

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

#### 4.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาบทนี้ได้นำเสนอผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP ประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) และคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (mechanical properties) ของวัสดุ FRP โดยผลการทดสอบดังกล่าวมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะการกำหนดทางทฤษฎีเพื่อใช้ทำนายพฤติกรรมทางกล (mechanical behaviors) และการตอบสนองทางโครงสร้าง (structural responses) จากนั้นกล่าวถึงผลการทดสอบกำลังรับแรงค้ำของคานที่ทำจากวัสดุ FRP หน้าตัดรูปตัวซีในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการนำเสนอเป็นหัวข้อตามลักษณะของจุดรองรับ ได้แก่ จุดรองรับแบบง่าย (simply supported) และจุดรองรับแบบยึดแน่น (fixed-end supported) ผลทดสอบที่ได้ประกอบด้วย ลักษณะเฉพาะ (characteristic) พฤติกรรมทางโครงสร้าง (structural behavior) และลักษณะการวิบัติ (modes of failure) ของคาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีภายใต้แรงค้ำ จากนั้น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กำลังรับแรงค้ำของคาน FRP ที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี LRFD กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

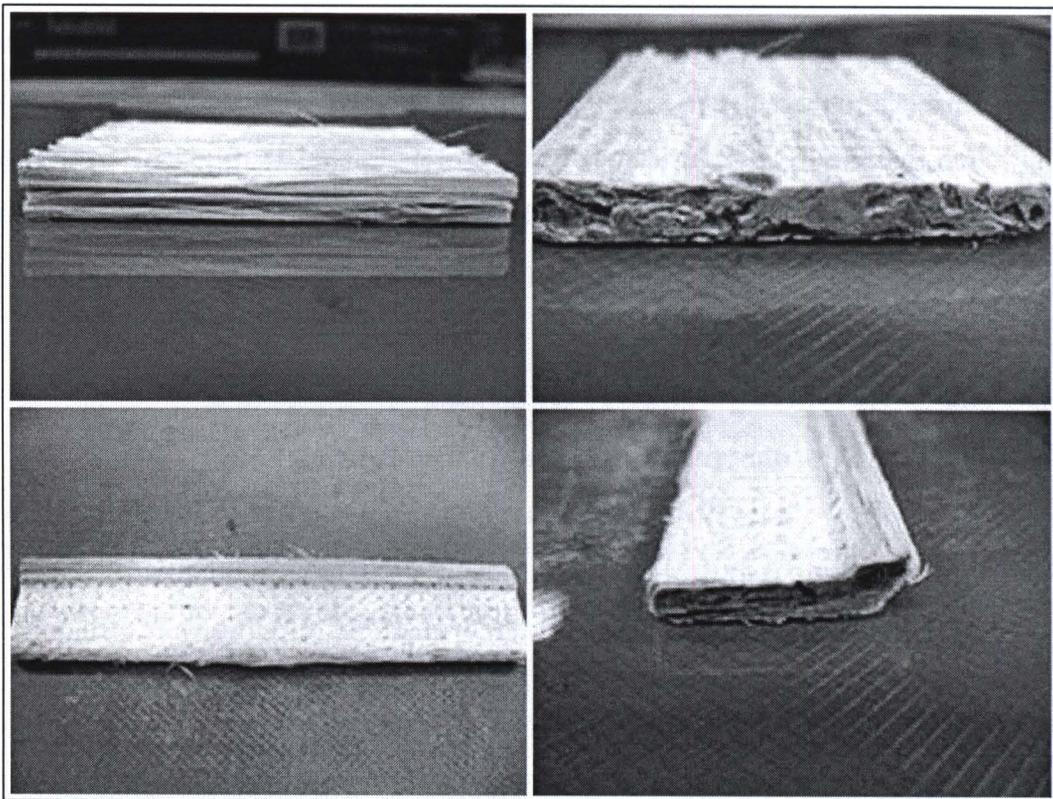
#### 4.2 ผลทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ FRP

##### 4.2.1 ผลการทดสอบปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ FRP

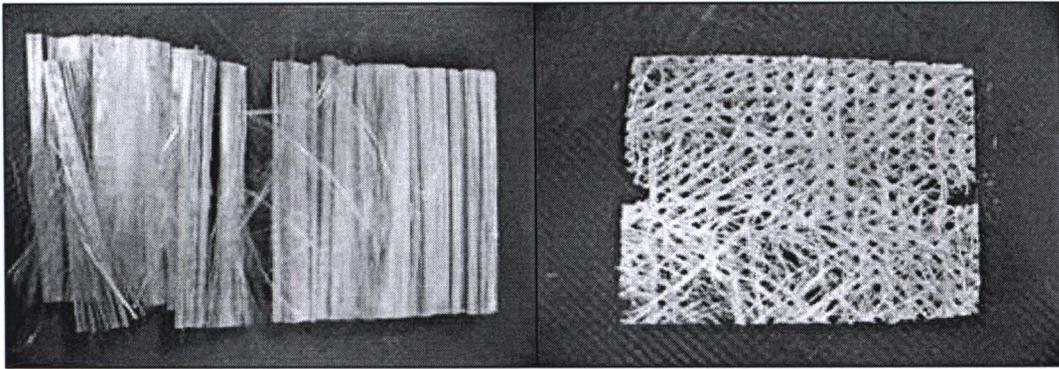
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าผลการทดสอบโดยเฉลี่ยวัสดุ FRP มีปริมาณของใยแก้วเท่ากับ 72.2% โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของเรซินเท่ากับ 27.8% โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้กับปริมาณของใยแก้วที่ใช้ผลิตวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ซึ่งกำหนดอยู่ในช่วงระหว่าง 45-75% โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณใยแก้วของตัวอย่างที่ทดสอบได้มีค่าค่อนข้างมาก แต่อยู่ในช่วงที่กำหนด รูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.2 แสดงการเรียงตัวของใยแก้ว จากรูปพบว่าผิวภายนอกทั้งสองด้านของตัวอย่างเป็นแผ่นผิว (surface veil) ที่มีการวางตัวของใยแก้วโดยไม่มีกานแบบสุ่มทิศทาง (random fiber non-woven filaments) ส่วนภายในมีกลุ่มของเส้นใยแก้ว (continuous strand rovings) เรียงตัวไปในทิศทางตามยาวของชิ้นส่วนโดยไม่มีใยแก้วแบบแผ่น (glass fiber mat) อยู่ภายในชิ้นส่วน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบปริมาณขององค์ประกอบของหน้าตัด

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



รูปที่ 4.1 ลักษณะของส่วนเอวและปีกของวัสดุ FRP หลังจากการเผาเอาเรซินออก

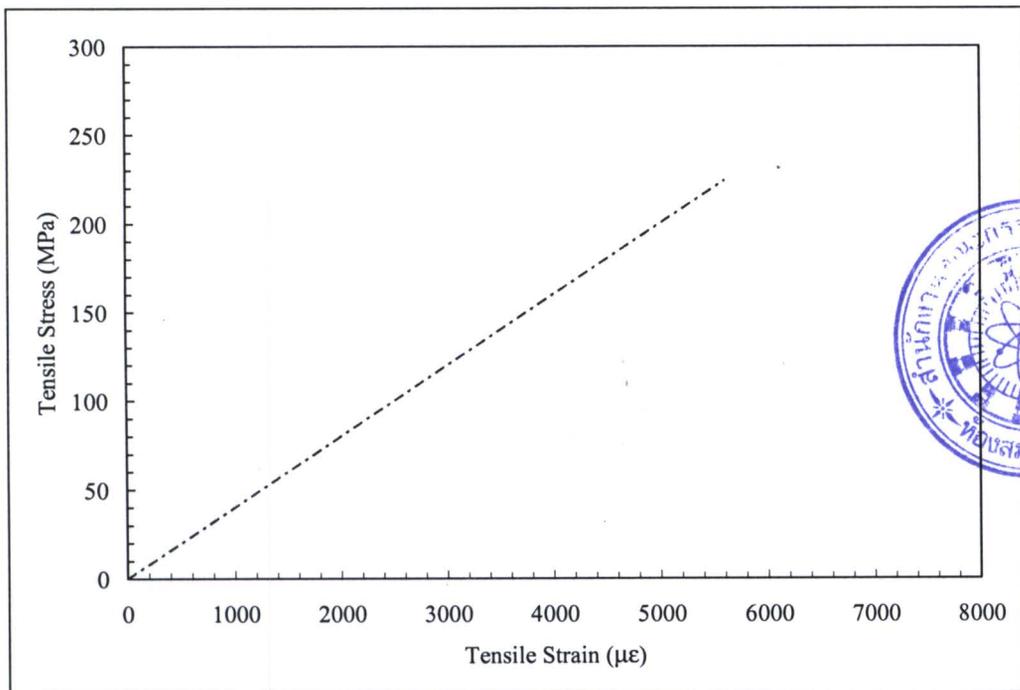


รูปที่ 4.2 ลักษณะการวางตัวของใยแก้วและแผ่นผิวของชิ้นส่วน PFRP

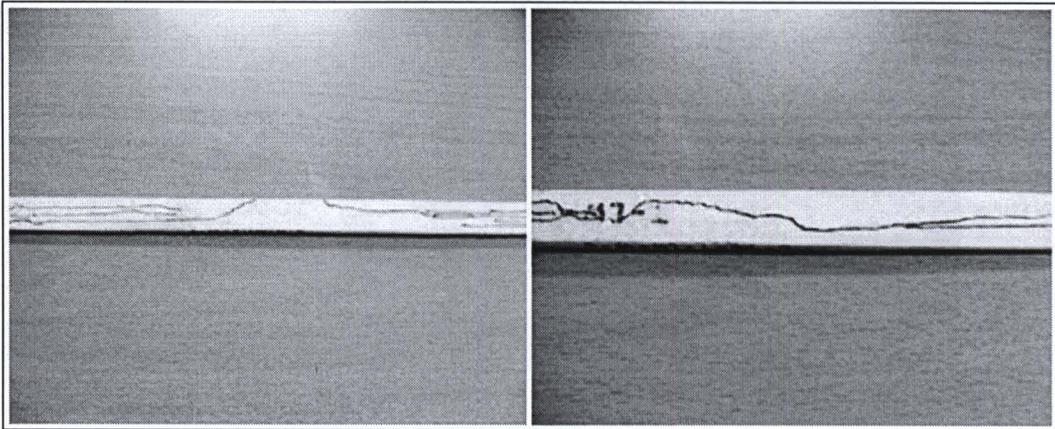
#### 4.2.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ PFRP

##### 4.2.2.1 ผลการทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.4 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใย

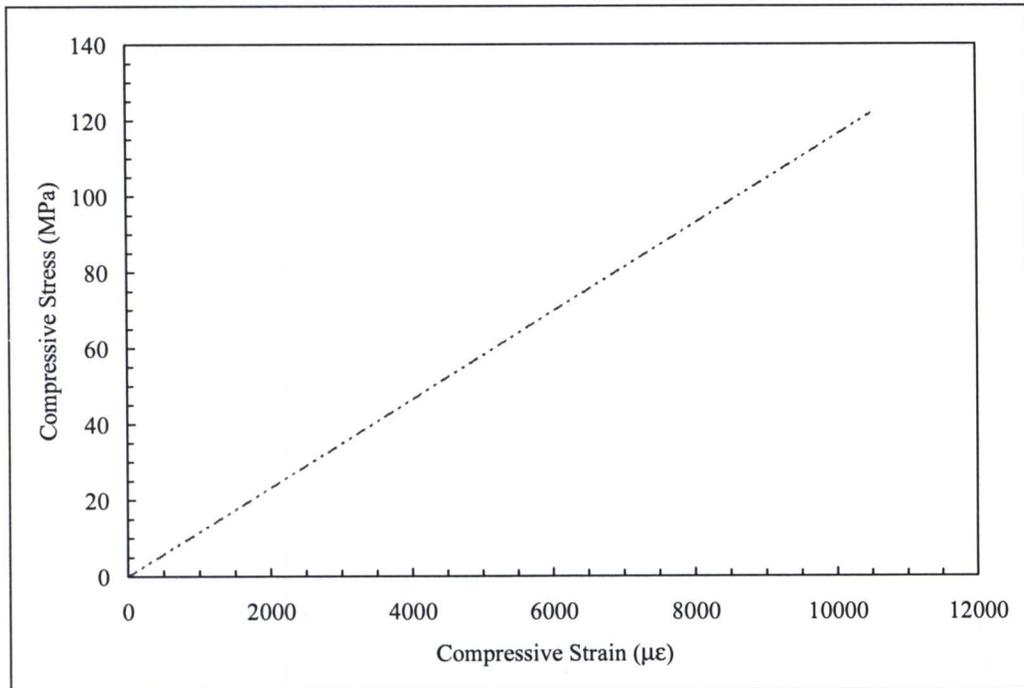
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าหน่วยแรงดึงประลัยของวัสดุ CFRP มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion และ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงของวัสดุ CFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 2.05 เท่า การที่วัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมี โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากมีปริมาณใยแก้วมาก (72.2% โดยน้ำหนัก) และเส้นใยแก้วนั้นมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูงกว่าเรซินประมาณ 18 เท่า (Bank, 2006) ดังนั้นวัสดุ CFRP จึงมีแนวโน้มในการมีโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงสูง

ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ CFRP

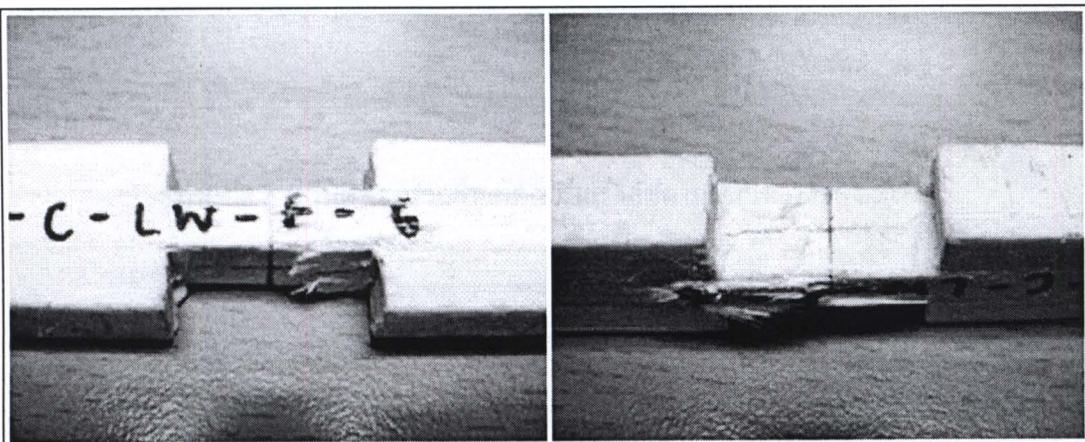
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงดึงประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย (MPa)	224.03	226.90
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงดึงตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย (GPa)	35.20	17.20
ความเครียดที่จุดวิบัติ (mm/mm)	0.0054	-

#### 4.2.2.2 ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) ที่ความเครียดประมาณ  $10,000 \mu\epsilon$  และมีการวิบัติแบบแตกหักโดยฉับพลันดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.6 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย

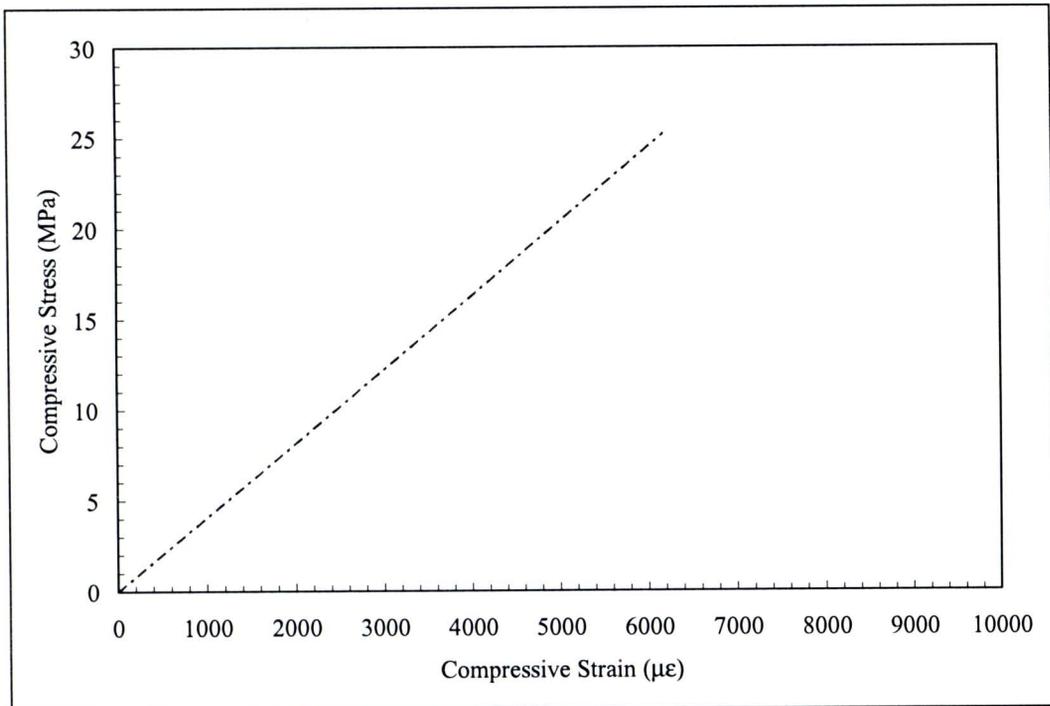
จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ PFRP ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion เท่ากับ 59.91% และ 1.96 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ PFRP ที่ใช้ในงานวิจัยมีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยต่ำกว่าวัสดุของบริษัท Creative Pultrusion เนื่องจากการรับแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใย เส้นใยแก้ว จะเกิดการ โกงเดาะ (buckling) ส่งผลให้เรซินเป็นวัสดุหลักในการรับแรงอัด ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ส่วนผสมของเรซินที่ใช้ในการผลิตคือยคุณภาพ

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ PFRP

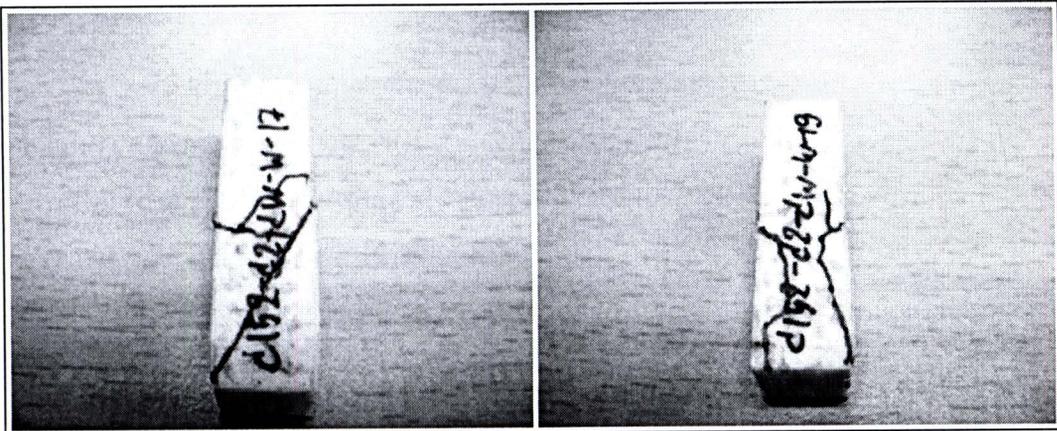
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	121.86 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	10.51 GPa	20.60 GPa

#### 4.2.2.3 ผลการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ PFRP จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย จากรูปพบว่าตัวอย่างเกิดการวิบัติแบบการแตกหัก โดยฉับพลันของเรซินและการเลื่อนของเส้นใย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงอัดตามแนวขวางของเส้นใย



รูปที่ 4.8 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

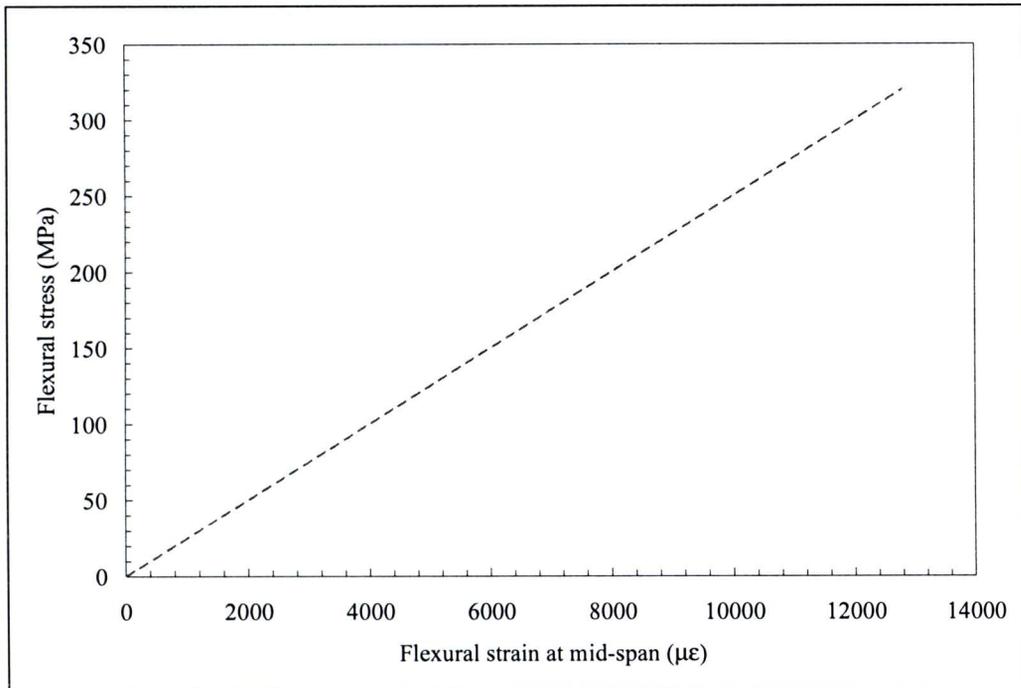
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ CFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยของวัสดุ CFRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าน้อยกว่าของวัสดุ CFRP ของบริษัท Creative Pultrusion, อยู่ 79.55% และ 2.77 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ CFRP มีหน่วยแรงอัดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยต่ำ เนื่องจากภายใต้แรงอัดตั้งฉากเส้นใย เรซินเป็นตัวหลักในการรับแรงกระทำ ส่งผลให้เส้นใยแก้วเกิดการเลื่อนได้ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ตามทิศทางที่รับแรงกระทำ การรับแรงในทิศทางขนานเส้นใยมีกำลังและความแกร่งมากกว่าการรับแรงในทิศทางตั้งฉากเส้นใย แสดงว่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ CFRP ขึ้นอยู่กับทิศทางการวางตัวของเส้นใยแก้วหรือเป็นวัสดุออร์โททรอปิก (orthotropic material)

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบแรงอัดตามแนวขวางของเส้นใย

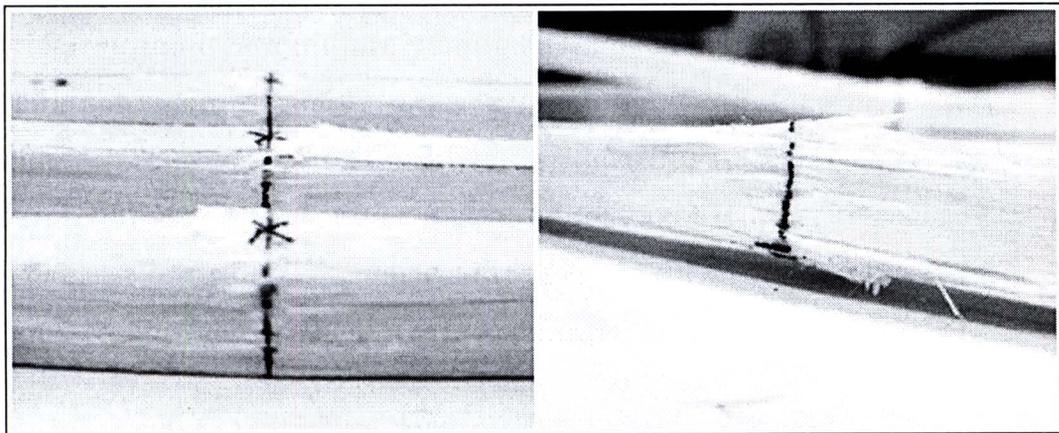
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงอัดประลัยตามแนวขวางของเส้นใยเฉลี่ย	23.19 MPa	113.40 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงอัดตามแนวขวางเส้นใยเฉลี่ย	2.49 GPa	6.90 GPa

#### 4.2.2.4 ผลการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคัตตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าพฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะคล้ายวัสดุเปราะที่มีพฤติกรรมแบบเชิงเส้นตรงจนถึงจุดวิบัติ รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงคัตตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติของตัวอย่างเริ่มต้นจากการวิบัติของเรซิน จากนั้นจึงเกิดการขาดออกของเส้นใยแก้วบริเวณที่รับแรงดึงของตัวอย่างทดสอบในทิศทางขนานกับเส้นใยแก้ว การวิบัติเริ่มจากผิวนอกของตัวอย่างที่มีหน่วยแรงคัตสูงสุด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.10 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงคดตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงคดและ โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ PFRP จากตารางพบว่าหน่วยแรงคดประลัยและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยสำหรับวัสดุ PFRP ที่ใช้ทดสอบมีค่าสูงกว่าของวัสดุ PFRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 104% และ 2.82 เท่า ตามลำดับ สาเหตุที่วัสดุ PFRP มีหน่วยแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงคดตามแนวแกนของเส้นใยสูง เนื่องจากวัสดุ PFRP ที่ใช้

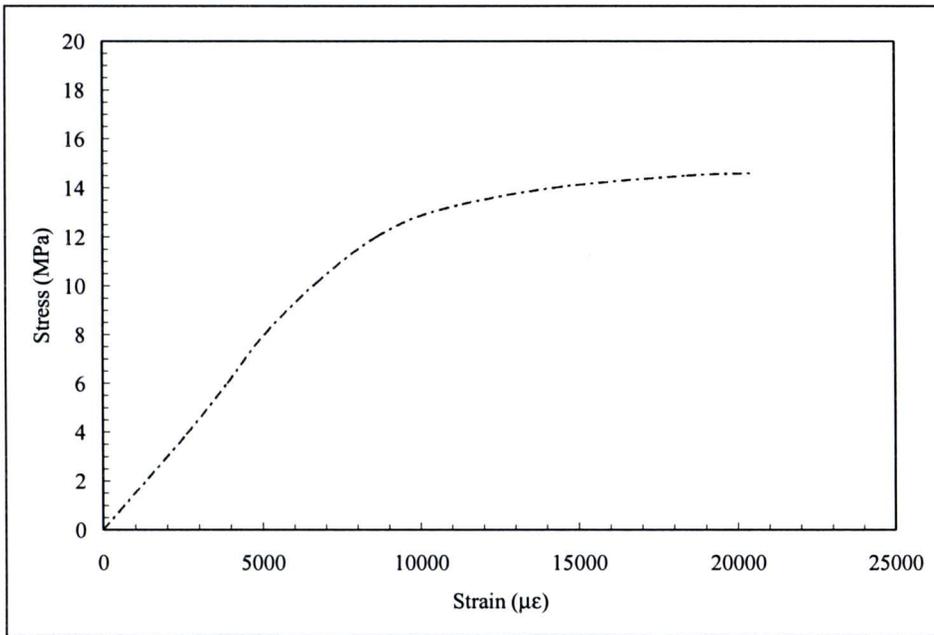
ในงานวิจัยมีปริมาณเส้นใยแก้วสูง ดังนั้นภายใต้แรงค้ำเส้นใยแก้วดังกล่าวทำหน้าที่รับหน่วยแรงดึง และแรงอัดเป็นหลักส่งผลให้กำลังวัสดุที่ทดสอบได้มีค่าสูง

ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบแรงค้ำตามแนวแกนของเส้นใย

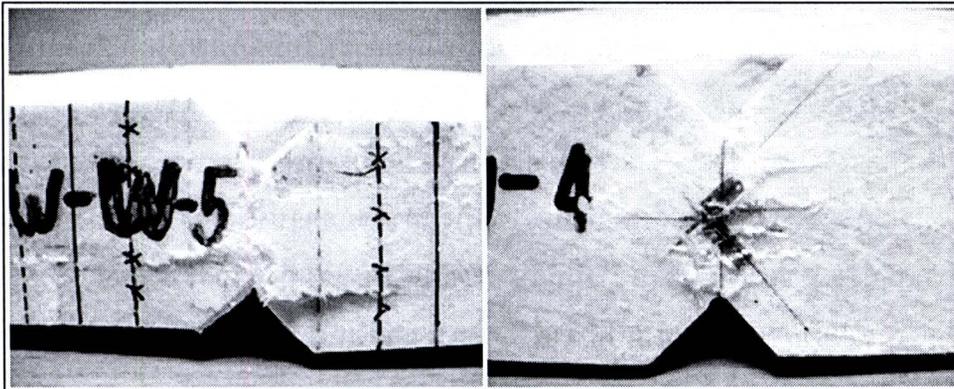
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion
หน่วยแรงค้ำประลัยตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	509.73 MPa	226.90 MPa
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	31.07 GPa	11.00 GPa

#### 4.2.2.5 ผลการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ของหน่วยแรงเฉือนและความเครียดเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าในช่วงแรก พฤติกรรมของวัสดุมีลักษณะแบบเชิงเส้นตรงจนใกล้ถึงหน่วยแรงเฉือนสูงสุด จากนั้นช่วงที่สอง พฤติกรรมของตัวอย่างสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ หน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าลดลงแต่ตัวอย่างยังสามารถรับแรงต่อไปได้ หรือหน่วยแรงเฉือนของวัสดุมีค่าคงที่ โดยความเครียดที่บันทึกได้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมาตรงความเครียดเกิดการหลุดร่อน การตรวจสอบลักษณะวิบัติของตัวอย่างใช้การสังเกตขณะทดสอบร่วมกับการเปลี่ยนแปลงโดยฉับพลันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดเฉือน วัสดุเหนียวบางประเภทอาจไม่เกิดการวิบัติแบบเฉือนเพียงอย่างเดียว แต่อาจเกิดการวิบัติหลายแบบร่วมกัน (ASTM D5379-05, 2005) รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะการวิบัติของตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย จากรูปพบว่าการวิบัติเริ่มต้นจากการแตกของเรซินตามทิศทางขนานกับเส้นใยแก้วบริเวณที่บากเป็นรูปตัววี (v-notched) จากนั้นรอยแตกจะเคลื่อนเข้าใกล้กับบริเวณจุดรองรับ ส่งผลให้ตัวอย่างเกิดการเลื่อนออกจากกัน ในแนวตั้งตามแนวบากรูปตัววี



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงและความเครียดตามแนวแกนของเส้นใย



รูปที่ 4.12 การวิบัติของตัวอย่างทดสอบแรงเค้นตามแนวแกนของเส้นใย

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงเค้นและ โมดูลัสแรงเค้นตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ยของวัสดุ FRP จากตารางพบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นเค้นตามแนวแกนของเส้นใยของวัสดุ FRP ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าสูงกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion ประมาณ 0.75 เท่า อย่างไรก็ตาม กำลังรับแรงของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการรับแรงเค้น โดยวัสดุ FRP ที่ใช้ในงานวิจัย มีปริมาณของสัดส่วนเรซินที่ต่ำ (27.8%) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงเค้นมีค่าต่ำกว่าวัสดุ FRP ของบริษัท Creative Pultrusion

ตารางที่ 4.6 ผลทดสอบแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใย

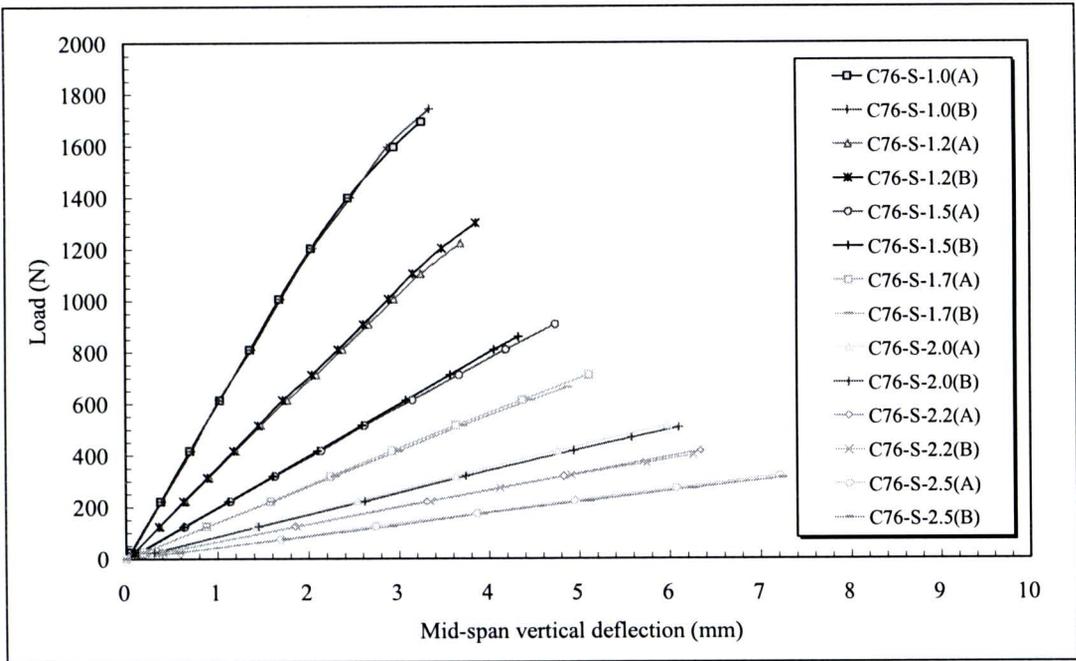
คุณสมบัติทางกล	ผลทดสอบ	Creative Pultrusion (Full section)
หน่วยแรงเฉือนสูงสุดตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	37.27 MPa	-
โมดูลัสแรงเฉือนตามแนวแกนของเส้นใยเฉลี่ย	2.18 GPa	2.9 GPa

### 4.3 คาน FRP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจูดรองรับแบบง่าย

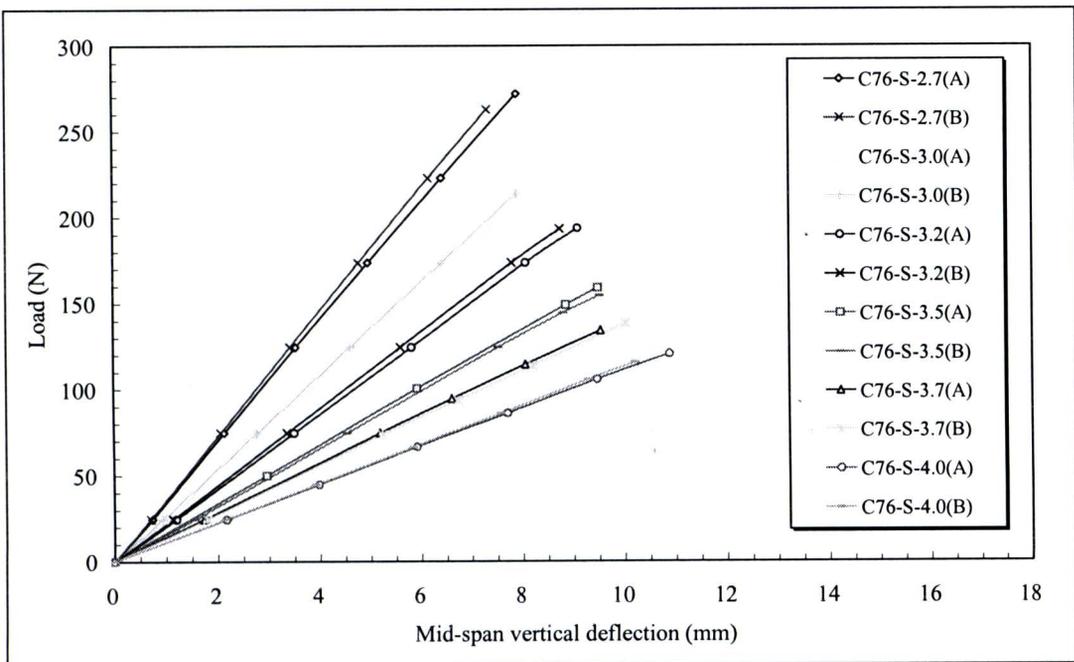
#### 4.3.1 พฤติกรรมการรับแรงคัตของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย

รูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวคิงที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน  $L/d < 20$  ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวในแนวคิงที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 60-80% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน  $L/d \geq 20$  พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure) ในทางตรงกันข้าม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวคิง รูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจูดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ

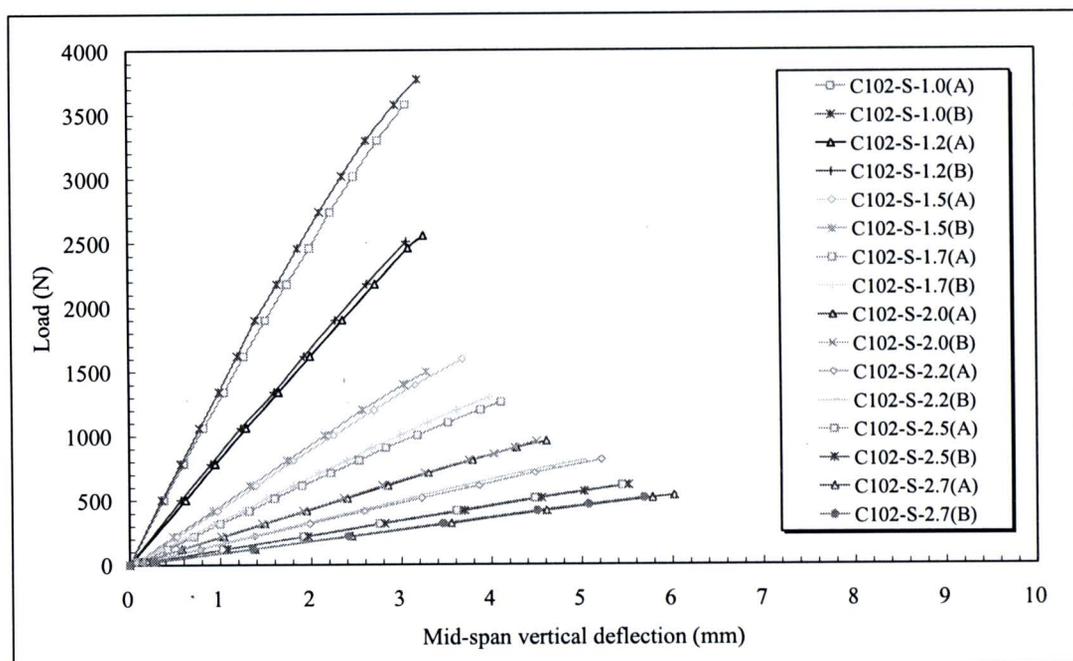
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคานที่มีจูดรองรับแบบง่ายมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวคิงและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน FRP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



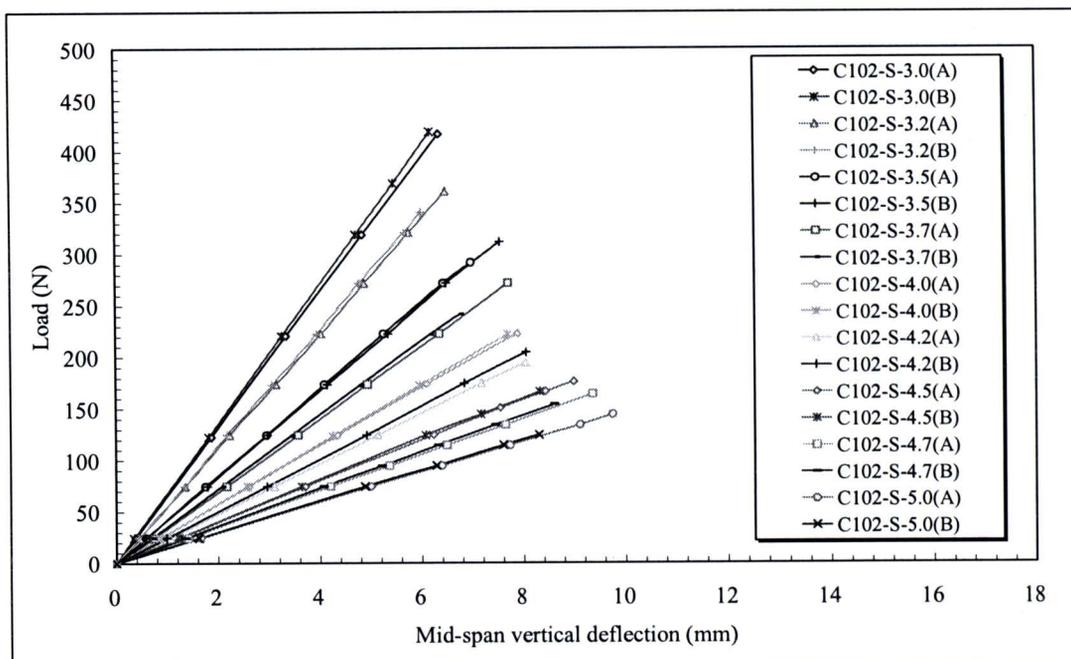
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 2.5 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



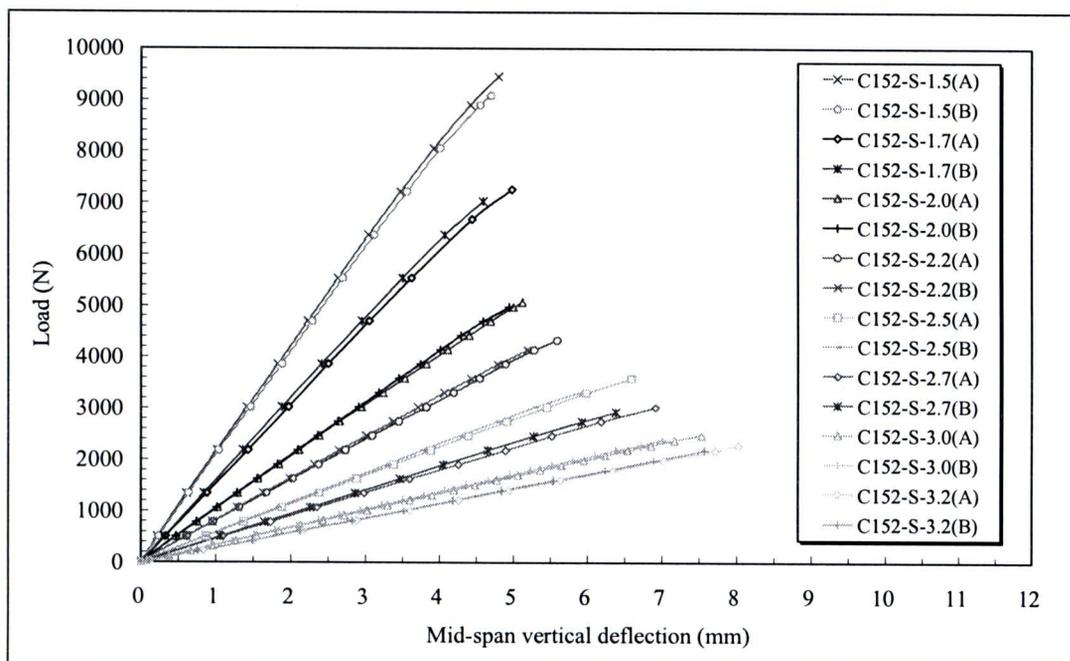
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 2.7 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



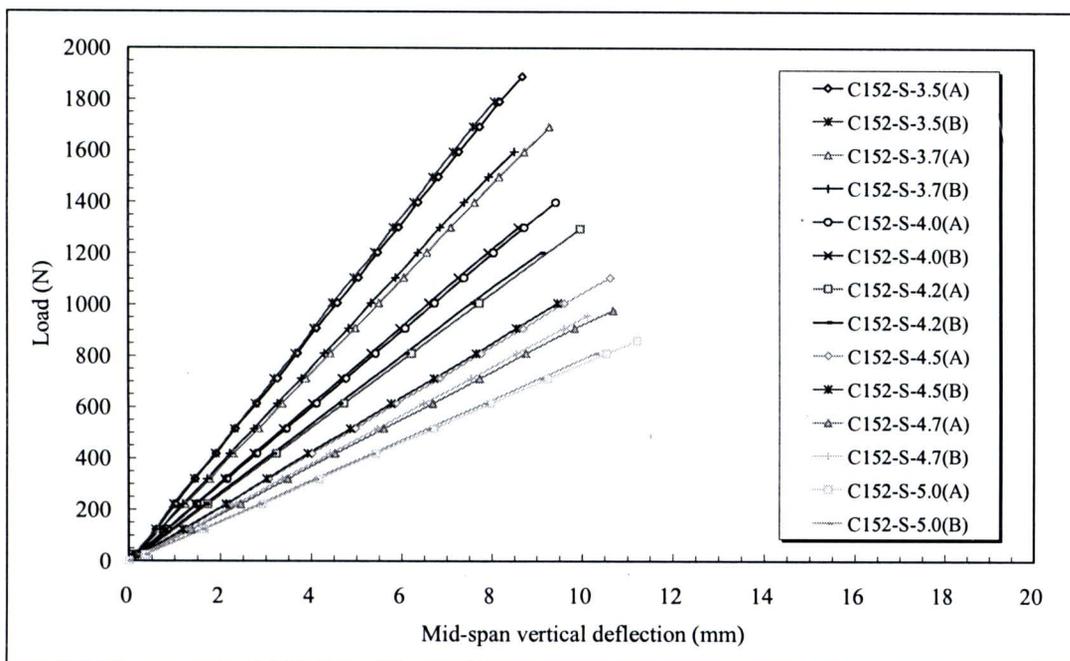
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



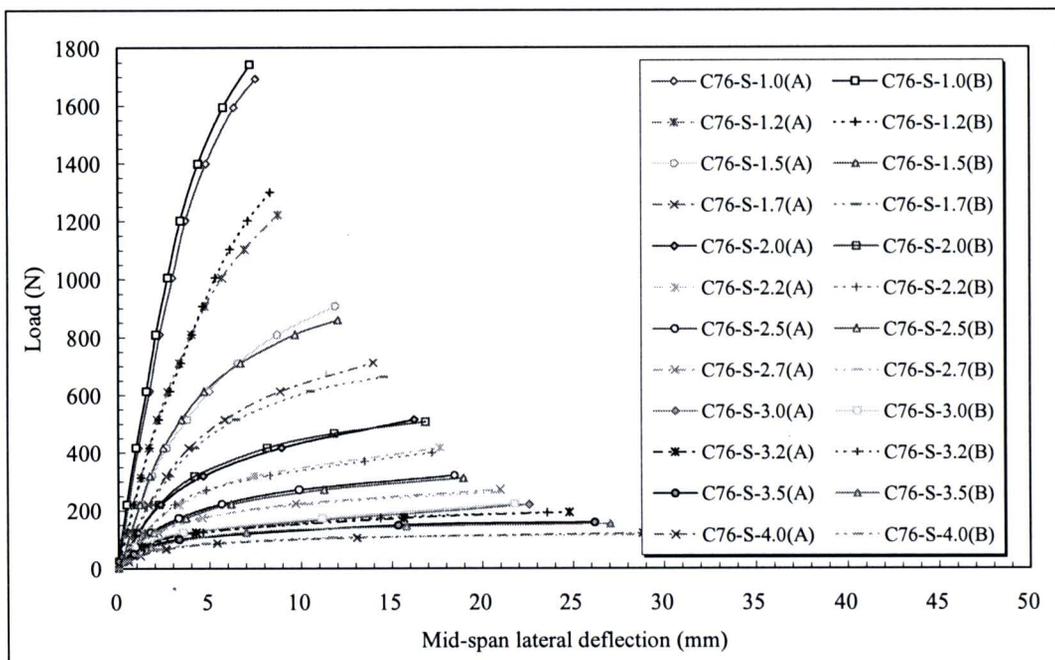
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



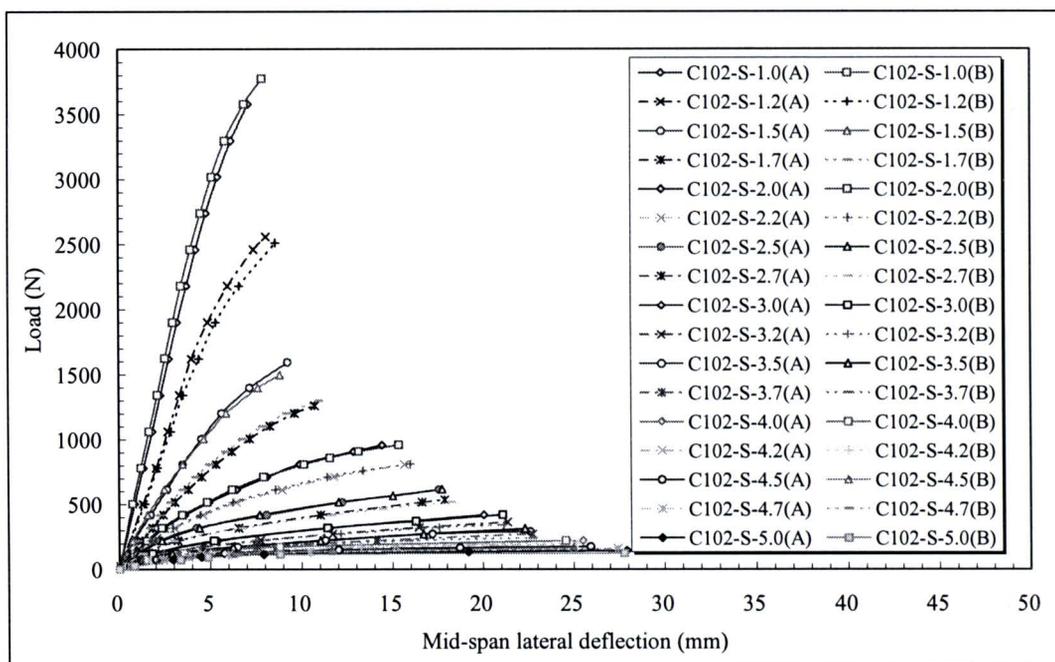
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ความยาว 1.5 ถึง 3.2 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



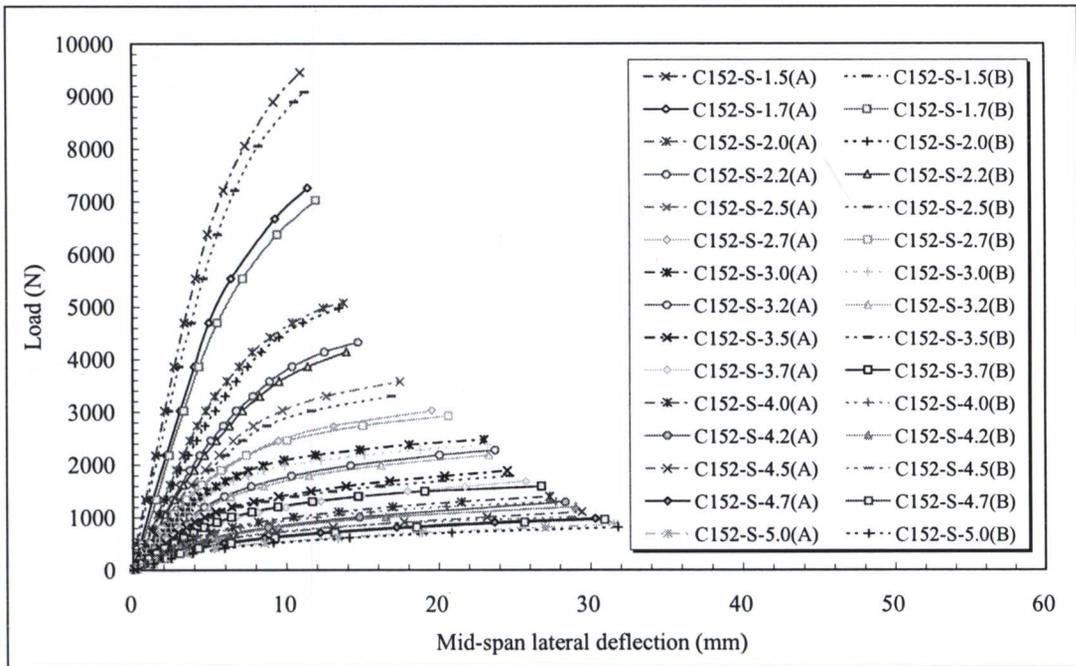
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ความยาว 3.5 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



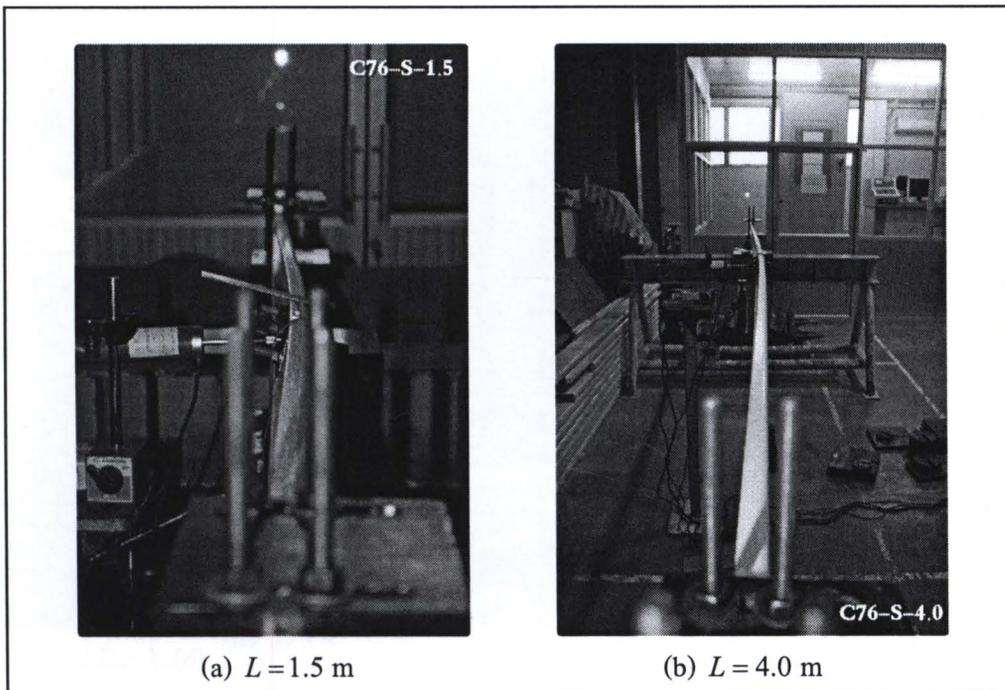
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



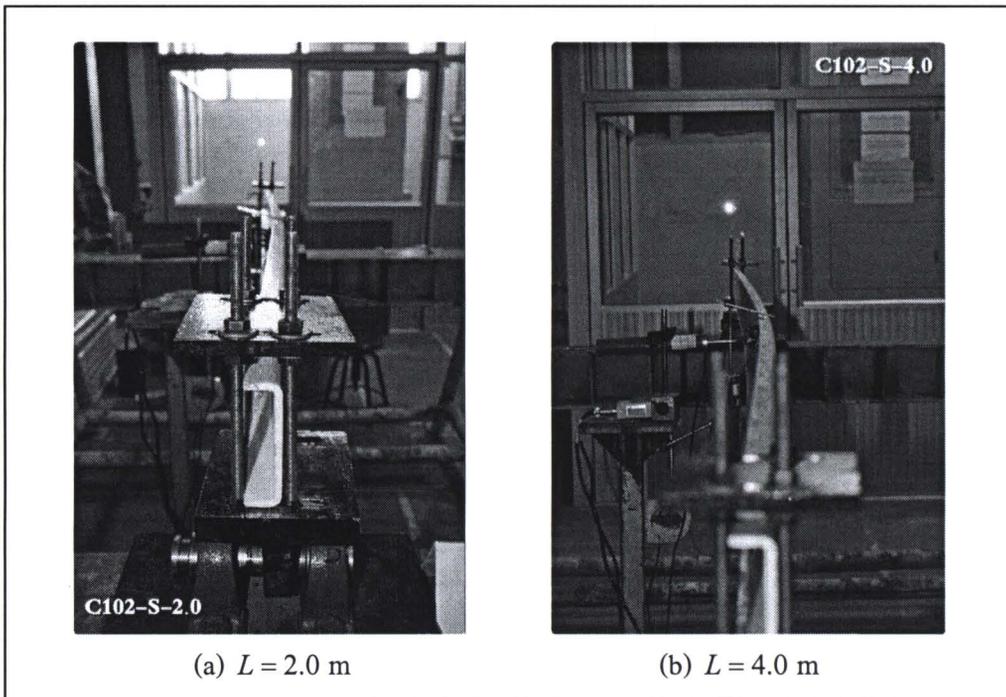
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



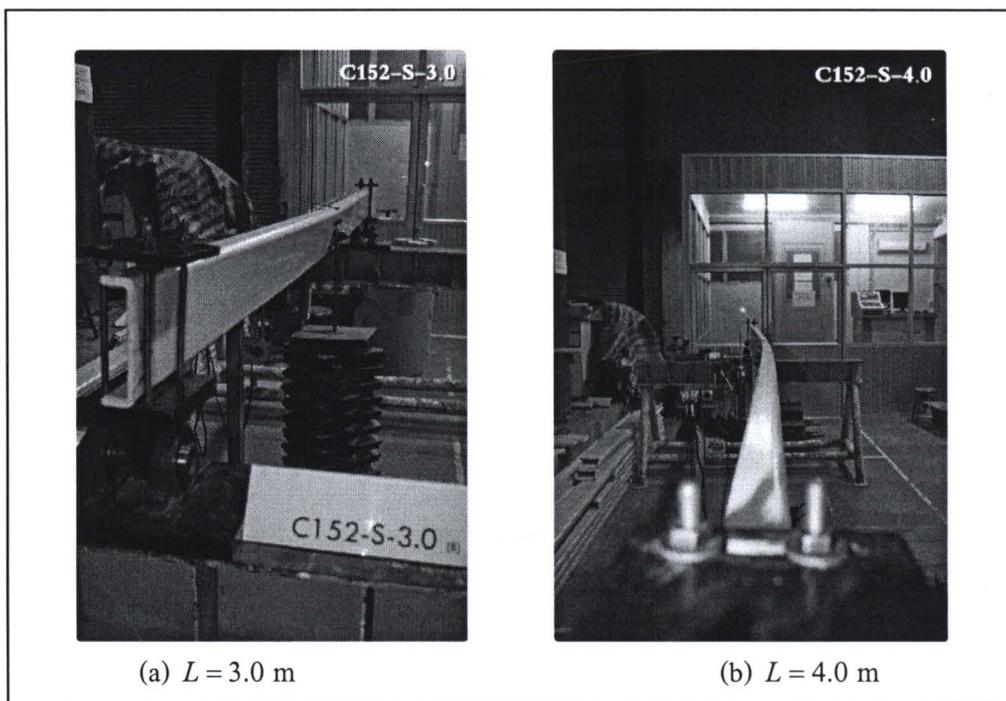
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.22 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.23 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.24 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

### 4.3.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย

ตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบง่ายสำหรับตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{cr,EXP}$ ) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด  $152 \times 43 \times 10$  mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด  $102 \times 29 \times 6$  และ  $76 \times 22 \times 6$  mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

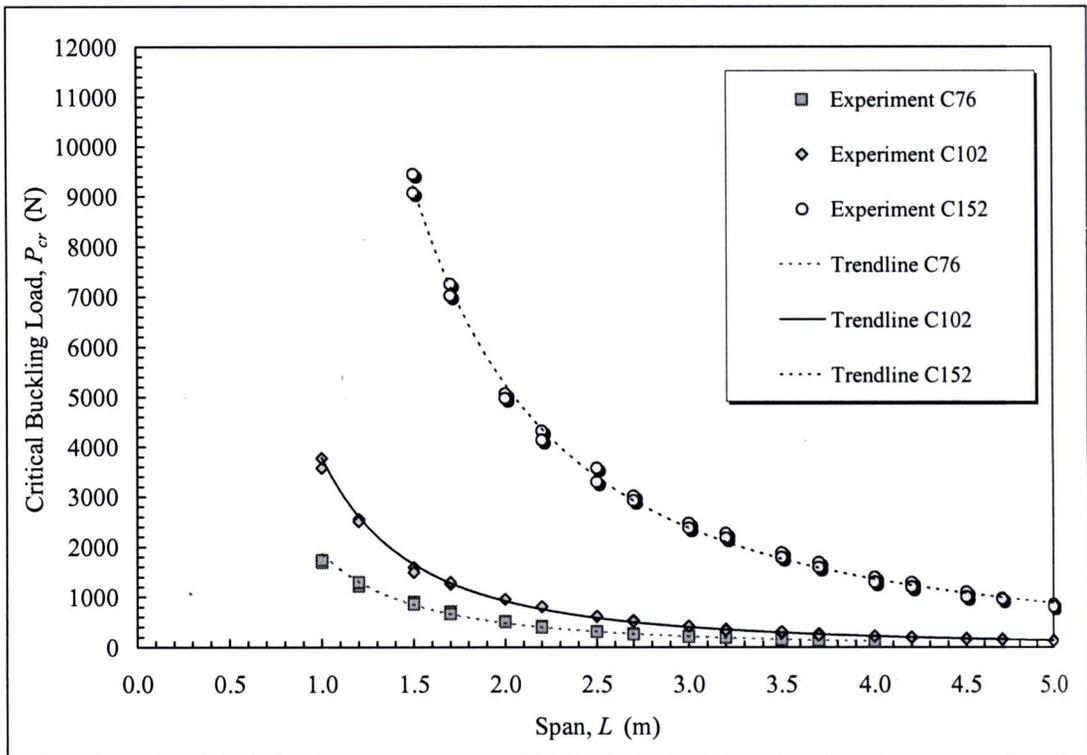
Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$L$ (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-S-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	1692.3	1742.3	1717.3
C76-S-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	1221.8	1299.9	1260.9
C76-S-1.5	$76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

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบตัวอย่างกานขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$L$ (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C102-S-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	3577.9	3774.1	3676.0
C102-S-1.2	$102 \times 29 \times 6$	1.2	2557.6	2510.0	2533.8
C102-S-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	1594.2	1496.1	1545.2
C102-S-1.7	$102 \times 29 \times 6$	1.7	1262.0	1299.9	1281.0
C102-S-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	957.5	959.4	958.5
C102-S-2.2	$102 \times 29 \times 6$	2.2	809.4	811.3	810.4
C102-S-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	613.2	615.1	614.2
C102-S-2.7	$102 \times 29 \times 6$	2.7	534.7	517.0	525.9
C102-S-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	417.0	418.9	418.0
C102-S-3.2	$102 \times 29 \times 6$	3.2	361.0	340.6	350.8
C102-S-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	291.9	311.9	301.9
C102-S-3.7	$102 \times 29 \times 6$	3.7	271.9	241.9	256.9
C102-S-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	222.8	221.9	222.4
C102-S-4.2	$102 \times 29 \times 6$	4.2	194.6	204.6	199.6
C102-S-4.5	$102 \times 29 \times 6$	4.5	176.2	166.6	171.4
C102-S-4.7	$102 \times 29 \times 6$	4.7	164.2	154.2	159.2
C102-S-5.0	$102 \times 29 \times 6$	5.0	144.2	124.6	134.4

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$L$ (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C152-S-1.5	152 $\times$ 43 $\times$ 10	1.5	9449.5	9076.7	9263.1
C152-S-1.7	152 $\times$ 43 $\times$ 10	1.7	7256.8	7026.3	7141.6
C152-S-2.0	152 $\times$ 43 $\times$ 10	2.0	5069.1	4975.9	5022.5
C152-S-2.2	152 $\times$ 43 $\times$ 10	2.2	4323.5	4137.1	4230.3
C152-S-2.5	152 $\times$ 43 $\times$ 10	2.5	3577.7	3298.3	3438.0
C152-S-2.7	152 $\times$ 43 $\times$ 10	2.7	3018.7	2925.5	2972.1
C152-S-3.0	152 $\times$ 43 $\times$ 10	3.0	2477.1	2379.0	2428.1
C152-S-3.2	152 $\times$ 43 $\times$ 10	3.2	2276.0	2182.8	2229.4
C152-S-3.5	152 $\times$ 43 $\times$ 10	3.5	1888.5	1790.4	1839.5
C152-S-3.7	152 $\times$ 43 $\times$ 10	3.7	1692.3	1594.2	1643.3
C152-S-4.0	152 $\times$ 43 $\times$ 10	4.0	1398.0	1299.9	1349.0
C152-S-4.2	152 $\times$ 43 $\times$ 10	4.2	1295.0	1201.8	1248.4
C152-S-4.5	152 $\times$ 43 $\times$ 10	4.5	1103.7	1005.6	1054.7
C152-S-4.7	152 $\times$ 43 $\times$ 10	4.7	977.5	957.5	967.5
C152-S-5.0	152 $\times$ 43 $\times$ 10	5.0	859.4	809.4	834.4

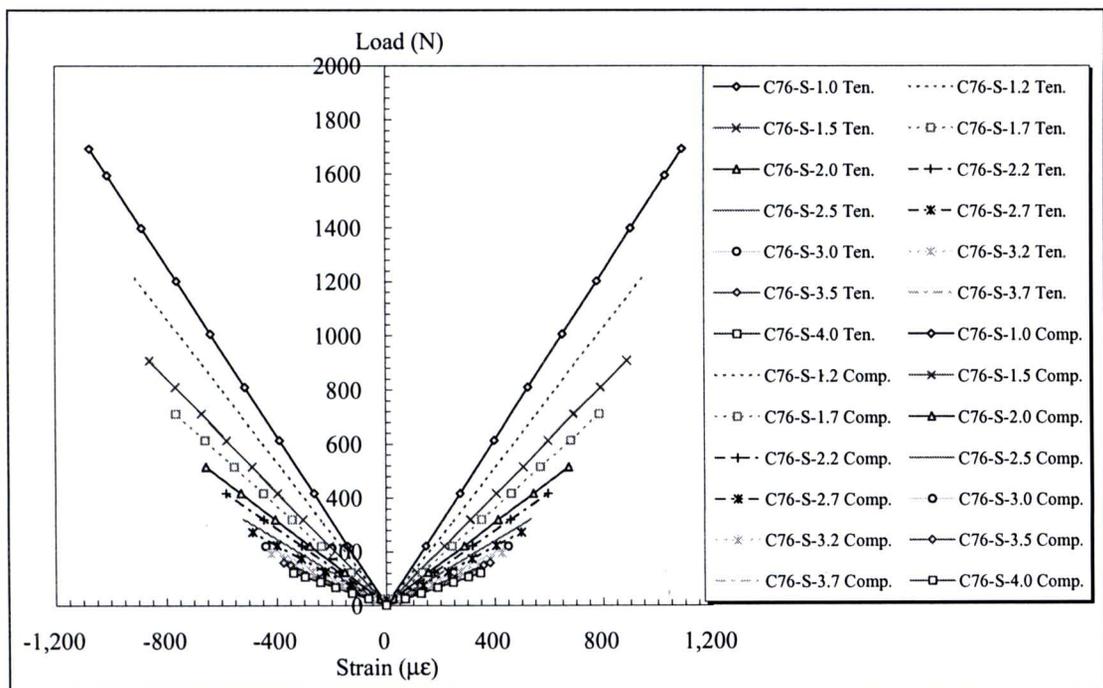


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเคาะและความยาวของตัวอย่างคาน PFRP ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

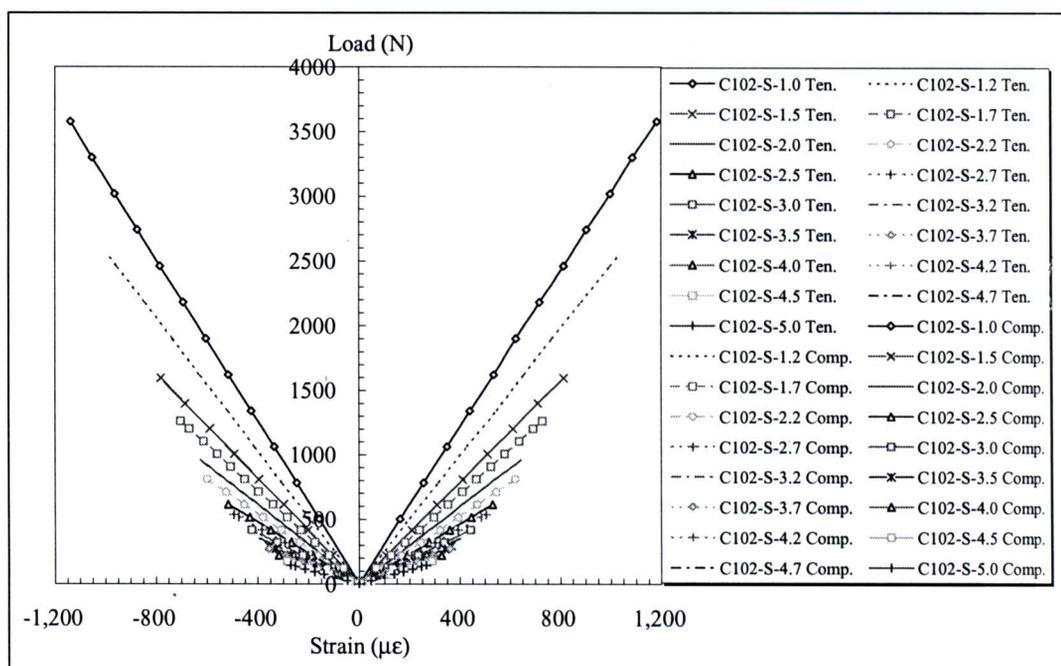
### 4.3.3 ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย

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

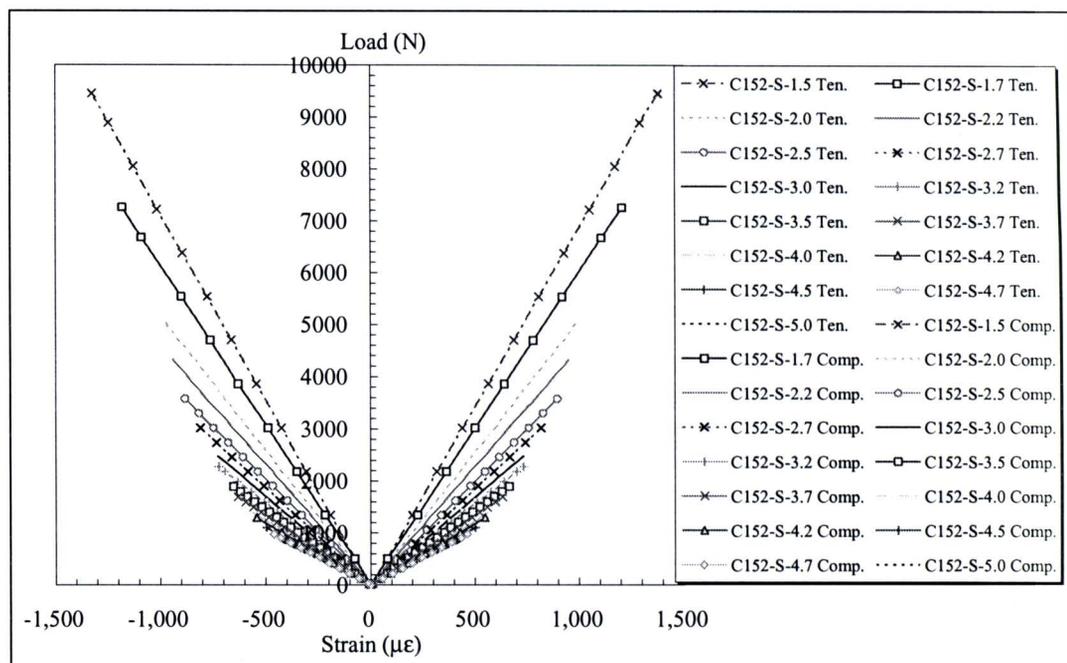
รูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าอยู่ระหว่าง  $500-1,200 \mu\epsilon$  ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

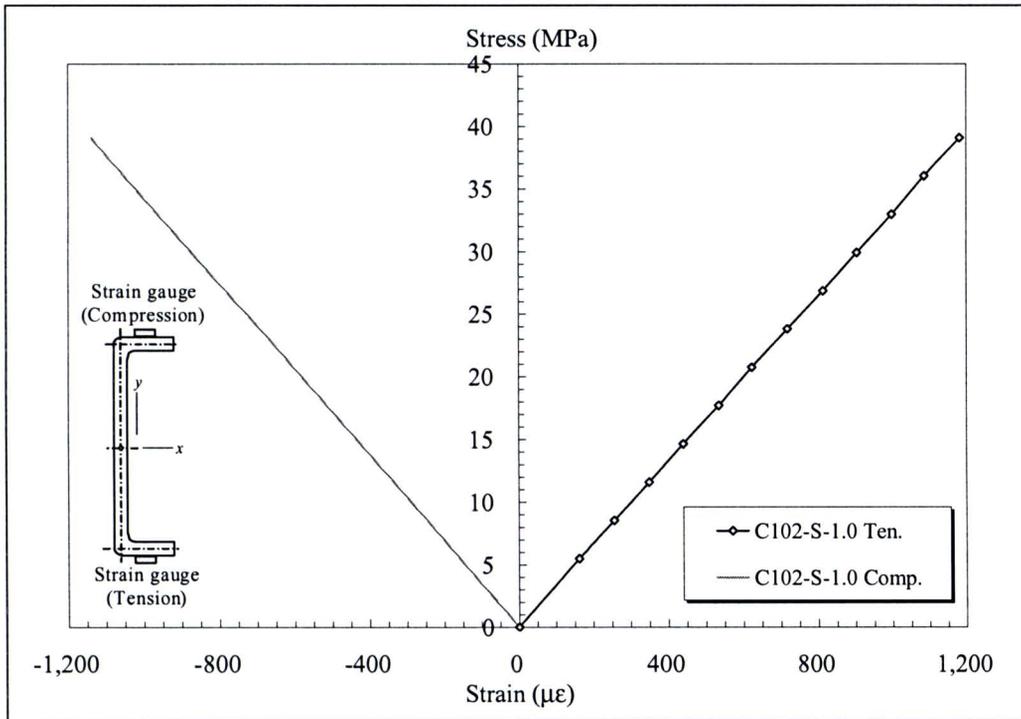


รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง  
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง  
ของตัวอย่างคาน FRP ขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

รูปที่ 4.29 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.1 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน CFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่าย

#### 4.3.4 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเคาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบง่าย

สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบง่ายภายใต้แรงกระทำที่กึ่งกลางตัวอย่างทดสอบ น้ำหนักโก่งเคาะที่ทดสอบได้ ( $P_{cr,EXP}$ ) สามารถเปลี่ยนกลับเป็นค่าโมเมนต์โก่งเคาะที่ได้จากการทดสอบ ( $M_{cr,EXP}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L / 4 \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบ โมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและ โมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $M_{cr,LRFD}$ ) สำหรับคาน PFRP ที่มีจุกรองรับแบบง่ายสามารถคำนวณค่า  $M_{cr,LRFD}$  ได้จากสมการที่ (3.4) จากตารางพบว่าหากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเคาะที่ได้จากการทดสอบ ( $M_{cr,EXP}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและ โมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.88-1.05 สำหรับคานที่มีอัตราส่วน  $L/d \geq 20$  อัตราส่วน  $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.01-1.05 แสดงให้เห็นว่า โมเมนต์โก่งเคาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย อย่างไรก็ตาม คานที่มีอัตราส่วน  $L/d < 20$  อัตราส่วน  $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.88-0.99 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเคาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเคาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเคาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	$L/d$	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C76-S-1.0	13.2	423.1	435.6	429.3	484.4	0.89
C76-S-1.2	15.8	366.5	390.0	378.3	419.1	0.90
C76-S-1.5	19.7	340.3	322.3	331.3	335.2	0.99
C76-S-1.7	22.4	302.3	281.9	292.1	289.5	1.01
C76-S-2.0	26.3	257.6	253.5	255.5	240.7	1.06
C76-S-2.2	28.9	229.4	219.9	224.6	216.6	1.04
C76-S-2.5	32.9	200.6	194.9	197.7	188.5	1.05
C76-S-2.7	35.5	183.5	177.4	180.5	173.6	1.04
C76-S-3.0	39.5	165.6	160.3	162.9	155.2	1.05
C76-S-3.2	42.1	155.0	154.6	154.8	145.0	1.07
C76-S-3.5	46.1	139.2	135.3	137.2	132.1	1.04
C76-S-3.7	48.7	124.1	127.9	126.0	124.7	1.01
C76-S-4.0	52.6	120.8	115.8	118.3	115.0	1.03

ตารางที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD  
ของคาน FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบง่าย

Specimens	$L/d$	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C102-S-1.0	9.8	894.5	943.5	919.0	1035.8	0.89
C102-S-1.2	11.8	767.3	753.0	760.1	869.1	0.87
C102-S-1.5	14.7	597.8	561.0	579.4	686.0	0.88
C102-S-1.7	16.7	536.4	552.5	544.4	600.5	0.91
C102-S-2.0	19.6	478.8	479.7	479.2	494.1	0.97
C102-S-2.2	21.6	445.2	446.2	445.7	437.4	1.02
C102-S-2.5	24.5	383.3	384.4	383.8	373.4	1.03
C102-S-2.7	26.5	360.9	349.0	354.9	340.4	1.04
C102-S-3.0	29.4	312.8	314.2	313.5	300.8	1.04
C102-S-3.2	31.4	288.8	272.5	280.6	279.3	1.00
C102-S-3.5	34.3	255.4	272.9	264.2	252.4	1.05
C102-S-3.7	36.3	251.5	223.8	237.6	237.2	1.00
C102-S-4.0	39.2	222.8	221.9	222.4	217.6	1.02
C102-S-4.2	41.2	204.3	214.8	209.6	206.3	1.02
C102-S-4.5	44.1	198.2	187.4	192.8	191.5	1.01
C102-S-4.7	46.1	192.9	181.2	187.1	182.8	1.02
C102-S-5.0	49.0	180.3	155.8	168.0	171.1	0.98

ตารางที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

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

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

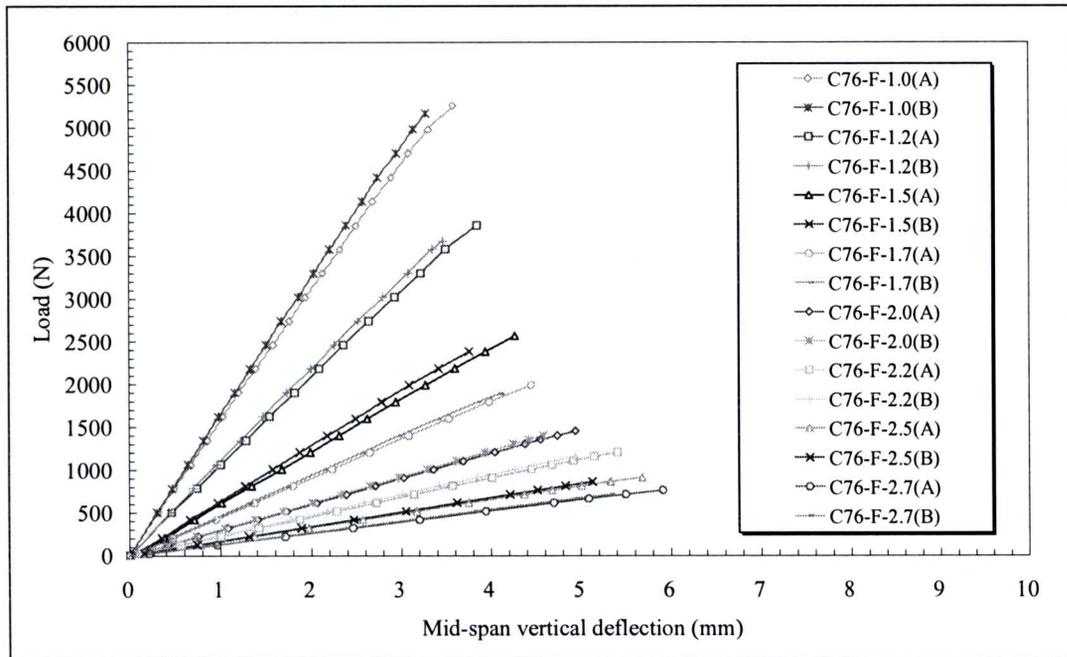
#### 4.4 คาน FRFP หน้าตัดรูปตัวซีที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น

##### 4.4.1 พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น

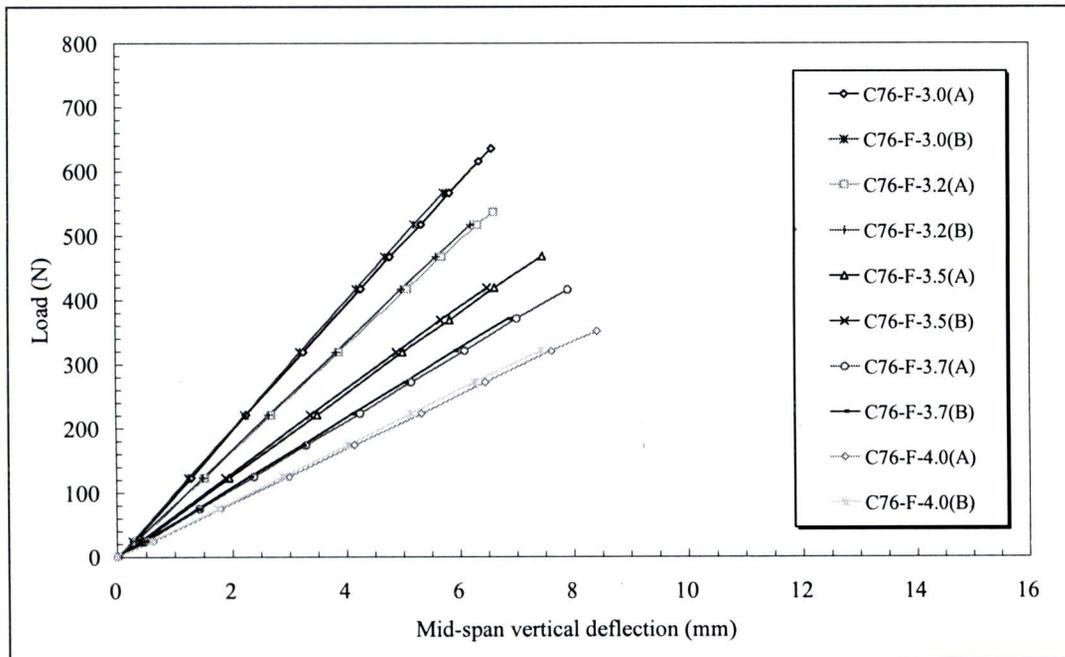
รูปที่ 4.30 ถึงรูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าสำหรับคานที่มีอัตราส่วน  $L/d < 20$  ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 80-90% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นพฤติกรรมของตัวอย่างทดสอบจะเปลี่ยนแปลงเป็นแบบไร้เชิงเส้นเล็กน้อย จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ สำหรับคานยาวที่มีอัตราส่วน  $L/d \geq 20$  พฤติกรรมการรับแรงของคานมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 90-95% ของน้ำหนักโก่งเดาะหรือมีลักษณะใกล้เคียงแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ (linear elastic to failure)

อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมรับแรงแนวตั้ง รูปที่ 4.36 ถึงรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของคานที่มีจูดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าพฤติกรรมรับแรงทางด้านข้างมีลักษณะเป็นเชิงเส้นจนถึงค่าประมาณ 50-60% ของน้ำหนักโก่งเดาะ จากนั้นความชันของเส้นกราฟจะค่อย ๆ ลดลงแบบไร้เชิงเส้นตรง จนกระทั่งเกิดการวิบัติ

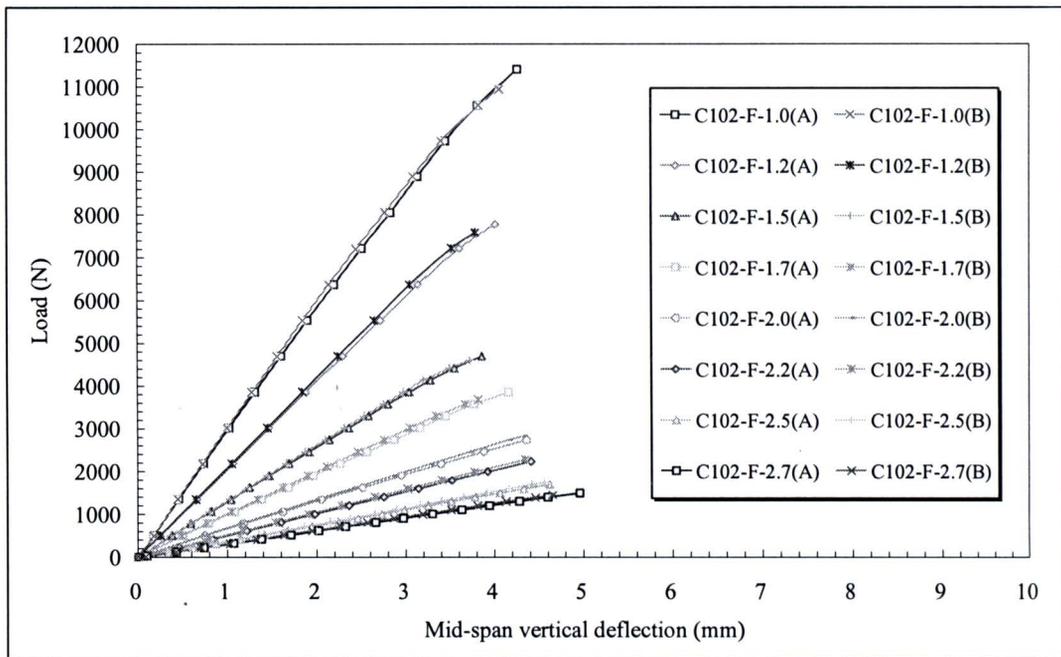
ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างที่มีจูดรองรับยึดแน่นมีลักษณะแบบการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิด (lateral-torsional buckling) ซึ่งเกิดจากการแอ่นตัวแนวตั้งและการแอ่นตัวด้านข้างในเวลาเดียวกัน ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างในกลุ่มนี้แตกต่างจากลักษณะการวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่มีจูดรองรับแบบง่าย กล่าวคือ บริเวณจูดรองรับถึงจุดคดกลับ (inflection point) หรือความยาวประมาณ  $L/6$  จากจูดรองรับทั้งสองด้านจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ค่อนข้างน้อย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.39 ถึงรูปที่ 4.41 จากการทดสอบไม่พบการวิบัติโดยกำลังของวัสดุ (material failure) และการโก่งเดาะเฉพาะที่ (local buckling) บริเวณปีกและเอวของหน้าตัด ดังนั้นลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวอย่างทดสอบขึ้นกับความยาวของตัวอย่าง โดยตัวอย่างคาน FRFP ที่มีความยาวมากกว่าจะมีแนวโน้มของการโก่งเดาะด้านข้างเนื่องจากการบิดเด่นชัดกว่าตัวอย่างที่มีความยาวสั้น



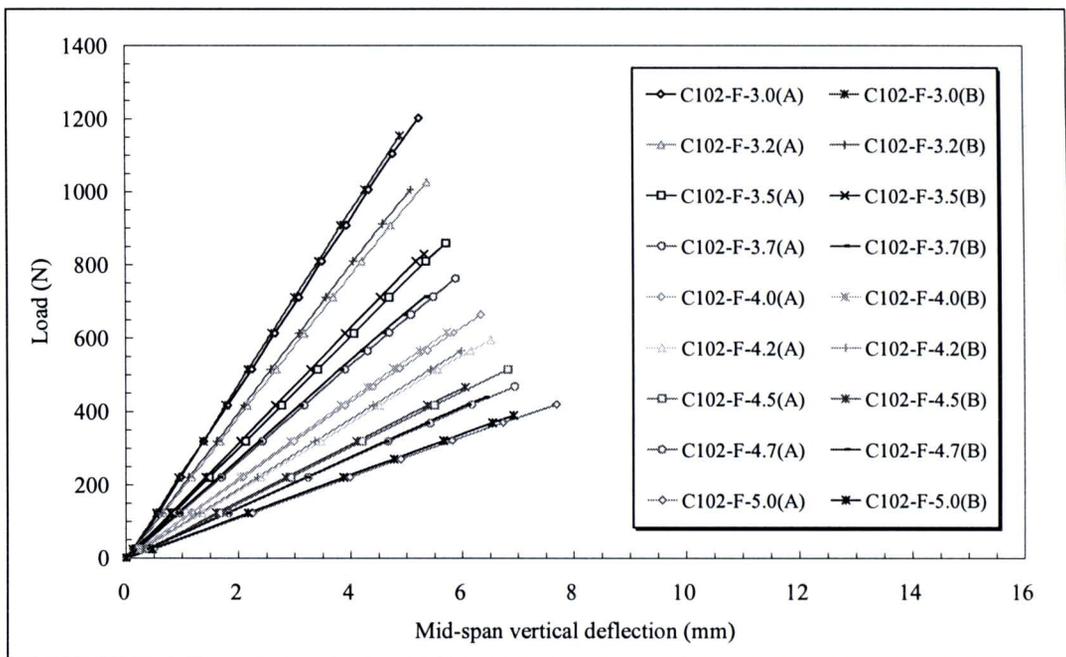
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



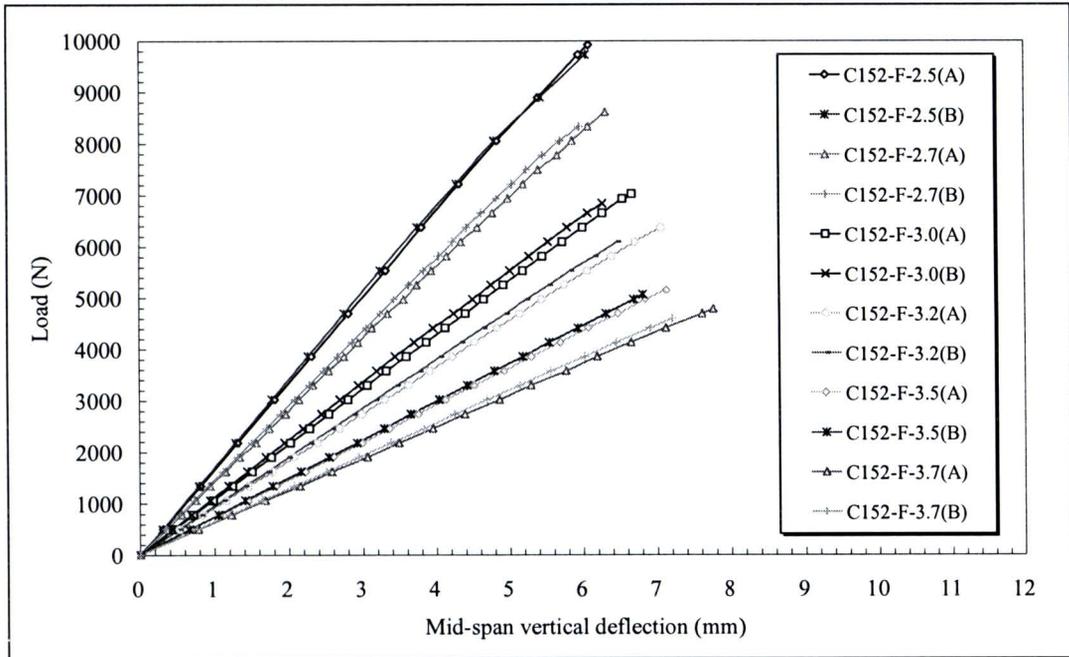
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ความยาว 3.0 ถึง 4.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



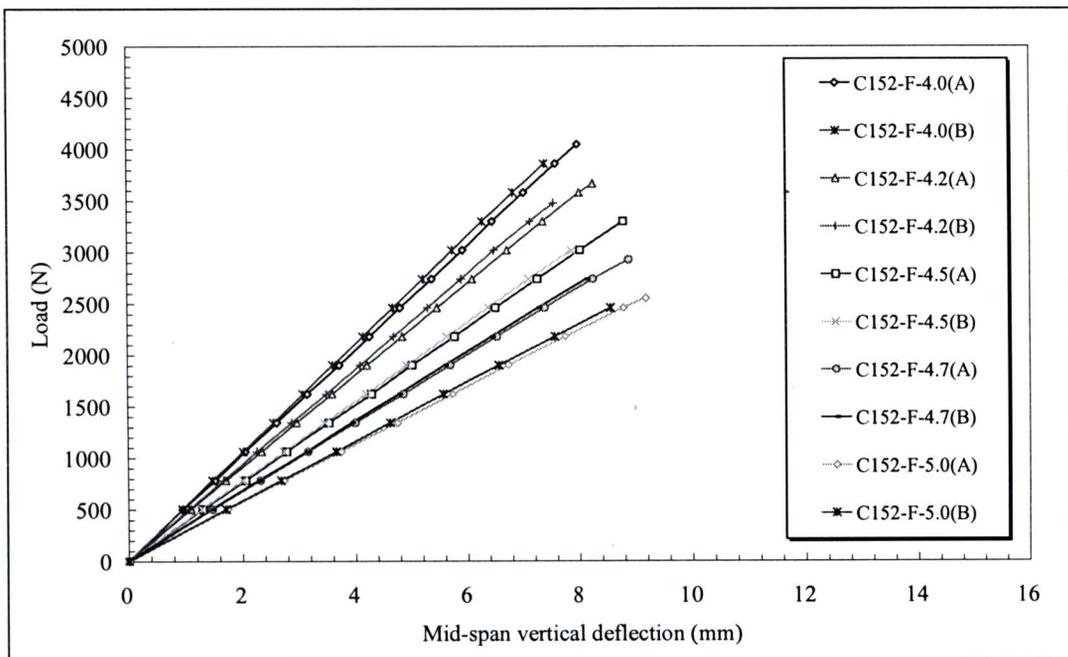
รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง  
ขนาด 102×29×6 mm ความยาว 1.0 ถึง 2.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



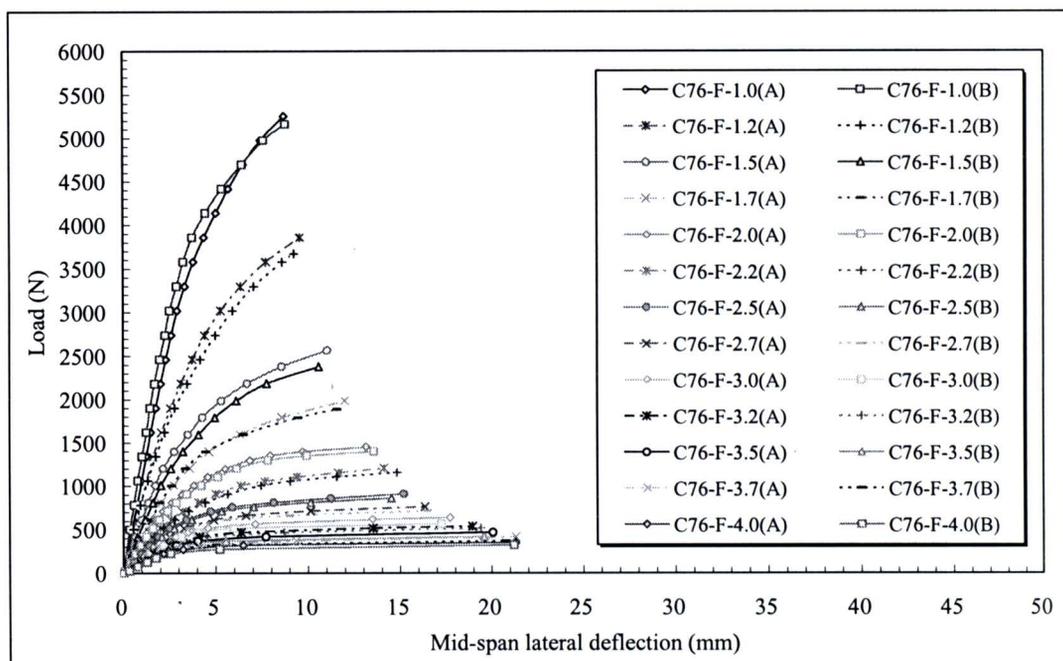
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง  
ขนาด 102×29×6 mm ความยาว 3.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



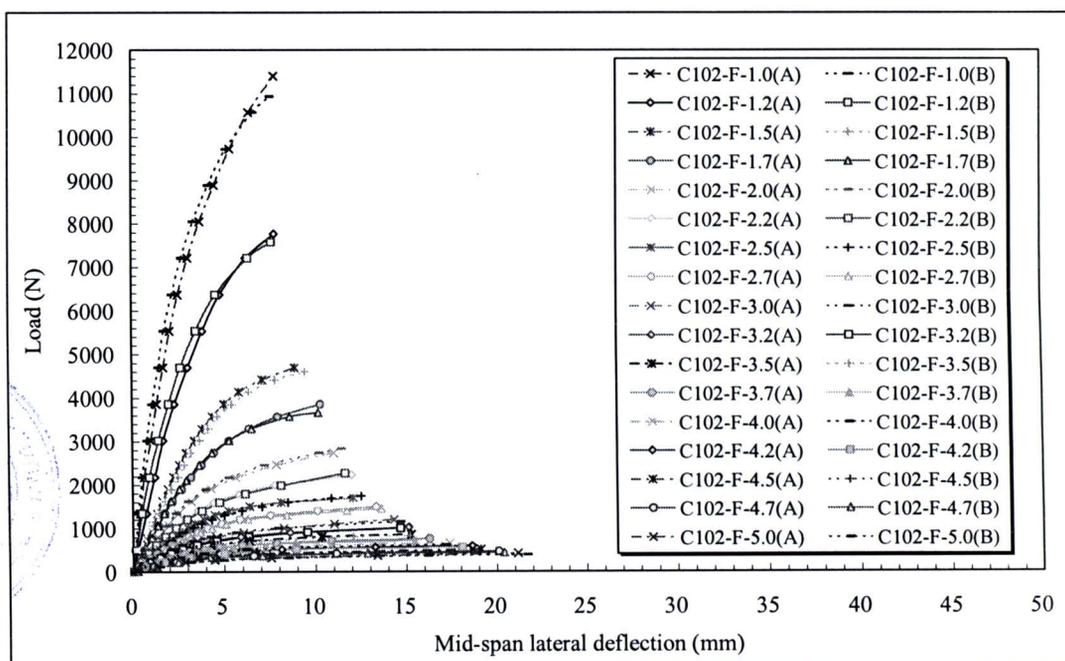
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง  
ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ความยาว 2.5 ถึง 3.7 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



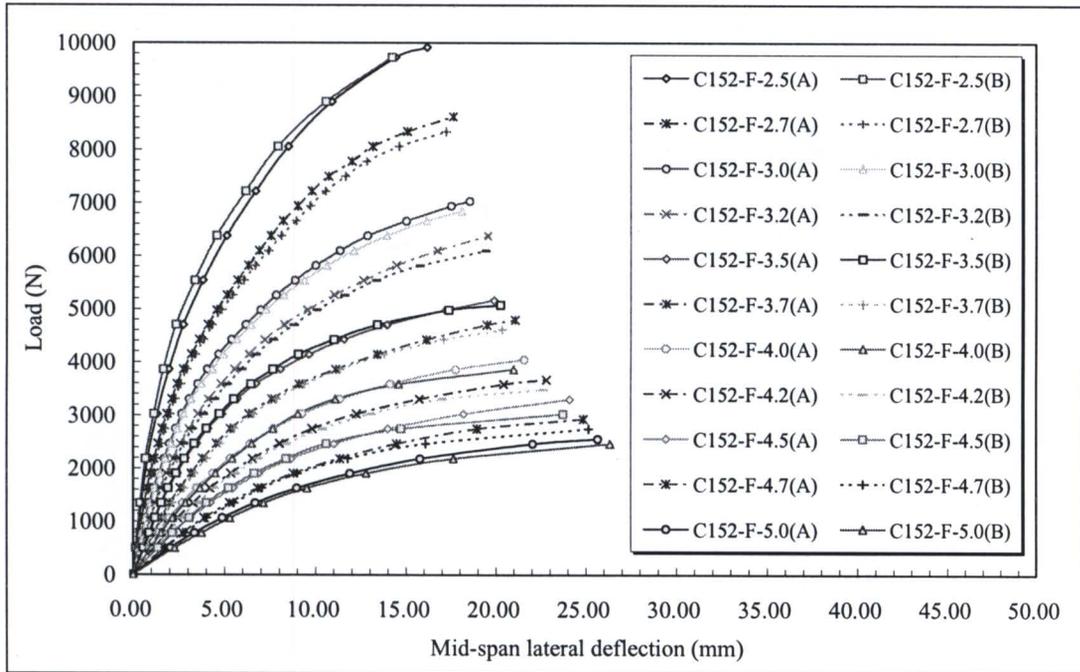
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวแนวตั้งที่กึ่งกลางของตัวอย่าง  
ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ความยาว 4.0 ถึง 5.0 m ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



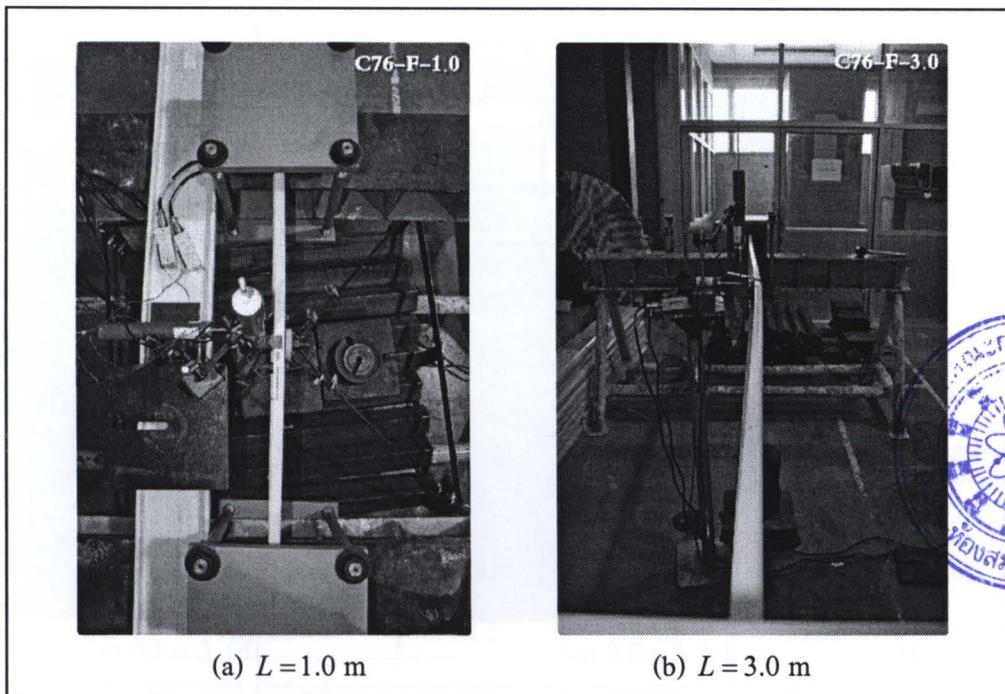
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



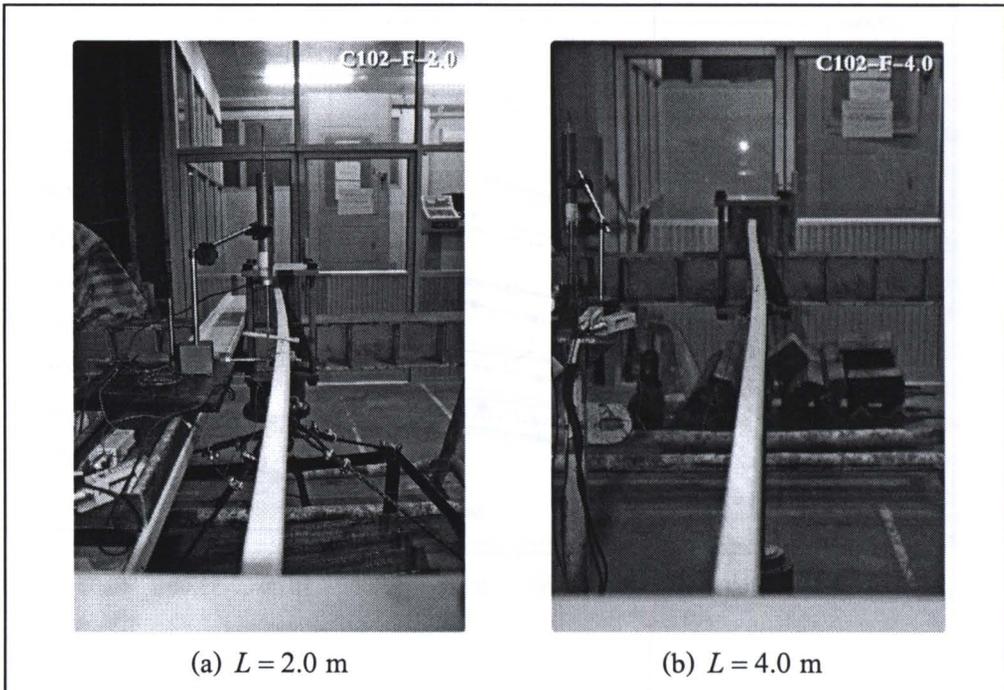
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



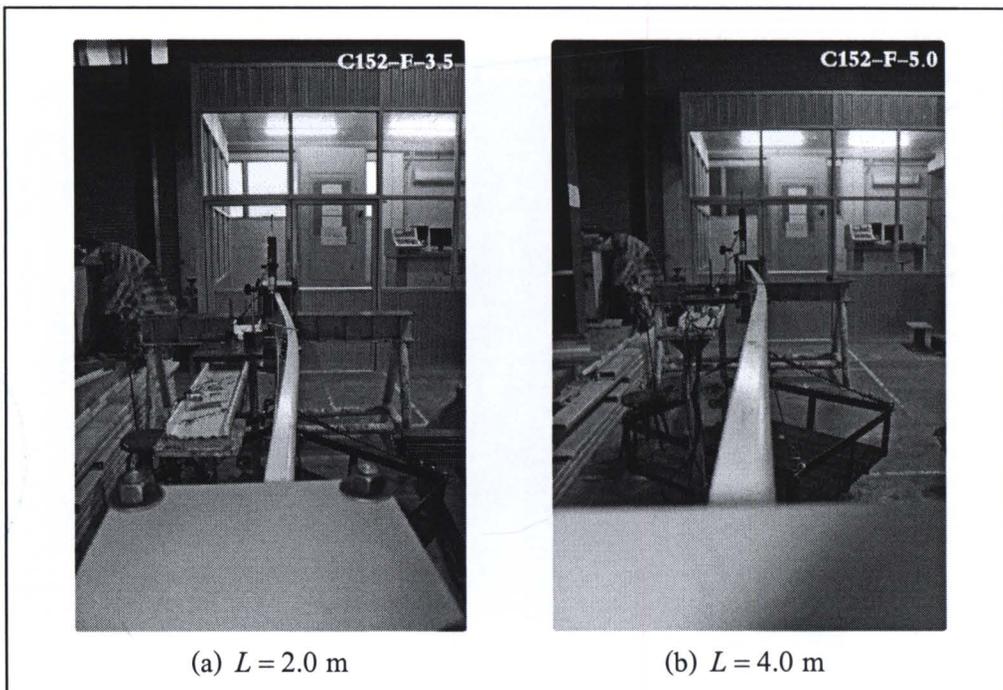
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นตัวด้านข้างที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.39 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.40 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.41 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

#### 4.4.2 น้ำหนักโก่งเดาะของคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

ตารางที่ 4.13 ถึงตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นสำหรับตัวอย่างขนาด  $76 \times 22 \times 6$   $102 \times 29 \times 6$  และ  $152 \times 43 \times 10$  mm ตามลำดับ โดยตารางดังกล่าว น้ำหนักโก่งเดาะ (buckling load) ที่ทดสอบได้จากตัวอย่างแต่ละตัวถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความยาวเพื่อใช้เป็นน้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $P_{cr,EXP}$ ) จากตารางพบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน น้ำหนักโก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโก่งเดาะและความยาวของตัวอย่างคาน FRFP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าความยาวของคานเป็นปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักโก่งเดาะ นอกจากนี้ พบว่าเมื่อพิจารณาตัวอย่างทดสอบที่ความยาวเท่ากัน ตัวอย่างหน้าตัด  $152 \times 43 \times 10$  mm สามารถรับแรงได้มากกว่าตัวอย่างหน้าตัด  $102 \times 29 \times 6$  และ  $76 \times 22 \times 6$  mm ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

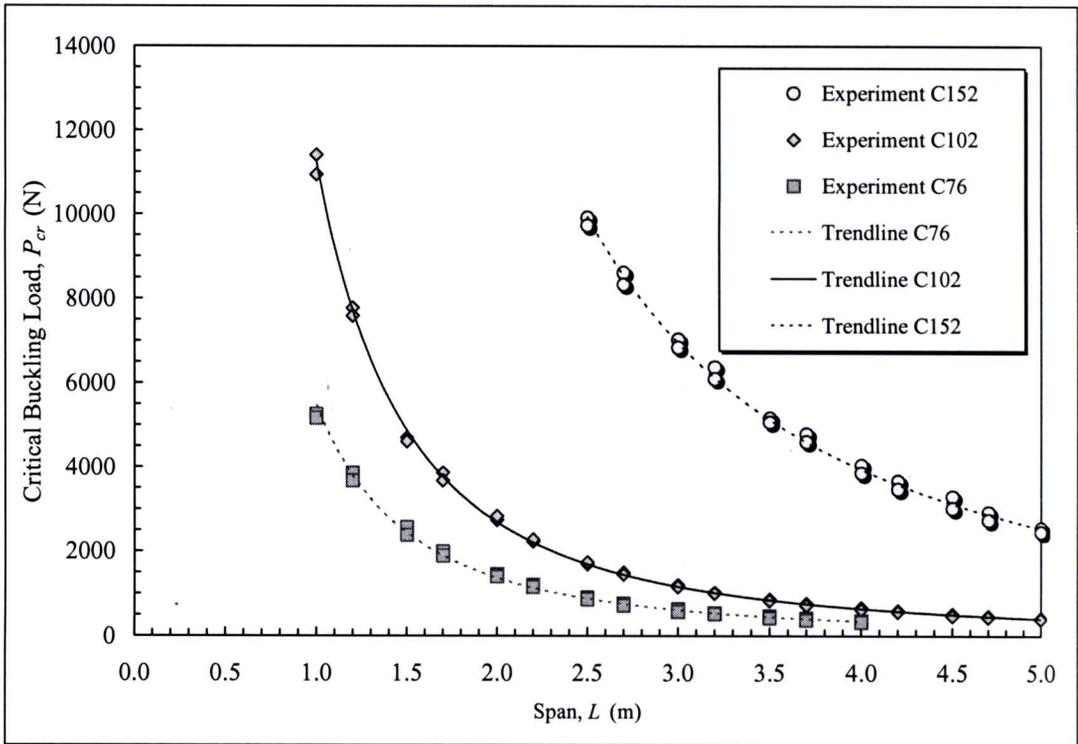
Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	L (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C76-F-1.0	$76 \times 22 \times 6$	1.0	5255.5	5162.3	5208.9
C76-F-1.2	$76 \times 22 \times 6$	1.2	3857.5	3671.1	3764.3
C76-F-1.5	$76 \times 22 \times 6$	1.5	2565.4	2379.0	2472.2
C76-F-1.7	$76 \times 22 \times 6$	1.7	1986.6	1888.5	1937.6
C76-F-2.0	$76 \times 22 \times 6$	2.0	1449.0	1399.9	1424.5
C76-F-2.2	$76 \times 22 \times 6$	2.2	1203.8	1154.7	1179.3
C76-F-2.5	$76 \times 22 \times 6$	2.5	909.5	860.4	885.0
C76-F-2.7	$76 \times 22 \times 6$	2.7	762.3	713.2	737.8
C76-F-3.0	$76 \times 22 \times 6$	3.0	635.2	566.1	600.7
C76-F-3.2	$76 \times 22 \times 6$	3.2	537.0	517.0	527.0
C76-F-3.5	$76 \times 22 \times 6$	3.5	468.0	418.9	443.5
C76-F-3.7	$76 \times 22 \times 6$	3.7	416.0	371.0	393.5
C76-F-4.0	$76 \times 22 \times 6$	4.0	351.0	321.0	336.0

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบตัวอย่างกานขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$L$ (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C102-F-1.0	$102 \times 29 \times 6$	1.0	11406.7	10940.7	11173.7
C102-F-1.2	$102 \times 29 \times 6$	1.2	7771.9	7585.5	7678.7
C102-F-1.5	$102 \times 29 \times 6$	1.5	4696.3	4602.4	4649.4
C102-F-1.7	$102 \times 29 \times 6$	1.7	3857.5	3671.1	3764.3
C102-F-2.0	$102 \times 29 \times 6$	2.0	2739.1	2832.9	2786.0
C102-F-2.2	$102 \times 29 \times 6$	2.2	2232.8	2276.0	2254.4
C102-F-2.5	$102 \times 29 \times 6$	2.5	1692.3	1742.3	1717.3
C102-F-2.7	$102 \times 29 \times 6$	2.7	1496.1	1448.0	1472.1
C102-F-3.0	$102 \times 29 \times 6$	3.0	1201.8	1153.7	1177.8
C102-F-3.2	$102 \times 29 \times 6$	3.2	1025.2	1005.6	1015.4
C102-F-3.5	$102 \times 29 \times 6$	3.5	859.2	829.4	844.3
C102-F-3.7	$102 \times 29 \times 6$	3.7	762.4	713.3	737.9
C102-F-4.0	$102 \times 29 \times 6$	4.0	664.3	615.2	639.8
C102-F-4.2	$102 \times 29 \times 6$	4.2	595.1	565.1	580.1
C102-F-4.5	$102 \times 29 \times 6$	4.5	515.1	467.0	491.1
C102-F-4.7	$102 \times 29 \times 6$	4.7	468.0	438.9	453.5
C102-F-5.0	$102 \times 29 \times 6$	5.0	419.0	389.9	404.5

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบตัวอย่างคานขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

Specimens	Dimensions ( $d \times b \times t$ ) (mm $\times$ mm $\times$ mm)	$L$ (m)	Experiment		
			Test A $P_{cr,A}$ (N)	Test B $P_{cr,B}$ (N)	Average $P_{cr,EXP}$ (N)
C152-F-2.5	$152 \times 43 \times 10$	2.5	9915.5	9729.1	9822.3
C152-F-2.7	$152 \times 43 \times 10$	2.7	8610.7	8331.1	8470.9
C152-F-3.0	$152 \times 43 \times 10$	3.0	7026.3	6839.9	6933.1
C152-F-3.2	$152 \times 43 \times 10$	3.2	6373.9	6094.3	6234.1
C152-F-3.5	$152 \times 43 \times 10$	3.5	5162.3	5069.1	5115.7
C152-F-3.7	$152 \times 43 \times 10$	3.7	4789.5	4603.1	4696.3
C152-F-4.0	$152 \times 43 \times 10$	4.0	4043.9	3857.5	3950.7
C152-F-4.2	$152 \times 43 \times 10$	4.2	3662.1	3475.7	3568.9
C152-F-4.5	$152 \times 43 \times 10$	4.5	3298.3	3018.7	3158.5
C152-F-4.7	$152 \times 43 \times 10$	4.7	2925.5	2739.1	2832.3
C152-F-5.0	$152 \times 43 \times 10$	5.0	2552.7	2459.5	2506.1

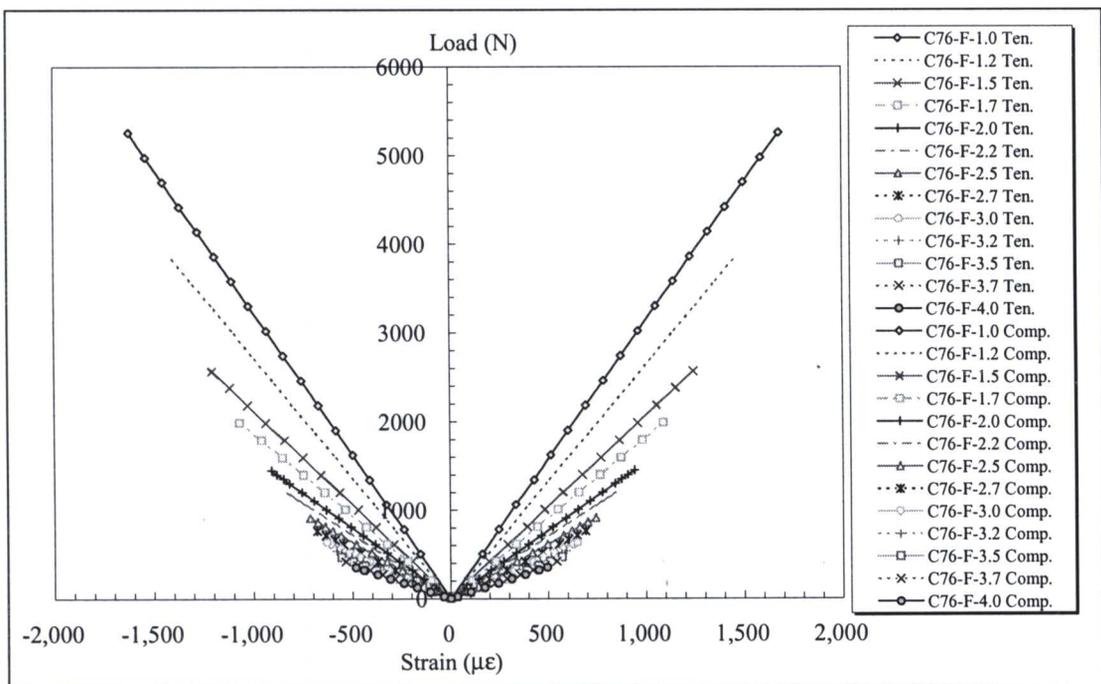


รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนัก โกงเคาะและความยาวของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

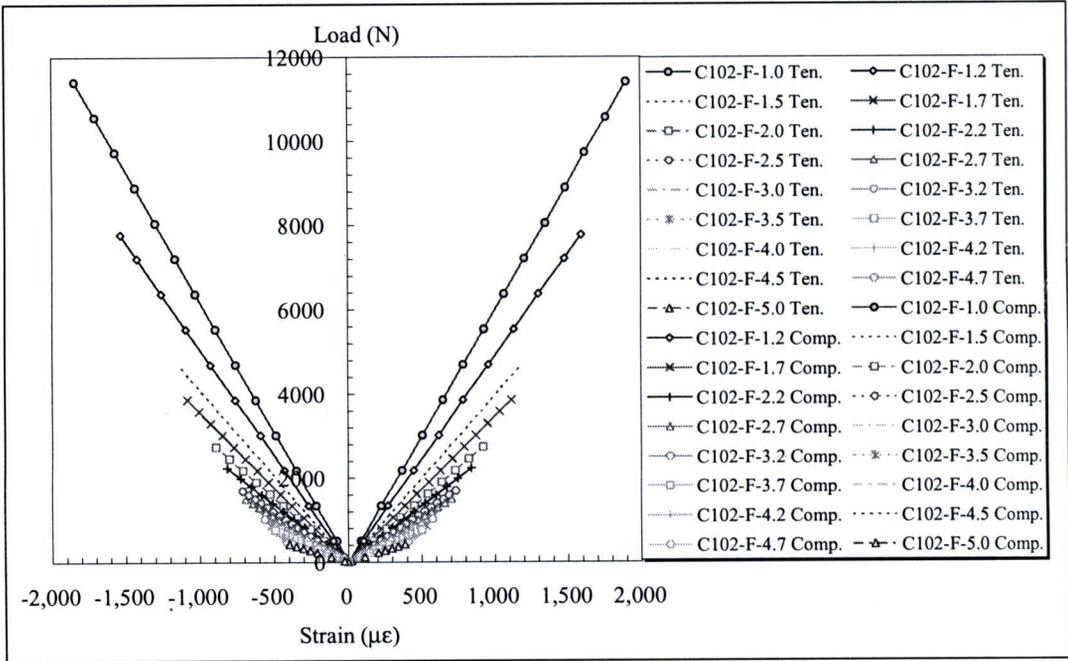
#### 4.4.3 ความเครียดของคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

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

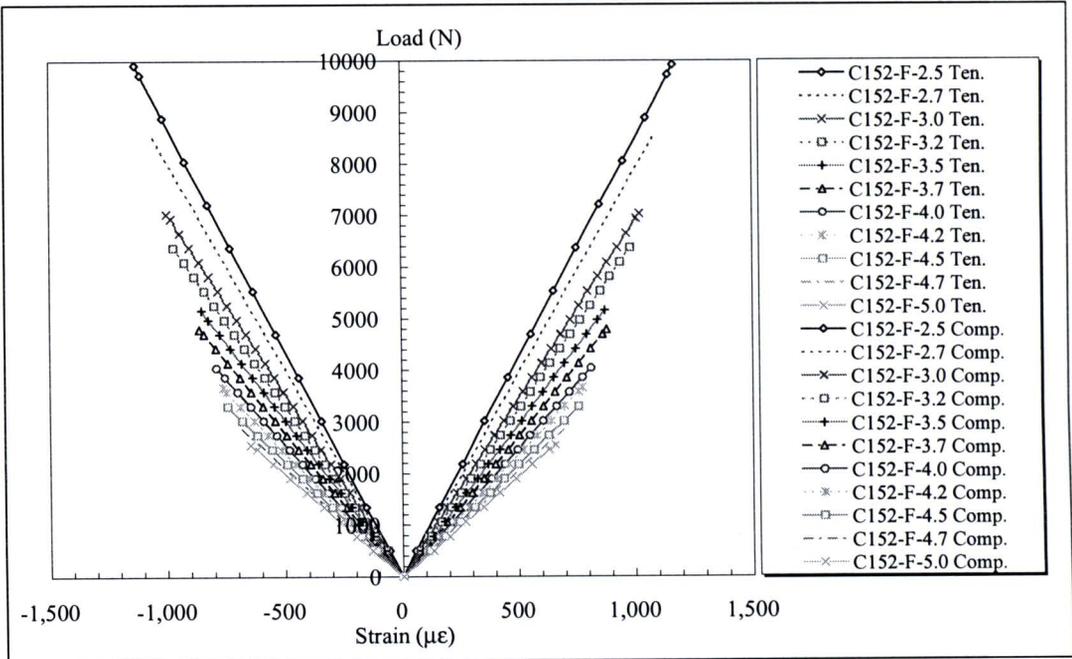
รูปที่ 4.43 ถึงรูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคานที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าความเครียดตามแนวแกนของตัวอย่างมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ โดยค่าความเครียดสูงสุดที่ทดสอบได้มีค่าประมาณ 500-2,000  $\mu\epsilon$  ซึ่งมิต่ำน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความเครียดประลัยที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ นอกจากนี้ ค่าความเครียดเชิงดึงและความเครียดเชิงอัดภายใต้แรงดัดมีค่าใกล้เคียงกันตลอดการทดสอบแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้าม



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างขนาด 76×22×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

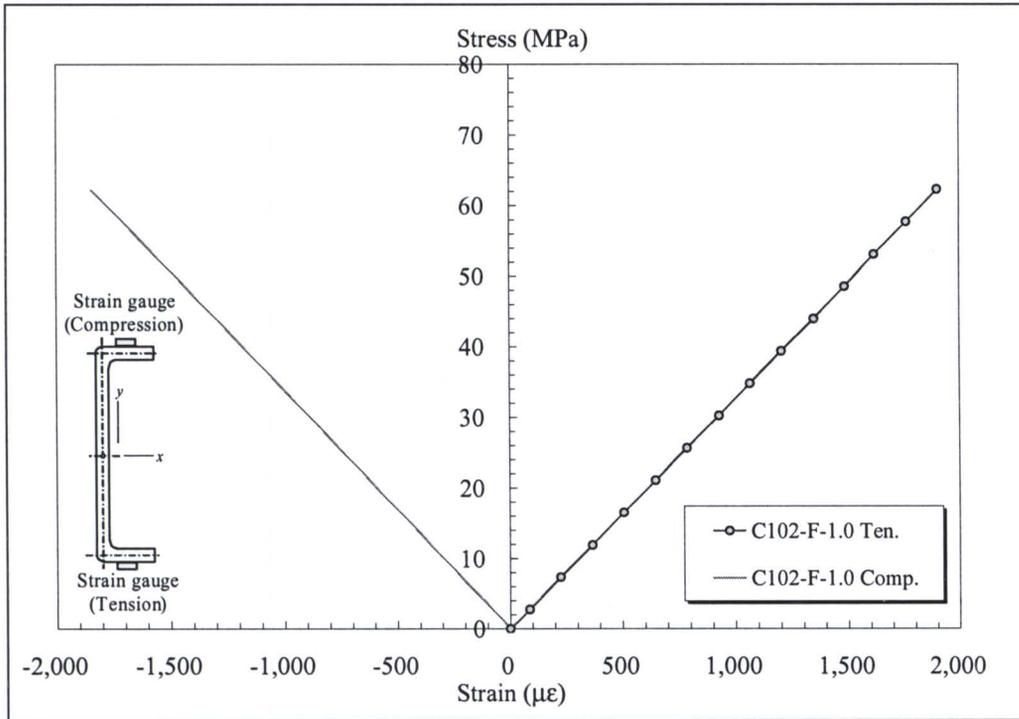


รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง  
ของตัวอย่างขนาด 102×29×6 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและความเครียดที่กึ่งกลาง  
ของตัวอย่างขนาด 152×43×10 mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

รูปที่ 4.46 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น จากรูปพบว่าหน่วยแรงดึงและแรงอัดตามแนวแกนของตัวอย่างภายใต้แรงค้ำมีลักษณะแบบเชิงเส้นจนถึงจุดวิบัติ และจากความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สามารถหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเชิงค้ำที่ได้จากการทดสอบขนาดจริง (full scale) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 32.6 GPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุ



รูปที่ 4.46 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่กึ่งกลางของตัวอย่างคาน FRP ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

#### 4.4.4 การเปรียบเทียบโมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้กับสมการออกแบบของ LRFD สำหรับคานที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่น

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

$$M_{cr,EXP} = P_{cr,EXP} L / 8 \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.16 ถึงตารางที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบ โมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $M_{cr,LRFD}$ ) สำหรับคาน FRP ที่มีจุกรองรับแบบยึดแน่นสามารถคำนวณค่า  $M_{cr,LRFD}$  ได้จากสมการที่ (3.4) จากตารางพบว่า หากพิจารณาตัวอย่างทดสอบในกลุ่มที่มีหน้าตัดเท่ากัน โมเมนต์โก่งเดาะที่ได้จากการทดสอบ ( $M_{cr,EXP}$ ) มีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวคานเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ พบว่าอัตราส่วนระหว่างโมเมนต์โก่งเดาะจากการทดสอบและโมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD ( $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$ ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.86-1.03 สำหรับคานที่มีอัตราส่วน  $L/d \geq 20$  อัตราส่วน  $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.97-1.03 แสดงให้เห็นว่า โมเมนต์โก่งเดาะที่คำนวณจากสมการ LRFD สามารถทำนายกำลังรับแรงของคานได้อย่างถูกต้องเพียงพอภายใต้ขอบเขตของงานวิจัย ในทางตรงกันข้าม คานที่มีอัตราส่วน  $L/d < 20$  อัตราส่วน  $M_{cr,EXP} / M_{cr,LRFD}$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.86-0.97 โดยสาเหตุที่โมเมนต์โก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าโมเมนต์ที่คำนวณได้จากสมการของ LRFD อาจมีสาเหตุเนื่องจาก ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบ (initial crookedness) ตลอดจนตัวอย่างคานที่มีความยาวต่ำ พฤติกรรมทางโครงสร้างก่อนที่ตัวอย่างจะเกิดการโก่งเดาะมีลักษณะแบบไม่เชิงเส้นเล็กน้อย ส่งผลให้กำลังโก่งเดาะที่ทดสอบได้มีค่าต่ำกว่าผลการคำนวณจากสมการของ LRFD



ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD  
ของคาน FRP ขนาด  $76 \times 22 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

Specimens	$L/d$	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C76-F-1.0	13.2	656.9	645.3	651.1	757.0	0.86
C76-F-1.2	15.8	578.6	550.7	564.6	626.0	0.90
C76-F-1.5	19.7	481.0	446.1	463.5	487.6	0.95
C76-F-1.7	22.4	422.2	401.3	411.7	421.1	0.98
C76-F-2.0	26.3	362.3	350.0	356.1	350.2	1.02
C76-F-2.2	28.9	331.0	317.5	324.3	315.1	1.03
C76-F-2.5	32.9	284.2	268.9	276.5	274.2	1.01
C76-F-2.7	35.5	257.3	240.7	249.0	252.5	0.99
C76-F-3.0	39.5	238.2	212.3	225.2	225.8	1.00
C76-F-3.2	42.1	214.8	206.8	210.8	210.9	1.00
C76-F-3.5	46.1	204.8	183.3	194.0	192.1	1.01
C76-F-3.7	48.7	192.4	171.6	182.0	181.3	1.00
C76-F-4.0	52.6	175.5	160.5	168.0	167.3	1.00

ตารางที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์โค้งเดาะจากการทดสอบและสมการ LRFD

ของคาน FRP ขนาด  $102 \times 29 \times 6$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

Specimens	$L/d$	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C102-F-1.0	9.8	1425.8	1367.6	1396.7	1596.0	0.88
C102-F-1.2	11.8	1165.8	1137.8	1151.8	1268.0	0.91
C102-F-1.5	14.7	880.6	863.0	871.8	982.0	0.89
C102-F-1.7	16.7	819.7	780.1	799.9	858.0	0.93
C102-F-2.0	19.6	684.8	708.2	696.5	718.7	0.97
C102-F-2.2	21.6	614.0	625.9	620.0	636.2	0.97
C102-F-2.5	24.5	528.8	544.5	536.7	543.2	0.99
C102-F-2.7	26.5	504.9	488.7	496.8	495.2	1.00
C102-F-3.0	29.4	450.7	432.6	441.7	437.6	1.01
C102-F-3.2	31.4	410.1	402.2	406.2	406.3	1.00
C102-F-3.5	34.3	375.9	362.9	369.4	367.1	1.01
C102-F-3.7	36.3	352.6	329.9	341.3	345.0	0.99
C102-F-4.0	39.2	332.2	307.6	319.9	316.6	1.01
C102-F-4.2	41.2	312.4	296.7	304.6	300.1	1.01
C102-F-4.5	44.1	289.7	262.7	276.2	278.5	0.99
C102-F-4.7	46.1	275.0	257.9	266.4	265.8	1.00
C102-F-5.0	49.0	261.9	243.7	252.8	248.8	1.02

ตารางที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบ โมเมนต์โค้งเคาะจากการทดสอบและสมการ LRFD  
ของคาน FRP ขนาด  $152 \times 43 \times 10$  mm ที่มีจุดรองรับแบบยึดแน่น

Specimens	$L/d$	Experiment			Analytical	
		Test A $M_{cr,A}$ (N-m)	Test B $M_{cr,B}$ (N-m)	Average $M_{cr,EXP}$ (N-m)	LRFD $M_{cr,LRFD}$ (N-m)	$\frac{M_{cr,EXP}}{M_{cr,LRFD}}$
C152-F-2.5	16.4	3098.6	3040.3	3069.5	3515.8	0.87
C152-F-2.7	17.8	2906.1	2811.7	2858.9	3180.0	0.90
C152-F-3.0	19.7	2634.9	2565.0	2599.9	2782.6	0.93
C152-F-3.2	21.1	2549.6	2437.7	2493.6	2569.4	0.97
C152-F-3.5	23.0	2258.5	2217.7	2238.1	2305.6	0.97
C152-F-3.7	24.3	2215.1	2128.9	2172.0	2158.6	1.01
C152-F-4.0	26.3	2022.0	1928.8	1975.4	1971.0	1.00
C152-F-4.2	27.6	1922.6	1824.7	1873.7	1863.5	1.01
C152-F-4.5	29.6	1855.3	1698.0	1776.7	1723.2	1.03
C152-F-4.7	30.9	1718.7	1609.2	1664.0	1641.1	1.01
C152-F-5.0	32.9	1595.4	1537.2	1566.3	1532.0	1.02