บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัย

5.1 บทนำ

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

5.2 สรุปผลทดสอบ

5.2.1 พฤติกรรมของวัสดุพลาสติกเสริมเส้นใยแบบ Pultrusion

วัสดุ PFRP ที่ใช้ในการศึกษามีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางกลใกล้เคียงกับวัสดุ PFRP ที่ผลิตโดยบริษัท Creative Pultrusion โดยหน่วยแรงดึงประลัยมีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion และโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงของวัสดุ PFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วสูงถึง 72.2% โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังส่งผลให้หน่วยแรงดัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใยที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ

หน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยมีค่าน้อยกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ PFRP ที่ใช้มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้วจะเกิดการโก่งเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตด้อยคุณภาพ ในทางเดียวกันจึงส่งผลให้หน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ นอกจากนี้โมดูลัส

ยืดหยุ่นเชิงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเฉือน โดยวัสดุ PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ ส่งผลให้หน่วยแรงเฉือนมีค่าต่ำกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion

5.2.2 พฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด

พฤติกรรมรับแรงกระทำของคานที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่นมีลักษณะคล้ายคลึงกันภายใต้แรงกระทำแบบ 3 จุด

สำหรับคานที่มีอัตราส่วน $L/d < 20$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อยจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน $L/d \geq 20$ พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ นอกจากนี้ น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของลักษณะการวิบัติ ตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น มีลักษณะการวิบัติแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) โดยเกิดจากการแอ่นตัวแนวดิ่งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน และจากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีก และเอวของหน้าตัด

5.2.3 เปรียบเทียบผลทดสอบกับสมการออกแบบของ LRFD

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

5.3 ข้อเสนอแนะและข้อจำกัดในการใช้งาน

การที่วัสดุ PFRP มีหน่วยแรงดัดประลัยที่ค่อนข้างสูงแต่มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดัดที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การแอ่นตัวของโครงสร้างควบคุมการออกแบบโครงสร้าง PFRP เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าหน่วยแรงเฉือนประลัยของวัสดุ PFRP กับของเหล็กโครงสร้างแล้ว เห็นได้ว่าวัสดุ PFRP มีหน่วยแรงเฉือนประลัยต่ำกว่าเหล็กโครงสร้าง 6.7 เท่า ดังนั้น การออกแบบโครงสร้างวัสดุ PFRP ควรมีการตรวจสอบค่าหน่วยแรงเฉือน นอกจากนี้โมดูลัสแรงเฉือนของวัสดุ PFRP ไม่สามารถคำนวณหามาได้โดยใช้ความสัมพันธ์ของโมดูลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซอง (ν) ในรูปของสมการ $G = 0.5\,E/(1+\nu)$ ดังเช่นที่ใช้กับเหล็กโครงสร้าง

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

อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้มีข้อจำกัดอยู่มาก การนำผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการตลอดจนสมการออกแบบที่นำเสนอในการศึกษาครั้งนี้ไปใช้งานก่อสร้างจริงนั้น วิศวกรผู้ออกแบบและผู้ควบคุมงานต้องใช้วิจารณญาณ โดยคำนึงถึงความแตกต่างของคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ คุณภาพการก่อสร้าง ขนาดหน้าตัด ความยาวของคาน รวมทั้งลักษณะการให้แรงกระทำต่อตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาภายใต้ขอบเขตของงานวิจัยเป็นหลักด้วย

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป

1) ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบเยื้องศูนย์ภายใต้แรงดัด
2) ศึกษาแรงกระทำที่ตำแหน่ง (location) ต่าง ๆ ของหน้าตัด เช่น ปีกบน (top flange) และปีกล่าง (bottom flange) เพื่อให้ผลงานวิจัยต่อไปครอบคลุมถึงการใช้งานจริง
3) ศึกษาพฤติกรรมของคานประกอบหน้าตัดตัวซีคู่ภายใต้แรงดัด โดยใช้สมการออกแบบของ LFRD ในงานวิจัยนี้เป็นพื้นฐาน
4) การศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระทำแบบพลศาสตร์ของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย