248928
ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248928

SUT7-712-49-24-42

รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูดชันหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

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

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

b0025337z

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
248928

SUT7-712-49-24-42

รายงานการวิจัย

การพัฒนาสมการออกแบบชิ้นส่วนพลาสติกเสริมเส้นใยแบบพัลทรูดชันหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงดัดที่มีจุดรองรับแบบง่ายและแบบยึดแน่น

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

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ
สิทธิชัย แสงอาทิตย์
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549-50
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

เมษายน 2555

กิตติกรรมประกาศ

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

สิทธิชัย แสงอาทิตย์
หัวหน้าโครงการวิจัย
เมษายน 2555

บทคัดย่อ

248928

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของคาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซี ภายใต้แรงดัดโดยมีสภาวะของจุดรองรับที่แตกต่างกัน ได้แก่ จุดรองรับแบบง่าย และจุดรองรับแบบยึดแน่น คาน PFRP หน้าตัดรูปตัวซีที่ใช้ในศึกษาประกอบด้วยเส้นใยแก้วชนิด E-glass และเรซินชนิดโพลีเอสเตอร์และผลิตโดยวิธี Pultrusion ตัวอย่างทดสอบมี 3 ขนาด ได้แก่ 76×22×6 102×29×6 และ 152×43×10 mm โดยมีอัตราส่วนของระยะระหว่างจุดรองรับต่อความลึกของหน้าตัด (L/d) อยู่ในช่วงระหว่าง 10-53 คาน PFRP จำนวน 172 ตัวอย่าง ถูกทดสอบเพื่อศึกษาผลของความยาวต่อการตอบสนองทางโครงสร้างและโมเมนต์โก่งเดาะของคาน จากนั้น โมเมนต์โก่งเดาะของตัวอย่างคานที่ทดสอบได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่คำนวณได้จากสมการออกแบบของ LFRD

จากผลการทดสอบโดยรวมพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่งมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมการรับแรงด้านข้าง โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรงจนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างเป็นแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวดิ่งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนมีค่าลดลง นอกจากนี้ สมการออกแบบของ LFRD สามารถทำนายโมเมนต์โก่งเดาะของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอโดยความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

Abstract

248928

The objectives of this research are to study the structural behaviors of the pultruded fiber-reinforced plastic (PFRP) channel beams under flexure with different support conditions; simply supported, and fixed-end supported. The PFRP channel beams used in this study were made of E-glass fiber reinforcement and polyester resin and manufactured by a pultrusion process. Three different geometries of the beams are $76\times22\times6$, $102\times29\times6$ and $152\times43\times10$ mm. The span-to-depth ratios of the specimens are in the range of 10 to 53. A total of 244 specimens were tested to investigate the effects of span of the beam on the structural responses and buckling moment. Then, the obtained buckling moments were compared to the buckling moments calculated by using the LRFD steel design equation.

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

สารบัญ

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

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

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 ข้อเสนอแนะในงานวิจัยต่อไป 137
รายการอ้างอิง 139
ภาคผนวก ก. รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 145

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 คุณสมบัติของเส้นใยแก้วชนิดต่าง ๆ 17

2.2 คุณสมบัติทั่วไปที่อุณหภูมิห้องของโพลีเอสเตอร์และไวนิลเอสเตอร์ 20

2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP เปรียบเทียบกับคุณสมบัติทางกล ของเหล็กรูปพรรณ ตามมาตรฐาน ASTM A36 25

2.4 ขีดจำกัดของอัตราส่วน b/t 29

3.1 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบหาปริมาณขององค์ประกอบ 54

3.2 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 57

3.3 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 59

3.4 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 62

3.5 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย 65

3.6 รายละเอียดตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 67

3.7 รายละเอียดของหน้าตัดรูปตัวซีของคาน PFRP 70

3.8 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76\times22\times6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 71

3.9 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102\times29\times6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 72

3.10 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152\times43\times10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 73

3.11 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $76\times22\times6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 79

3.12 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $102\times29\times6$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 80

3.13 รายละเอียดตัวอย่างคาน PFRP ขนาด $152\times43\times10$ mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

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

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	สภาวะกัดกร่อนเนื่องจากสนิมในโครงสร้างเหล็กรูปพรรณ	1
1.2	โครงสร้างแปและชิ้นส่วนโครงสร้างที่ใช้เหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัวซี	2
1.3	การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในโรงงานบำบัดน้ำเสีย	4
1.4	การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP สำหรับโครงสร้างในทะเล	4
1.5	การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในบริเวณพื้นที่ ๆ เข้าถึงยาก	5
1.6	การประยุกต์ใช้วัสดุ PFRP ในส่วนของอาคารที่ต้องการโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา	5
1.7	ตัวอย่างหน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุ PFRP	7
2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเส้นใยชนิดต่าง ๆ	14
2.2	ส่วนประกอบภายในหน้าตัดของวัสดุ PFRP	15
2.3	เส้นใยแก้วที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ PFRP	18
2.4	เรซินที่นำมาใช้ผลิตวัสดุ PFRP	19
2.5	ขั้นตอนการผลิตวัสดุเสริมเส้นใยแก้วโดยวิธี Pultrusion	21
2.6	หน้าตัดต่าง ๆ ของวัสดุเสริมเส้นใยแก้วที่ผลิตโดยวิธี Pultrusion	21
2.7	การทดสอบแรงดึงของชิ้นส่วน PFRP	22
2.8	การทดสอบแรงอัดของชิ้นส่วน PFRP	23
2.9	การทดสอบแรงดัดของชิ้นส่วน PFRP	23
2.10	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนระหว่างระนาบของชิ้นส่วน PFRP	24
2.11	หน่วยแรงดัดที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดของคาน	27
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังโมเมนต์ระบุกับความยาวไร้การยึดรั้งด้านข้างของคาน	30
2.13	พิกัดของหน้าตัดรูปตัวซี	34
2.14	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและระยะการแอ่นตัวที่ปลายคาน	40
2.15	การทดสอบคานพลาสติกเสริมเส้นใยหน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงกระทำแบบ 4 จุด	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

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

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.10 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 61
3.11 อุปกรณ์ทดสอบแรงอัดสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 63
3.12 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 63
3.13 ลักษณะตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย 64
3.14 ลักษณะจุดรองรับและ Loading nose สำหรับการทดสอบแรงดัด ตามแนวแกนของเส้นใย 65
3.15 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย 66
3.16 รูปร่างของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 67
3.17 การติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 68
3.18 ลักษณะหน้าตัดรูปตัวซีของคาน PFRP ที่ใช้ในงานวิจัย 69
3.19 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับตัวอย่างที่มีจุดรองรับแบบง่าย 74
3.20 การให้แรงกระทำแก่ตัวอย่างทดสอบที่มีจุดรองรับแบบง่าย 75
3.21 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 75
3.22 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบง่าย 76
3.23 การวัดระยะแอ่นตัวแนวดิ่งและด้านข้างของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 76
3.24 การติดตั้งมาตรวัดความเครียดของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 77
3.25 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 77
3.26 แผนภาพการติดตั้งตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 82
3.27 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบเข้ากับจุดรองรับแบบยึดแน่น 83
3.28 จุดรองรับแบบยึดแน่น 83
3.29 การวัดระยะแอ่นตัวแนวดิ่งและด้านข้างและการติดตั้งมาตรวัดความเครียด ของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 84
3.30 การทดสอบตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 84
4.1 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ PFRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก 88
4.2 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน PFRP 89
4.3 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.4 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย 90

4.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 91

4.6 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย 91

4.7 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 93

4.8 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย 93

4.9 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดัดตามแนวแกนของเส้นใย 95

4.10 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดัดตามแนวแกนของเส้นใย 95

4.11 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 97

4.12 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย 97

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm
ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 99

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm
ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 99

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm
ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 100

4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm
ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 100

4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm
ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 101

4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm
ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 101

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 102

4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 102

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 103

4.22 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 103

4.23 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 104

4.24 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 104

4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 108

4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 109

4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 110

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย 110

4.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง ของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย....111

4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 76×22×6 mm
ความยาว 3.0 ถึง 4.0 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 117

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm
ความยาว 1.0 ถึง 2.7 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 118

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 102×29×6 mm
ความยาว 3.0 ถึง 5.0 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 118

4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm
ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 119

4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวดิ่ง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานขนาด 152×43×10 mm
ความยาว 4.0 ถึง 5.0 mที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น 119

4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 76×22×6 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....120

4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 102×29×6 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....120

4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้าง
ที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน PFRP ขนาด 152×43×10 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....121

4.39 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น.....121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.40 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 102×29×6 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....122
4.41 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....122
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของคาน
ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....126
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง
ขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....127
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง
ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....128
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่าง
ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....128
4.46 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลาง
ของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น....129