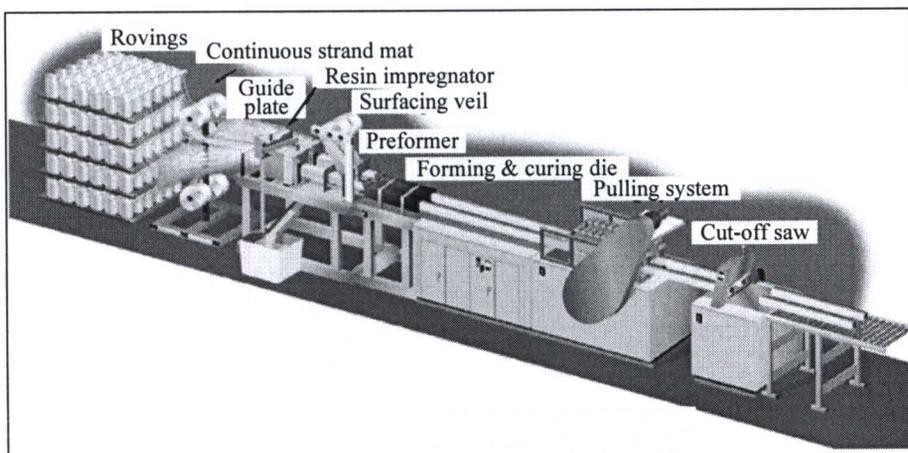
คุณสมบัติ	โพลีเอสเตอร์ (Polyesters)	ไวนิลเอสเตอร์ (Vinylesters)
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1130	1120
กำลังรับแรงดึง (MPa)	77.28	81.42
โมดูลัสแรงดึง (GPa)	3.24	3.38
กำลังรับแรงดัด (MPa)	122.82	133.86
โมดูลัสแรงดัด (GPa)	3.18	3.10
โมดูลัสแรงเฉือน (GPa)	1.17	1.28
อัตราส่วนปิวของ	0.35	0.33
เปอร์เซ็นต์การยึดตัว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

2.2.3 กระบวนการผลิตวัสดุ CFRP

วิธีการผลิตพลาสติกเสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) ที่ได้รับความนิยม คือ วิธี Pultrusion เนื่องจากการผลิตโดยวิธีนี้ได้ชิ้นส่วนของพลาสติกเสริมเส้นใยแก้วที่มีหน้าตัดคงที่สม่ำเสมอตรง ยาว และต่อเนื่อง ในลักษณะเช่นเดียวกับเหล็กโครงสร้าง (Bakis et al., 2002) รูปที่ 2.5 แสดงขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion

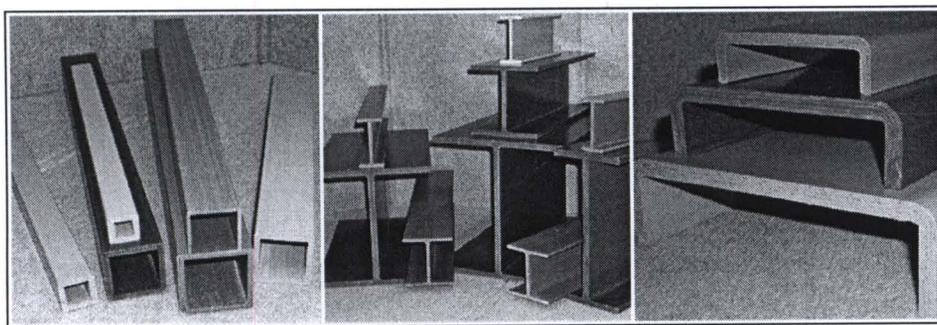
ขั้นตอนการผลิตโดยวิธี Pultrusion เริ่มจาก การดึงเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น (continuous strand rovings) ผ่านรางบังคับทิศทาง (guide plate) ลงสู่อ่างอาบเรซิน (resin impregnator) เพื่อให้เส้นใยแก้วอิมต้วด้วยเรซิน (wet-out) บางครั้งอาจมีการเสริมแผ่นเส้นใยแก้วแบบต่อเนื่องแบบสาน (continuous strand mat) ในขั้นตอนการผลิตไปพร้อมกับเส้นใยแก้วต่อเนื่องแบบเส้น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

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



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion (Strongwell, 2002)

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

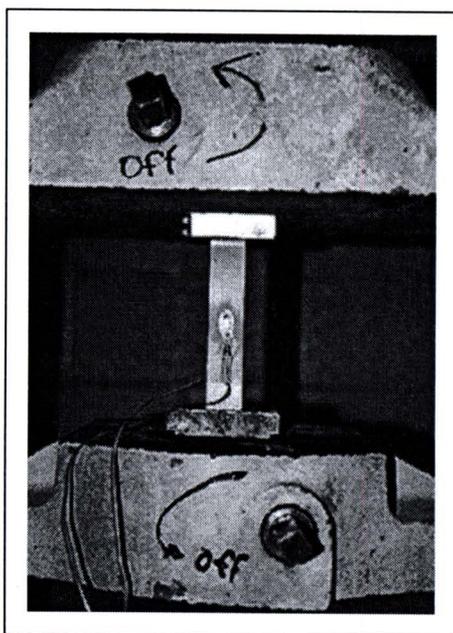


รูปที่ 2.6 หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion (Bedford, 2005)

2.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานและพฤติกรรมทางกลของวัสดุ CFRP

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

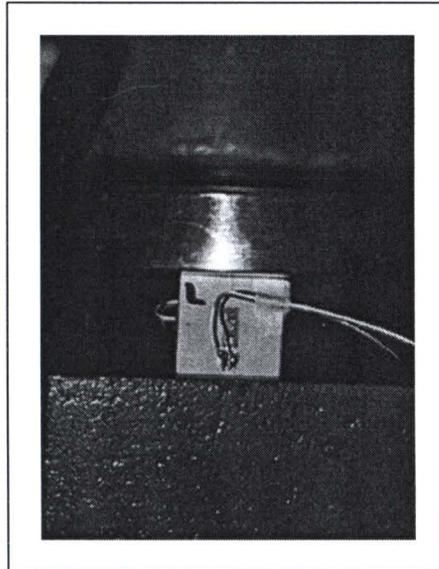
การทดสอบแรงดึง (tensile test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039-95 กับตัวอย่างที่ตัดทั้งในแนวนานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย เพื่อทดสอบหาโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึง (tensile modulus of elasticity) หน่วยแรงดึงประลัย (tensile ultimate stress) และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และทดสอบตัวอย่างที่ตัดในทิศทางทำมุม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



รูปที่ 2.7 การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน CFRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

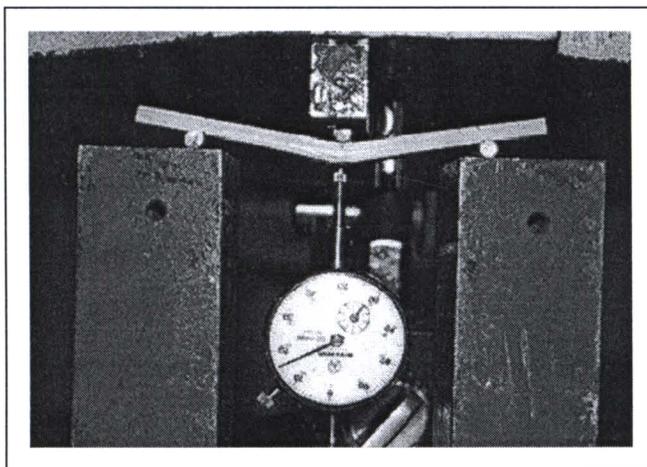
การทดสอบแรงอัด (compression test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D695-95 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัด (compressive modulus of elasticity) และหน่วยแรงอัดประลัย

(compressive ultimate stress) ทดสอบตัวอย่างถูกตัดในแนวนานานกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย และในแนวตั้งฉากกับทิศทางการวางตัวของเส้นใย ลักษณะการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.8



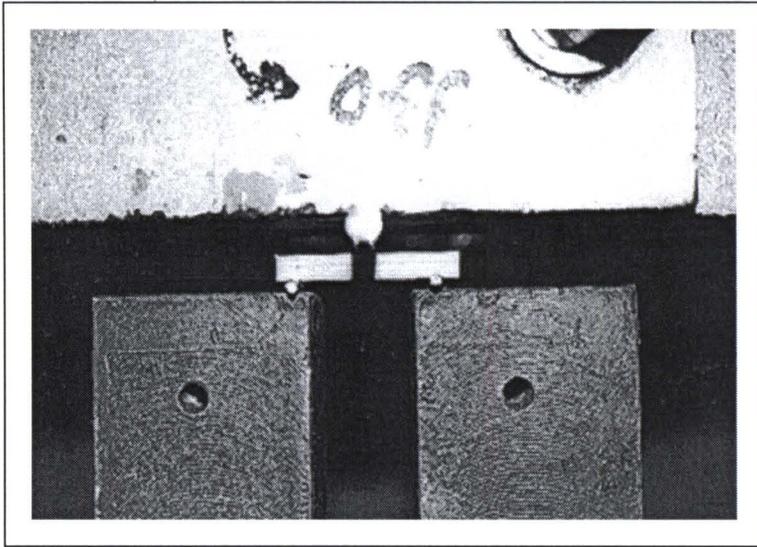
รูปที่ 2.8 การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

การทดสอบแรงค้ำ (flexural test) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-92 เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำ (flexural modulus of elasticity) และหน่วยแรงค้ำประลัย (flexural ultimate stress) ตัวอย่างทดสอบถูกตัดในแนวนานานกับทิศทางการวางตัวหลักของเส้นใย เพียงทิศทางเดียว ลักษณะการทดสอบแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การทดสอบแรงค้ำของชิ้นส่วน FRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

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



รูปที่ 2.10 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน PFRP (สิทธิชัย แสงอาทิตย์, 2542)

ผลการทดสอบและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP กับคุณสมบัติทางกลของเหล็กgrupพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

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

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

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

สำหรับการเปรียบเทียบหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ CFRP กับเหล็กรูปพรรณตามมาตรฐาน ASTM A36 พบว่าวัสดุ CFRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กรูปพรรณประมาณ 5.3 เท่า ดังนั้น ในการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ CFRP 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) ซึ่งมีทิศทางในแนวตั้งไปตามทิศทางตามยาวขององค์อาคาร 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) หน้าตัดรูปตัวซี (c-section) และ หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง (box section) เป็นต้น คานหน้าตัด wide-flange เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดที่สุด เนื่องจากหน้าตัดดังกล่าวมีพื้นที่ในส่วนของปีก (flange) มากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่งผลให้หน้าตัด wide-flange มีค่าโมเมนต์อินเนอร์เซีย (moment of inertia) ต่อพื้นที่หน้าตัดมากกว่าหน้าตัดรูปตัว I ส่วนคานหน้าตัดรูปตัวซี มักถูกใช้เป็นคานเพื่อรองรับน้ำหนักบรรทุกที่มีค่าไม่มากนัก เช่น โครงสร้างแป เป็นต้น เนื่องจากหน้าตัดมีความต้านทานต่อการแอ่นตัวทางด้านข้างต่ำ นอกจากนั้น คานหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมกลวง เป็นคานที่มีหน้าตัดประหยัดอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งหน้าตัดดังกล่าวมีความสามารถต้านทานต่อแรงดัดและแรงบิดได้ดี (Gaylord et al., 1992)

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

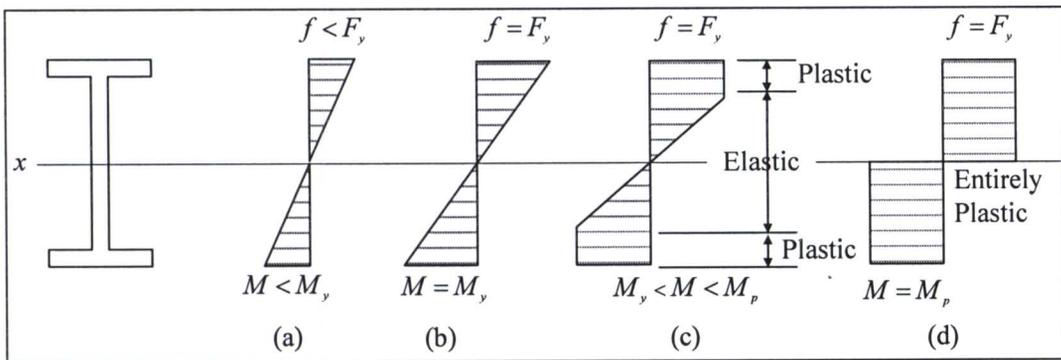
จะมีการกระจายแบบเส้นตรงจากศูนย์ที่แกนสะเทินจนมีค่าสูงสุดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคาน ดังแสดงในรูปที่ 2.11(a) หน่วยแรงดัด (flexural stress, f_b) สูงสุดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคานหาได้จากสมการการดัด (flexural formula)

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

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 2.11 หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน (Salmon and Johnson, 1996)

เมื่อโมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่า ๆ หนึ่งแล้ว หน่วยแรงดัดที่ผิวด้านบนสุดและล่างสุดของคานจะมีค่าเท่ากับหน่วยแรงครากของวัสดุ และการกระจายของหน่วยแรงดัดยังคงเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.11(b) ค่าโมเมนต์ดัดที่จุดนี้เรียกว่า โมเมนต์ดัดที่จุดคราก (yield moment, M_y) และถ้าให้โมเมนต์ดัดมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ผิวด้านบนสุดและล่างสุดที่มีหน่วยแรงดัดเท่ากับโมเมนต์ดัดที่จุดคราก ยังคงรับหน่วยแรงเท่าเดิม โดยที่หน่วยแรงดัดที่เพิ่มขึ้นจะถูกต้านทานโดยส่วนของหน้าตัดที่อยู่ใกล้แกนสะเทินมากขึ้น และส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดคานมีหน่วยแรงดัดเท่ากับหน่วยแรงครากมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11(c) สุดท้ายทุกตำแหน่งบน

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

2.3.1 การออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงคดของเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD

AISC ได้เสนอวิธีคูณความต้านทานและน้ำหนักบรรทุก (load and resistance factor design: LRFD) เพื่อใช้ในการคำนวณออกแบบ โครงสร้างเหล็กนอกเหนือจากวิธี ASD ซึ่งนิยมใช้ในอดีต (AISC 350, 1999) วิธี LRFD มีหลักการและขั้นตอนการออกแบบคล้ายคลึงกับวิธีกำลังประลัย (ultimate strength design: USD) ที่ใช้กับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสนอโดย ACI (American Concrete Institute) โดยทั่วไป โครงสร้างเหล็กที่ออกแบบด้วยวิธี LRFD จะประหยัดกว่าที่ออกแบบด้วยวิธี ASD โดยมีค่าความปลอดภัยใกล้เคียงกัน และในปัจจุบัน AISC แนะนำให้วิศวกรผู้ออกแบบใช้การคำนวณและออกแบบ โครงสร้างเหล็ก โดยวิธี LRFD เป็นหลัก

มาตรฐาน LRFD เป็นวิธีการคำนวณออกแบบที่ใช้สภาวะจำกัด (limit state) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ภายใต้สภาวะจำกัดนี้กำหนดให้ค่าแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกใช้งานคูณกับค่าตัวคูณน้ำหนักบรรทุก (load factor) มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความต้านทานระบุขององค์อาคารกับตัวคูณความต้านทาน (resistance factor) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

สำหรับองค์อาคารรับแรงคดกำหนดให้ $M_u = \sum \gamma_i Q_i$ 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 สามารถวิเคราะห์ได้จากทฤษฎีพลาสติกเช่นเดียวกับวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในวิธี AISC/ASD

γ_i คือ ตัวคูณน้ำหนักบรรทุก

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

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) และอัตราส่วนความลึกของหน้าตัดต่อความหนาเวว (d/t_w) เป็นเกณฑ์ซึ่งสามารถจำแนกโดยอัตราส่วนดังนี้

ถ้า $\lambda \leq \lambda_p$ และปีกคานเชื่อมต่อกับเววตลอดความยาวคาน ถือเป็นหน้าตัดอัดแน่น

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

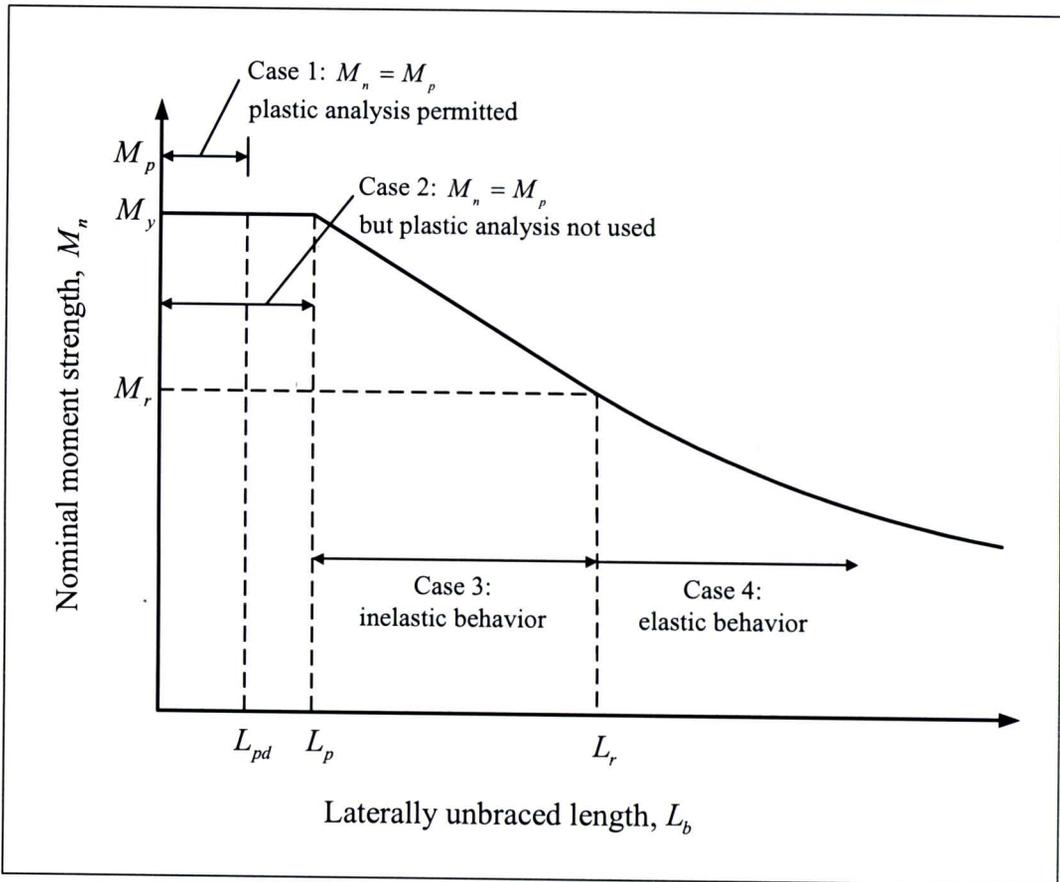
ถ้า $\lambda > \lambda_r$ ถือเป็นหน้าตัดชิ้นส่วนชะลูด

ตารางที่ 2.4 แสดงอัตราส่วนระหว่างความกว้างปีกต่อความหนาปีกของหน้าตัดรูปตัวซี สำหรับจำแนกประเภทคานเหล็กรูปพรรณ

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

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

รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยัดขึ้นด้านข้างของคาน โดยไม่คำนึงถึงผลเนื่องจากการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกหรือเวว มาตรฐาน LRFD ได้ใช้รูปที่ 2.12 เป็นเกณฑ์ในการจำแนกพฤติกรรมของคานเพื่อใช้ในการคำนวณกำลังโมเมนต์ระบุ และส่วนมากคานที่ออกแบบจะมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง Inelastic (case 3) และช่วง Elastic (case 4)



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน
(Salmon and Johnson, 1996)

2.3.1.1 คานหน้าตัดอัดแน่น

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

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

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

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

โดยที่	L_b	คือ	ความยาวไ้การยึดรั้งด้านข้างของคาน
	L_{pd}	คือ	ความยาวไ้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับการออกแบบด้วยวิธีพลาสติก
	r_y	คือ	รัศมีไ้เรชันรอบแกนรอง
	E	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ
	F_y	คือ	หน่วยแรงครากของเหล็กรูปพรรณ

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

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

โดยที่ M_p คือ โมเมนต์พลาสติก

2) เมื่อ $L_b \leq L_p$ และเกิดการหมุนได้น้อย

ในกรณีนี้สามารถทำการวิเคราะห์คานด้วยวิธีอิลาสติก การวิบัติเกิดจากการครากตลอดของหน้าตัด LRFD กำหนดให้ความยาวไ้การยึดรั้งด้านข้าง $L_b \leq L_p$ สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปตัวซี ดังนี้

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

โดยที่ L_p คือ ความยาวไ้การยึดรั้งด้านข้างสูงสุดสำหรับ $M_n = M_p$

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

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

$$\text{เมื่อ } M_p = Z_x F_y \quad (2.9)$$

โดยที่ Z_x คือ โมดูลัสพลาสติก

3) เมื่อ $L_p < L_b \leq L_r$

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

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

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

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

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

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

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

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

โดยที่	C_b	คือ	สัมประสิทธิ์สำหรับกรณีที่มีค่าไม่สม่ำเสมอ หาได้จากสมการที่ (2.15)
	M_r	คือ	กำลังโมเมนต์สูงสุดในช่วงอินอีลาสติก
	L_r	คือ	ความยาวไร้การยี่ครั้งด้านข้างสูงสุดซึ่งคานยังคงมีพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอินอีลาสติก
	F_L	คือ	ค่าที่น้อยกว่าระหว่าง $(F_{yf} - F_r)$ กับ F_{yw}

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

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

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

ในกรณีที่มีค่าโมเมนต์มีค่าเท่ากันตลอดความยาวคาน (uniform moment) ค่า C_b มีค่าดังสมการ

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

4) เมื่อ $L_b > L_r$

ในกรณีคานมีการยึดรั้งด้านข้างไม่เพียงพอ เมื่อ $L_b > L_r$ คานเกิดการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดในช่วงอีลาสติก (elastic lateral-torsional buckling: elastic LTB) สำหรับหน้าตัดรูปตัว I และรูปตัวซี มาตรฐาน LRFD กำหนดให้กำลังโมเมนต์ระบุ ($M_n < M_r$) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

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

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

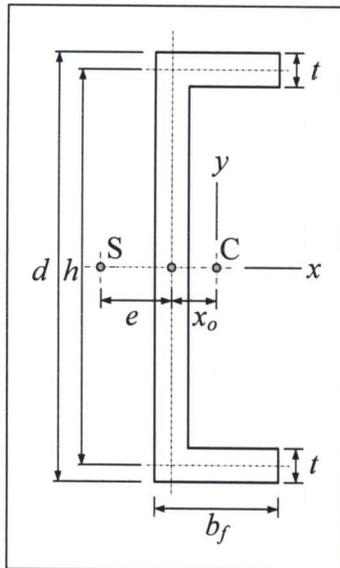


สมการที่ (2.17) สามารถใช้ได้สำหรับคานที่มีหน้าตัดสมมาตรรอบแกนที่ตั้งฉากกับแกนของแรงกระทำ และที่ส่วนปลายทั้งสองข้างของคานมีการรับรอบแบบธรรมดา (simply supported) ซึ่งมีอิสระในการบิดเบี้ยวและหมุนรอบแกน Y ตลอดจนน้ำหนักบรรทุกกระทำผ่านจุดศูนย์กลางแรงเฉือน (shear center) ของหน้าตัด

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

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

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



รูปที่ 2.13 พิกัดของหน้าตัดรูปตัวซี



2.3.1.2 คานหน้าตัดไม้อัดแน่น

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

1) การโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีก (flange local buckling: FLB)

ถ้า $\lambda_p \leq \lambda_f \leq \lambda_r$ เฉพาะส่วนปีก ดังนั้นปีกเป็นหน้าตัดไม้อัดแน่น 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 ดังนั้นปีกเป็นหน้าตัดไม้อัดแน่น กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.21)

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

โดยที่ λ_w คือ ค่าสัดส่วนความชะลูดของเอวคาน

3) การโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด

(lateral-torsional buckling: LTB)

ถ้า $L_p < L_b \leq L_r$ เป็นกรณีที่คานเกิดการวิบัติในช่วงอินอีลาสติก เนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Inelastic lateral-torsional buckling กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.22)

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

ถ้า $L_b > L_r$ เป็นกรณีที่คานเกิดการวิบัติในช่วงอีลาสติก เนื่องจากการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด เรียกว่า Elastic lateral-torsional buckling กำลังรับโมเมนต์ระบุสามารถหาได้จากสมการที่ (2.17)

2.3.2 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของสมาคมวิศวกรโยธาอเมริกัน

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

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

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

2.3.3 สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน FRP

จากคู่มือการออกแบบ (design manual) ของแต่ละบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำจากวัสดุ FRP ที่เผยแพร่ออกมา ในส่วนของสมการออกแบบที่มีลักษณะเกี่ยวข้องกับหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดยังมีจำนวนไม่มากนัก อาจเป็นเพราะเหตุผลด้านกลยุทธ์ทางการค้าของแต่ละบริษัท เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน FRP ส่วนมากเป็นอุตสาหกรรมที่เน้นด้านเชิงพาณิชย์มากกว่างานด้านวิจัยและดีพิมพ์เผยแพร่ สังเกตจากการที่ยังไม่มีมาตรฐานขององค์กรหรือหน่วยงานใด ๆ นำเสนอข้อกำหนดหรือมาตรฐานที่เกี่ยวข้องสำหรับการออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างต่าง ๆ ของวัสดุ FRP อย่างชัดเจน

1) Creative Pultrusions

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

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

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

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

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

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

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

น้ำหนักโคงเตาะดังกล่าวสามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่าโมเมนต์ที่กระทำต่อคาน และใช้พื้นฐานความสัมพันธ์ของโมเมนต์สำหรับทำนายความสามารถในการต้านทานการโคงเตาะด้านข้างของหน้าตัดรูปตัวซีสำหรับจุดรองรับในแบบต่าง ๆ

2) Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG)

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

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

ดังนั้นหน่วยแรงดัดที่ยอมให้ (F_b) มีค่าดังสมการ

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

โดย MMFG กำหนดให้คานมีค่าตัวคูณความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2.5

3) Bedford Reinforced Plastics

Bedford Reinforced Plastics (2006) ได้เสนอสมการสำหรับการคำนวณหาหน่วยแรงโก่งเคาะที่ยอมให้ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี ดังสมการ

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

โดยที่ b_c คือ ความกว้างปีกลบด้วยความหนาของปีก ($b_f - t_f$)

อย่างไรก็ตาม สมการออกแบบคานและชิ้นส่วนรับแรงดัดของบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วน FRP ตามที่ได้เสนอมานี้ อาจไม่มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับการประมาณค่าน้ำหนักโก่งเคาะของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซี เนื่องจากสมการที่ (2.24) เป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเคาะสำหรับคานยื่น (cantilever beam) หน้าตัดของรูปตัวซีของ Creative Pultrusions (2004) โดยสมการดังกล่าวถูกอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pandey, Kabir, and Sherbourne (1995) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเคาะของคานยื่น (cantilever beam) ที่มีหน้าตัดรูปตัว I

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

สมการสำหรับการคำนวณหน่วยแรงวิกฤต (critical stress) ที่ทำให้คานเกิดการโก่งเดาะเฉพาะที่ของปีกเท่านั้นซึ่งอยู่ในทฤษฎีการออกแบบโครงสร้างเหล็กรูปพรรณของ (Gaylord et al., 1992)

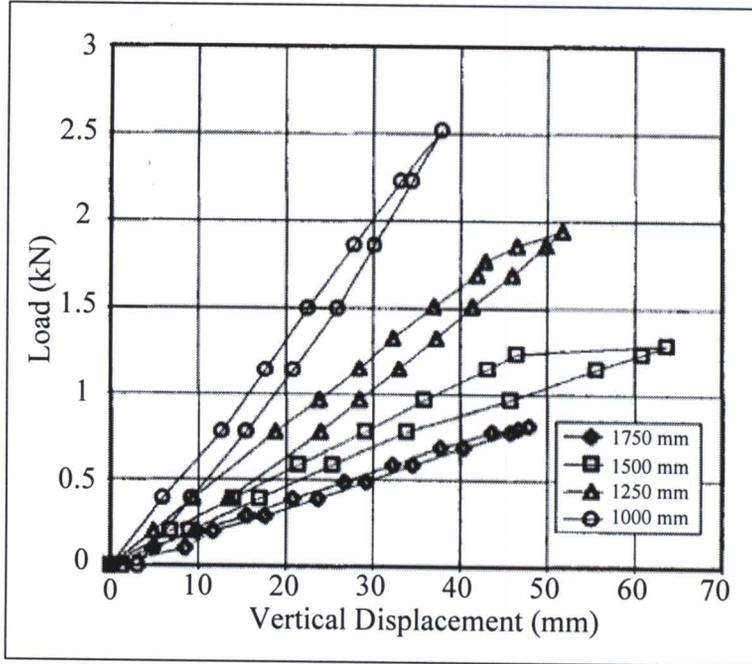
2.4 การทดสอบคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP ภายใต้แรงดัด

Mottram (1992) ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) หรืออาจเรียกว่า การโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด (flexural-torsional buckling) ของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัว I โดยผลการทดสอบที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองสำหรับการประมาณน้ำหนักบรรทุกโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดโดยใช้วิธี Finite Difference นอกจากนี้ได้เสนอว่า เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน การวิเคราะห์และออกแบบคานหรือชิ้นส่วนรับแรงดัดของพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP ต้องคำนึงถึงผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือนเสมอ เนื่องจากพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP เป็นวัสดุที่มีค่าโมดูลัสแรงเฉือน (shear modulus) ค่อนข้างต่ำ และมีอัตราส่วนโมดูลัสยึดหยุ่นต่อโมดูลัสแรงเฉือน (E/G) สูง

Brooks and Turvey (1995) นำเสนอผลการทดสอบและสมการสำหรับการประมาณน้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) สำหรับการโก่งเดาะด้านข้างของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัว I ตัวอย่างคานถูกทดสอบโดยมีจุดรองรับแบบคานยื่น (cantilever supported) และให้แรงกระทำผ่านจุด Centroid ของหน้าตัด ตัวอย่างทดสอบหน้าตัดรูปตัว I ที่ใช้มีขนาดลึก 102 mm กว้าง 51 mm และหนา 6.4 mm รหัส EXTREN™ 500 series ซึ่งผลิตโดยบริษัท Morrison Molded Fiber Glass Company (MMFG) ความยาวของตัวอย่างคานมีค่าเท่ากับ 1000 1250 1500 และ 1750 mm จากผลการทดสอบพบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัว I มีลักษณะเชิงเส้น (linear) จนถึงค่าน้ำหนักโก่งเดาะของคานดังแสดงในรูปที่ 2.14 ลักษณะการวิบัติของคานเป็นแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด นอกจากนี้ น้ำหนักโก่งเดาะหรือน้ำหนักบรรทุกวิกฤต (P_{cr}) สำหรับการโก่งเดาะด้านข้าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.32) ซึ่งสมการดังกล่าวให้ผลสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกโก่งเดาะที่ทดสอบได้

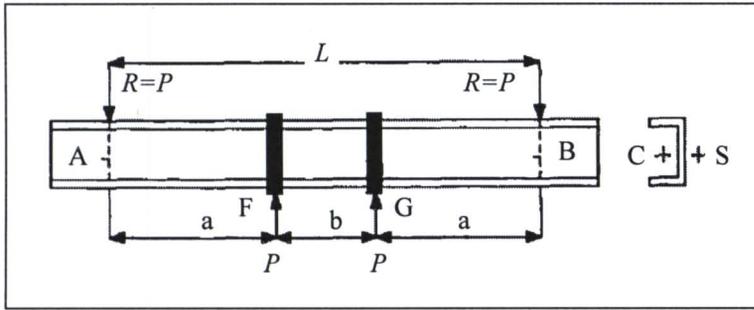
$$P_{cr} = \gamma_2 \frac{\sqrt{E_L I_y G J}}{L^2} \quad (2.32)$$

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

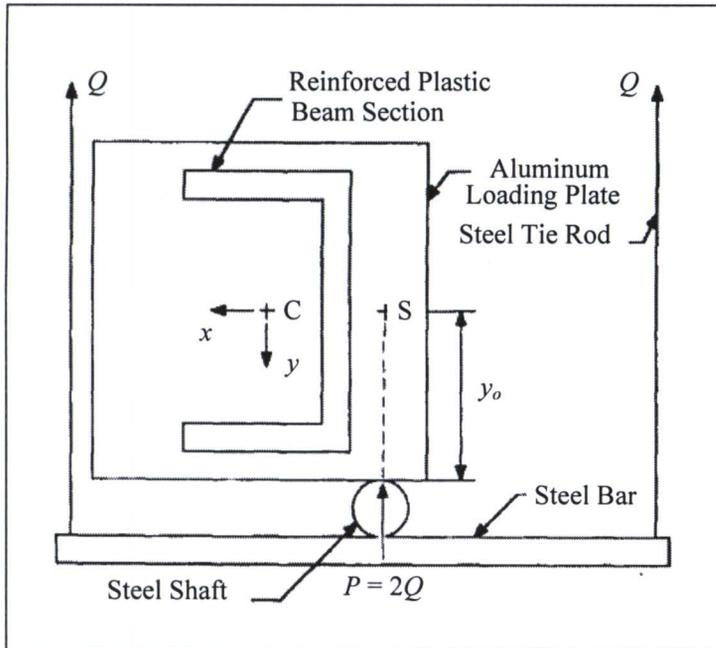


รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคาน
(Brooks and Turvey, 1995)

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



รูปที่ 2.15 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด (Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)



รูปที่ 2.16 ลักษณะหน้าตัดและตำแหน่งของการให้แรงกระทำ (Razzaq, Prabhakaran, and Sirjani, 1996)

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

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

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

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

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

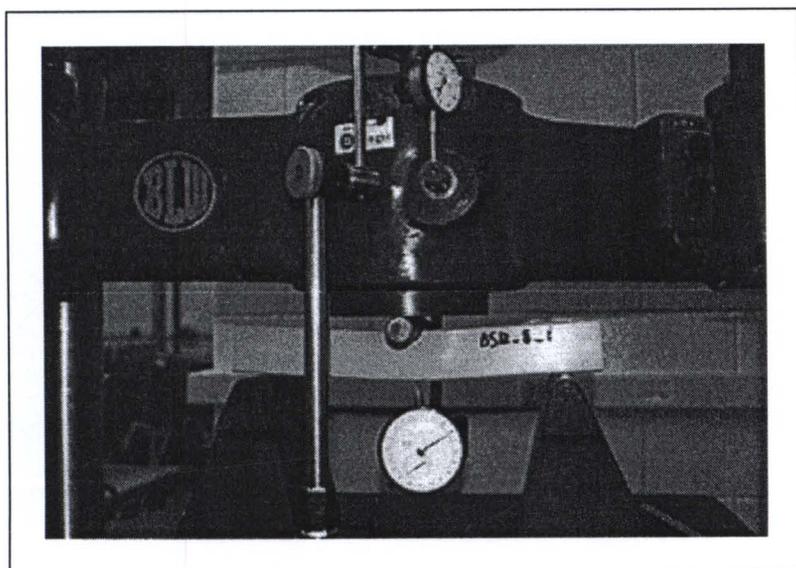
$$f(a) = \frac{\pi a}{L} \sin \left(\frac{2\pi a}{L} \right) - \sin^2 \left(\frac{\pi a}{L} \right) \quad (2.38)$$

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

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

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

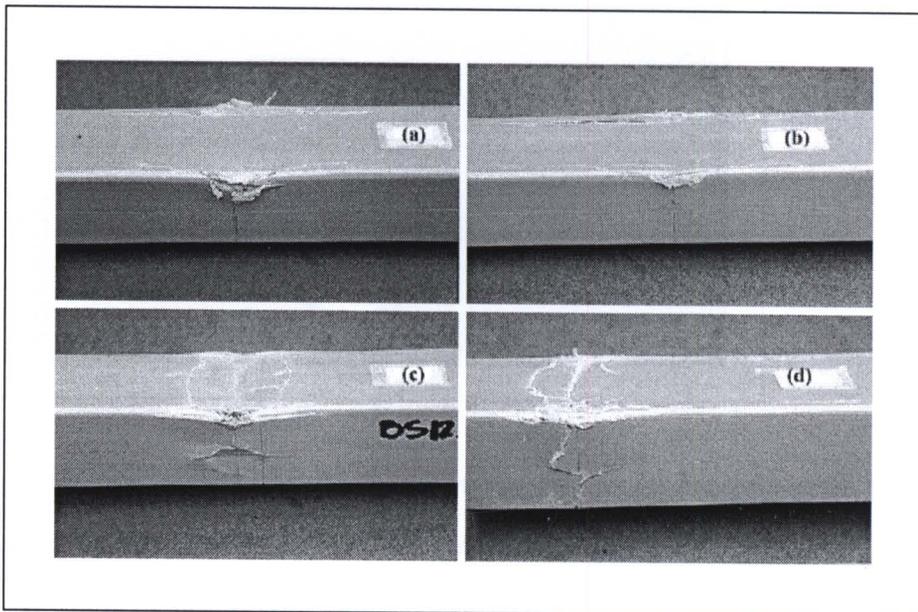
strength) โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัด (flexural modulus) และลักษณะการวิบัติ ตัวอย่างคานที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดกว้าง 50 mm ลึก 50 mm และมีความหนา 3.2 และ 6.4 mm ทำมาจากเส้นใยแก้วชนิด E (E-glass fiber) เรซินเป็นชนิดโพลีเอสเตอร์ (polyester resin) และผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion



รูปที่ 2.17 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวง ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

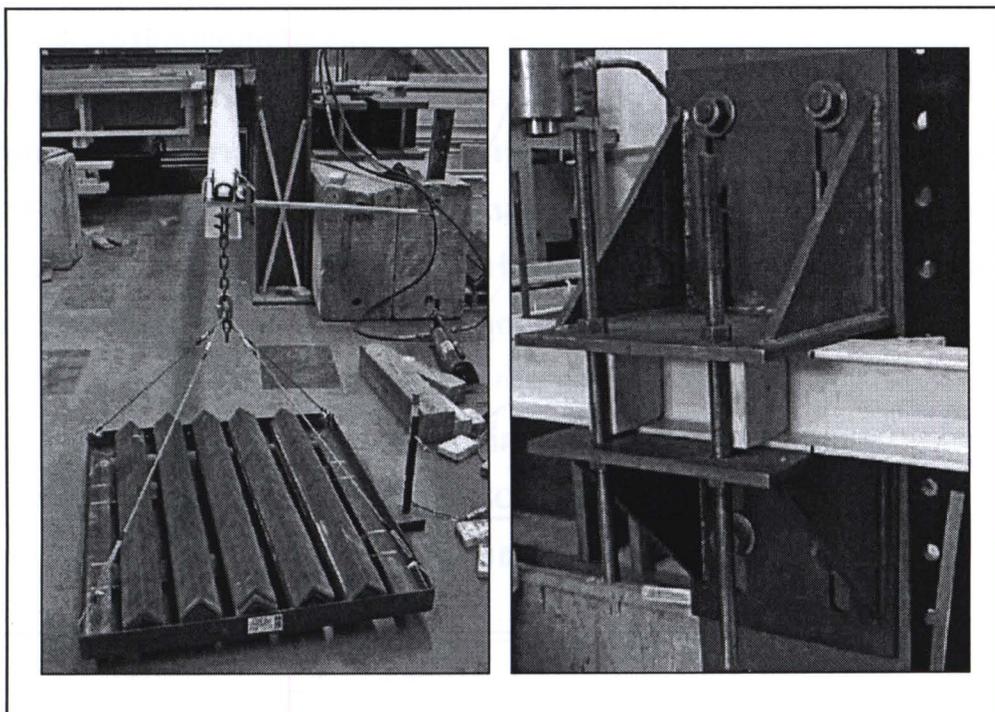
จากผลการทดสอบ พบว่าพฤติกรรมของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงที่มีอัตราส่วนของระยะห่างของจุดรองรับต่อความลึกคานสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ พฤติกรรมเชิงเส้นตรง (linear) พฤติกรรมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (nonlinear) และพฤติกรรมการวิบัติแบบก้าวหน้า (progressive failure) ในส่วนของพฤติกรรมเชิงเส้นตรงมีค่าถึง 35-75% ของน้ำหนักบรรทุกทุกระยะ สำหรับอัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดของหน้าตัดต่อโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าของคานเหล็กรูปพรรณ ดังนั้น อิทธิพลเนื่องจากการแอนตัวเนื่องจากแรงเฉือนจะมีค่าสูง ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดของหน้าตัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงเฉือนของหน้าตัดคานพลาสติกเสริมเส้นใยไม่ได้พิจารณาเป็นคุณสมบัติของตัวเนื้อวัสดุ แต่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของหน้าตัด ตลอดจนลักษณะการจัดวางเส้นใย โดยโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่าน้อยกว่าเหล็กรูปพรรณอยู่ 7 ถึง 9 เท่า ดังนั้น การแอนตัวของโครงสร้างเป็นตัวควบคุมหลักในการการออกแบบหน้าตัดของคานพลาสติกเสริมเส้นใย

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



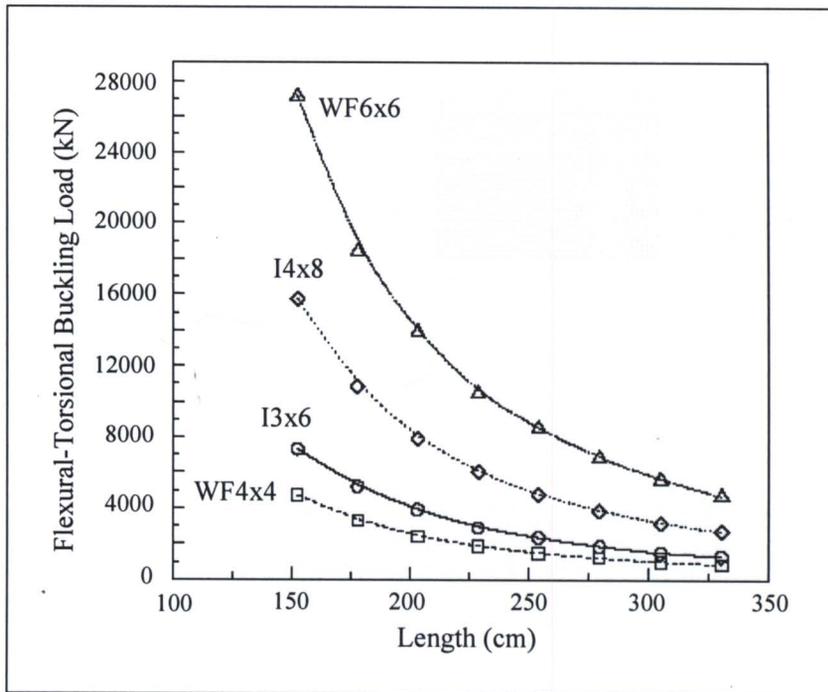
รูปที่ 2.18 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัสกลวงที่ถูกทดสอบโดยแรงกระทำแบบ 3 จุด (Seangatith, 2002)

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

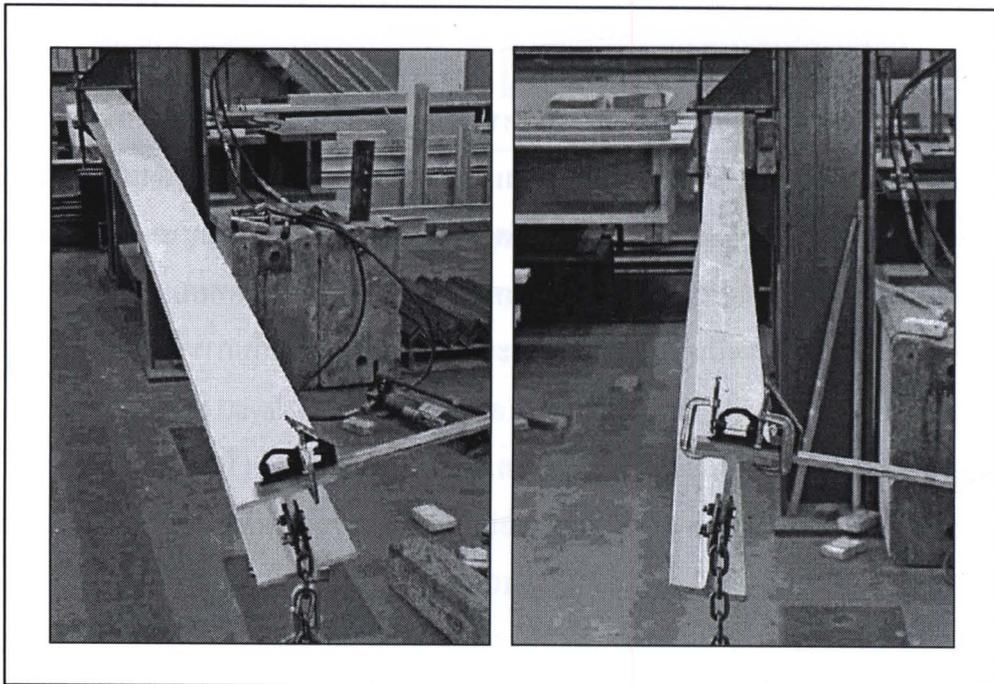


รูปที่ 2.19 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูป wide-flange และรูปตัว I
(Qiao, Zou, and Davalos, 2003)

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

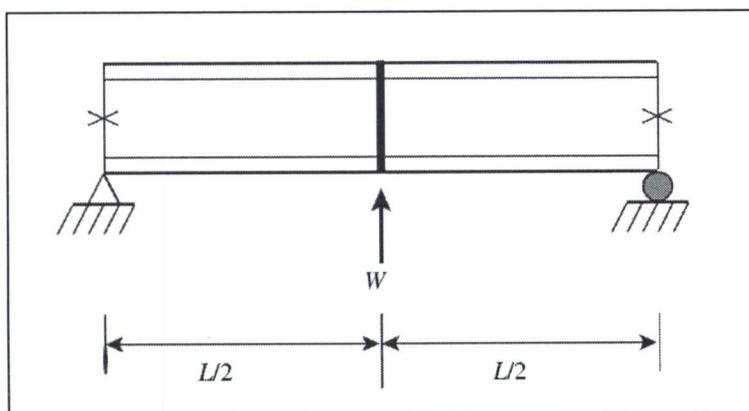


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด และความยาวของตัวอย่างทดสอบ (Qiao, Zou, and Davalos, 2003)



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

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



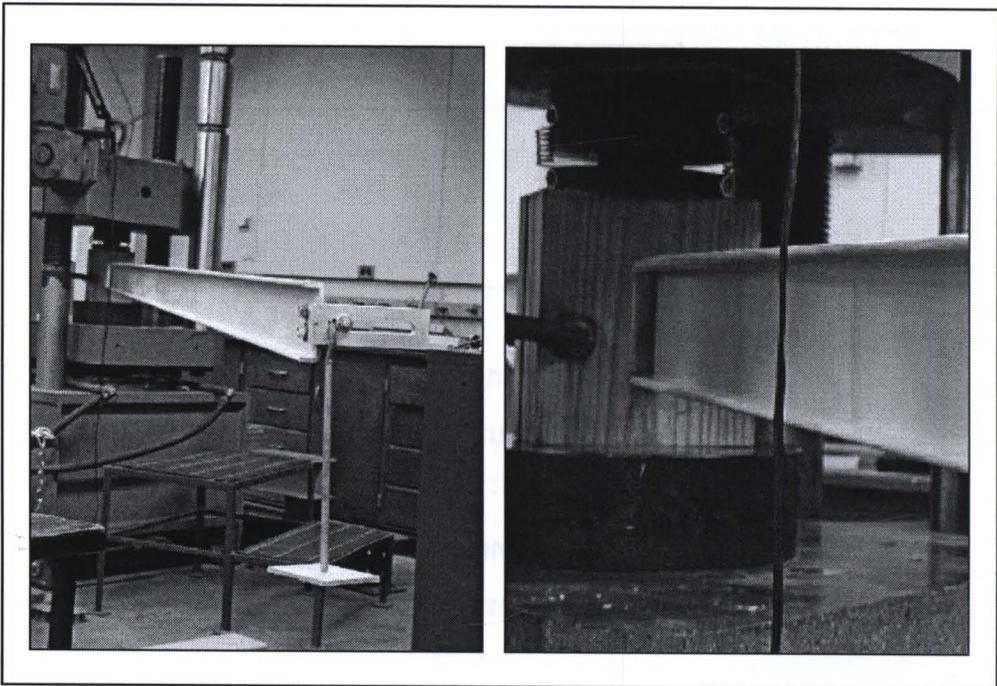
รูปที่ 2.22 แผนภาพการทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัว I ที่ถูกกระทำโดยแรงแบบ 3 จุด (Sirjani and Razzaq, 2005)

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

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

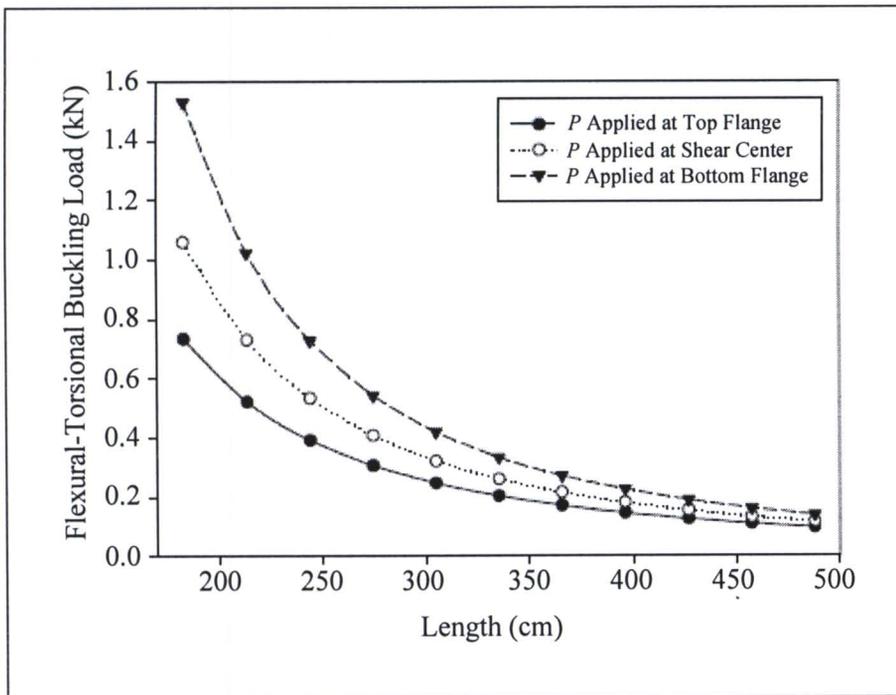
เมื่อ $\Gamma = \frac{L}{175} + 0.5715 \quad (2.41)$

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



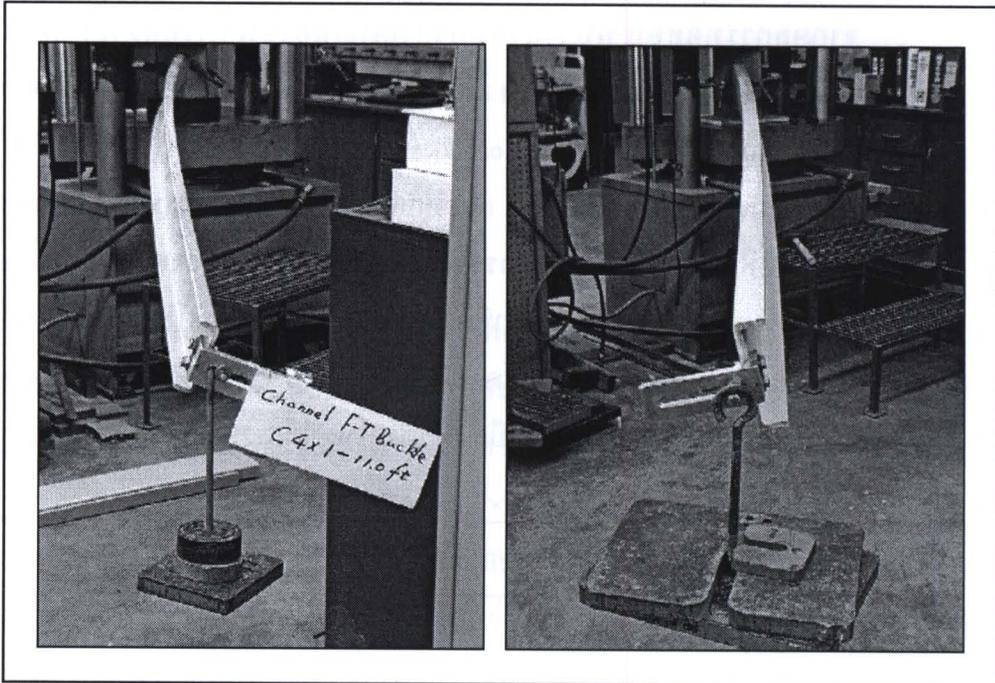
รูปที่ 2.23 การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซีที่ถูกทดสอบ โดยแรงกระทำที่ปลายคาน (Shan and Qiao, 2005)

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



รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะเนื่องจากการดัดร่วมกับการบิด และความยาวของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซี (Shan and Qiao, 2005)





รูปที่ 2.25 ลักษณะการวิบัติของคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซี (Shan and Qiao, 2005)

2.5 สรุปปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการค้นคว้าและทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสมการที่ใช้ออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP ภายใต้แรงคดส่วนใหญ่มาจากสมการออกแบบเหล็กรูปพรรณโดยวิธี LRFD และส่วนหนึ่งถูกพัฒนาสมการจากการทดสอบ (empirical formula) รวมทั้งยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างและลักษณะเฉพาะของคาน CFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงคด โดยมีสถานะของจูดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ Simply supported และ Fixed-end supported อย่างจริงจัง ตลอดจนสมการออกแบบคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มียังไม่มี ความสมบูรณ์เพียงพอ จึงเห็นสมควรทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและลักษณะเฉพาะในการรับแรงคดของคานพลาสติกเสริมเส้นใยที่ทำจากวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี โดยทำการทดสอบความสามารถและการตอบสนองของโครงสร้างในการรับแรงคดของคาน CFRP ในห้องปฏิบัติการ และสุดท้ายนำผลการทดสอบที่ได้มาพัฒนาสมการออกแบบคานและชิ้นส่วนวัสดุ CFRP หน้าตัดรูปตัวซี เพื่อเกิดประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น