

บทที่ 6 ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

6.1 บทนำ (Introduction)

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบและวิจารณ์ผลการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบทั้งกรณีเสริมกำลังและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายใต้การดัดแบบ 3 จุด 4 จุด และ 5 จุด ดังรายละเอียดที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 เพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินประสิทธิภาพทางโครงสร้าง เช่น กำลัง ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดเทียบเท่า ค่าความแข็งแรงของการเฉือนเทียบเท่า ตัวประกอบลดกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเฉือน

6.2 ผลการทดสอบภายใต้การดัด (Experimental Results under Bending)

โดยทำการทดสอบคานไม้ยางพาราประกอบภายใต้การดัดสาม สี่ (ASTM D198-97) และ ห้าจุด ผลการทดสอบกำลังดัดสูงสุด ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดเทียบเท่า (EI) และค่าความแข็งแรงเนื่องจากการเฉือนเทียบเท่า (KGA) เปรียบเทียบกับค่าซึ่งคำนวณจากการวิเคราะห์ตามรายละเอียดแสดงในบทที่ 5 ผลการทดสอบและการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 6.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบคานภายใต้การดัด

คาน	4 จุด				ค่าเฉลี่ย EI (MN.m ²)	5 จุด		3 จุด
	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด		ค่าความเครียดที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด			ค่าเฉลี่ยน้ำหนักบรรทุกสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย
	(kN)		(10 ⁻⁶)			(kN)	KGA	KGA
							(MN)	(MN)
	ทดสอบ	ทฤษฎี	ผิวบน	ผิวล่าง		ทดสอบ		
Pb1 (AVG)	33.4	29.3	1585	1715	0.508	41.5	24.7	31.5
Pb2 (AVG)	31.1	24.8	1592	2015	0.493	47.1	29.5	41.1
Pb1B (AVG)	50.8	44.7	2139	1801	0.758	66.2	48.8	42.5
Pb2B (AVG)	49.0	42.6	2072	1878	0.714	53.0	86.5	70.7
Pb1BT (AVG)	60.1	66.7	2021	3729	0.851	72.6	93.4	99.8
Pb2BT (AVG)	55.6	56.5	1704	2875	0.823	70.6	143.5	131.0

6.3 ความแข็งแรง (Strength)

ผลการทดสอบคานไม้ประกอบยางพาราจนกระทั่งเกิดการวิบัติ พบว่าความแข็งแรงของคานไม้ประกอบยางพาราภายใต้การดัดทั้ง 4 และ 5 จุด มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คานไม้ประกอบยางพาราซึ่งมีการเสริมกำลังทั้งผิวบนและผิวล่างจะมีความแข็งแรงกำลังสูงกว่าคานไม้ประกอบยางพาราประกอบซึ่งเสริมกำลังเพียงที่ผิวล่างเท่านั้น อย่างไรก็ตามความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการประกอบคานไม้ ดังจะเห็นได้จากผลในตารางที่ 6.1 รูปแบบคานไม้ยางพาราประกอบแบบที่ 1 จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าคานไม้ยางพาราประกอบในรูปแบบที่ 2 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังของคานไม้ทั้งสองรูปแบบทั้งกรณีที่ไม่เสริมและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่ามีค่ากำลังแตกต่างกันประมาณ 3.50 - 7.50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ความแข็งแรงที่แตกต่างกันยังขึ้นอยู่กับปริมาณการเสริมกำลังของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยเช่นกัน

สำหรับค่าความแข็งแรงในการรับน้ำหนัก (โมเมนต์ดัด) สูงสุดทางทฤษฎีซึ่งทำนายจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งเสนอไว้ในบทที่ 5 นั้น พบว่าเมื่อทำการหาอัตราส่วนค่าความแข็งแรงในการรับน้ำหนักจากการทดสอบต่อค่าดังกล่าวจากแบบจำลองที่เสนอ ค่าอัตราส่วนดังกล่าวของคานไม้ยางพาราประกอบ

ทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.901 ถึง 1.254 โดยที่ค่าของอัตราส่วนค่ากำลังรับน้ำหนักสำหรับคานส่วนใหญ่แล้วมีค่ามากกว่า 1 ยกเว้นในกรณีของคานไม้ยางพาราประกอบซึ่งทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้งผิวบนและผิวล่าง จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวพบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้เพื่อทำนายค่าความแข็งแรงของคานไม้ประกอบยางพาราอาจจะทำนายค่าความแข็งแรงของคานไม้ในกลุ่มดังกล่าวสูงเกินผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องจากเนื้อไม้สำหรับคานไม้ในกลุ่มดังกล่าว (Pb1BT and Pb2BT) มีคุณสมบัติที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่นๆ

6.4 ค่าความแข็งแรง EI และ KGA (Rigidity EI and KGA)

จากผลของค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดและการเฉือนของคานไม้ยางพาราประกอบทั้งกรณีเสริมและไม่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังแสดงในตารางที่ 6.1 พบว่าค่าความแข็งแรงเนื่องจากการดัดและการเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของการเสริมกำลังที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงดังกล่าวยังคงขึ้นอยู่กับรูปแบบของคานไม้ยางพาราประกอบ

ในการประเมินค่าความแข็งแรงเฉือนในงานวิจัยนี้ทำการประเมินจากผลการทดสอบคานที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือจากการทดสอบการดัดแบบ 3 และ 5 จุดซึ่งผลค่าความแข็งแรงเฉือนจากทั้ง 2 วิธี สำหรับคานไม้ยางพาราประกอบชนิดเดียวกัน มีค่าความแตกต่างมากที่สุดประมาณ 28.2% สำหรับผลการประเมินคุณสมบัติเชิงกลจากผลการคำนวณพบว่าค่าความแข็งแรงเนื่องจากการแรงเฉือนเทียบเท่า (KGA) ของคานไม้ประกอบชนิดรอยต่อแบบที่ 2 (รอยต่อในชั้นที่สองและสามซ้อนทับในตำแหน่งเดียวกัน) มีค่าสูงกว่าคานไม้ประกอบชนิดรอยต่อแบบที่ 1 (รอยต่อสลับกัน) เนื่องมาจากจำนวนของรอยต่อในคานไม้ประกอบแบบที่ 1 มีจำนวนมากกว่าในบริเวณระหว่างช่วงของแรงกระทำโดยเฉพาะที่ชั้นล่างสุดของคานไม้ประกอบซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการมีจำนวนรอยต่อในบริเวณดังกล่าวมากจะทำให้เกิดการรื้อไหลของการส่งถ่ายแรงที่ตำแหน่งของรอยต่อมากตามไปด้วยจึงเป็นสาเหตุให้คานไม้ประกอบชนิดรอยต่อแบบที่ 1 มีค่าความแข็งแรงเนื่องจากการแรงเฉือนต่ำกว่า

6.4.1 ตัวอย่างการคำนวณค่าความแข็งแกร่งเนื่องจากการดัด EI (กรณี Pb1BT)

จากผลการทดลองของคาน Pb1BT ในห้องปฏิบัติการ เมื่อนำค่าส่วนกลับของค่าความชันที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและค่าการโก่งตัวโดยทำการคำนวณค่าอัตราส่วนกลับของค่าความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงอีลาสติกทำการแทนค่าความยาวช่วงทดสอบ ($a = 90$ เซนติเมตร) ความยาวคานไม้ยางพาราประกอบ ($L = 270$ เซนติเมตร) และค่าความชัน ในสมการที่ (6.1 หรือ 5.4)

$$(EI) = \frac{Pa}{48(\delta_{m4} - \delta_{a4})}(3L^2 - 12La + 12a^2) \quad (6.1)$$

$$(EI) = \frac{900 \text{ mm}}{48\left(\frac{1}{240.47} - \frac{1}{275.24}\right) \frac{\text{mm}}{\text{kg}}}(3(270)^2 - 12(270)(90) + 12(90)^2) \text{ cm}$$

$$(EI) = 8.67(10^8) \text{ kg.cm}^2 \approx 0.851(10^6) \text{ N.m}^2$$

6.4.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าความแข็งแกร่งเนื่องจากการเฉือน KGA (กรณี Pb1BT)

โดยทำการแทนค่าความแข็งแกร่งของการดัดเทียบเท่า (EI) และค่าความชันในช่วงอีลาสติกภายใต้การดัดแบบ 3 จุด ลงในสมการที่ (5.5 หรือ 6.2) ดังต่อไปนี้

$$(\kappa GA) = \frac{L}{\left(\frac{\delta_{m3}}{P} - \frac{L^3}{48EI}\right)} \quad (6.2)$$

$$(\kappa GA) = \frac{270 \text{ cm}}{\left(\frac{0.906 \text{ cm}}{1814 \text{ kg}} - \frac{270^3 \text{ cm}^3}{48(8.67)10^8 \text{ kg.cm}^2}\right)}$$

$$(\kappa GA) = 10.17(10^6) \text{ kg} \approx 99.8(10^6) \text{ N}$$

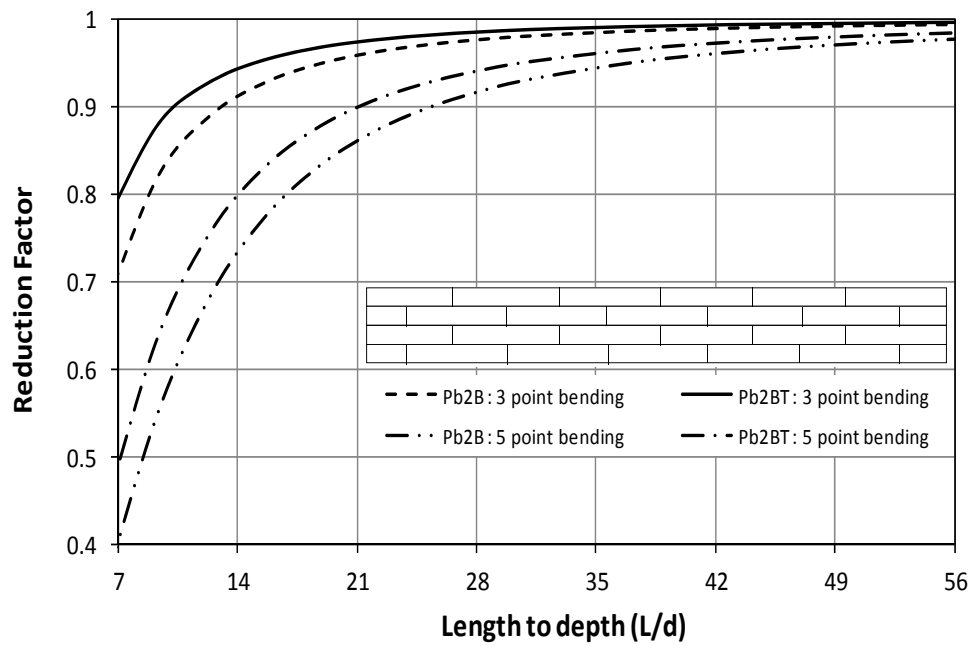
6.5 ค่าตัวประกอบลดกำลังเนื่องการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเฉือน (Reduction Factor due to Shear Deformation)

โดยอาศัยผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงเนื่องจากการตัดและการเฉือนดังแสดงในตารางที่ 6.1 ค่าตัวประกอบลดกำลังสามารถทำการวิเคราะห์ตามรายละเอียดซึ่งแสดงอยู่ในหัวข้อที่ 5.3 สำหรับกรณีคานภายใต้การดัดเนื่องจากการกระทำ 3 จุดและ 5 จุด ตัวประกอบลดกำลังเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปเนื่องจากการเฉือนแสดงดังสมการที่ (6.3) และ (6.4) โดยทำการคำนวณหาตัวประกอบลดกำลังที่อัตราส่วนช่วงความยาวของคานต่างๆ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบลดกำลังและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของหน้าตัดจะถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 6.1 และ 6.2

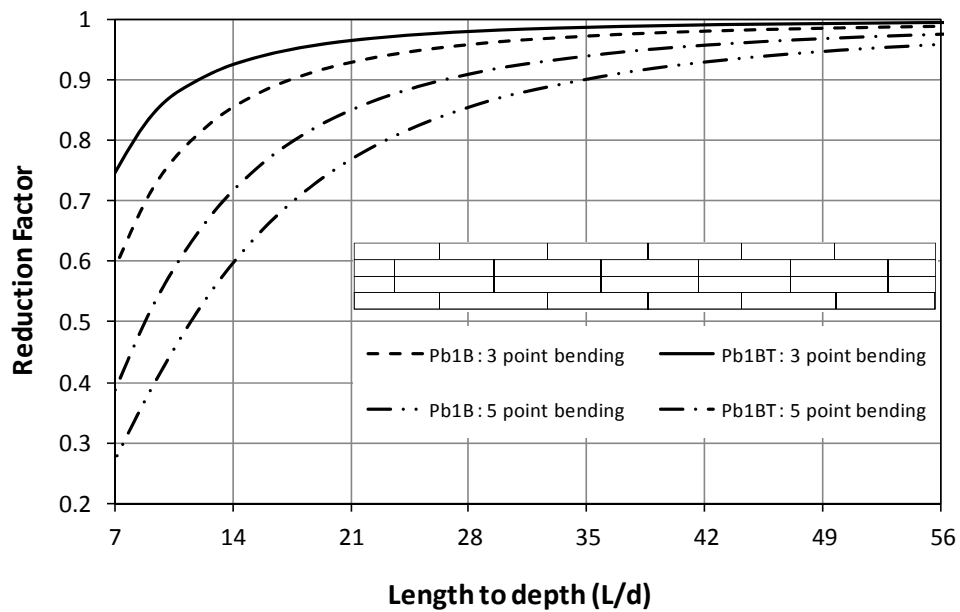
$$R_{bs} = \frac{1}{\left(1 + \frac{48}{L^2} \left(\frac{EI}{\kappa GA} \right)\right)} \quad (6.3)$$

$$R_{bs} = \frac{1}{\left(1 + \frac{219}{L^2} \left(\frac{EI}{\kappa GA} \right)\right)} \quad (6.4)$$

โดยที่ EI คือค่าความแข็งแรงการดัดเทียบเท่า และ κGA คือค่าความแข็งแรงการเฉือนเทียบเท่า L คือความยาวช่วงของคานระหว่างที่รองรับ



(a) คำนวณรูปแบบ Pb2



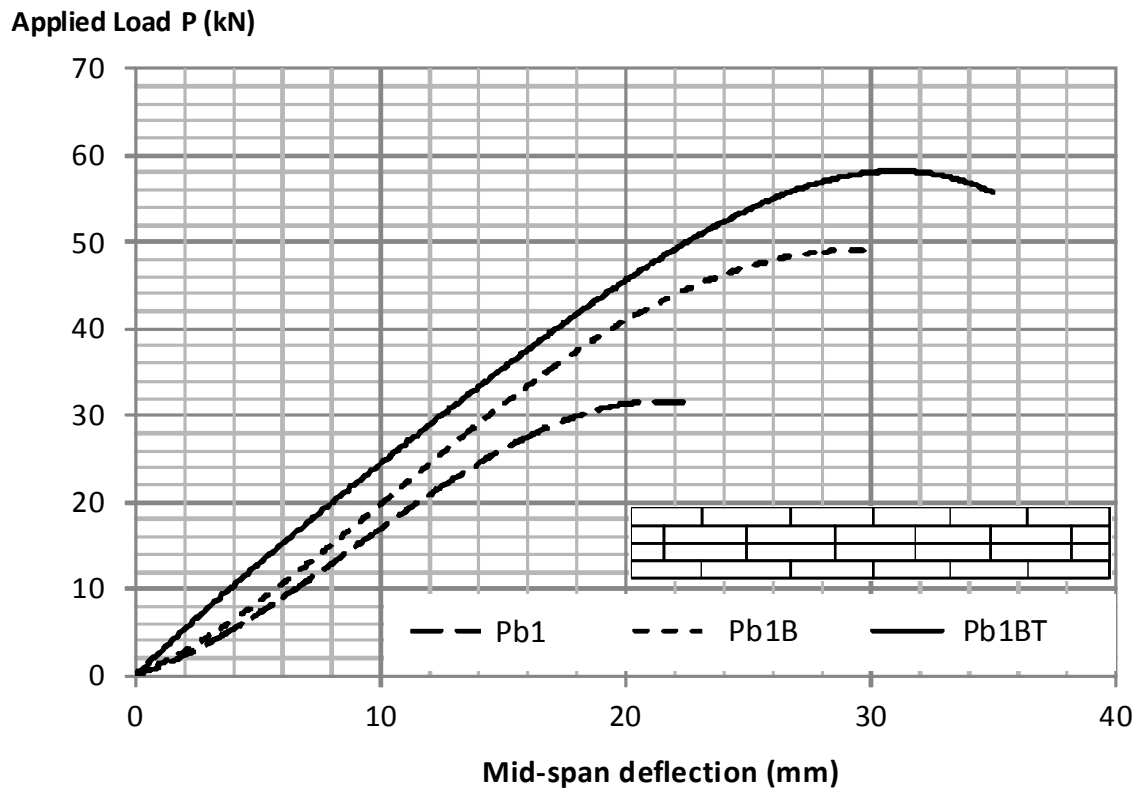
(b) คำนวณรูปแบบ Pb1

รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบลดกำลังและอัตราส่วนความยาวต่อความลึกของหน้าตัด

ค่าตัวประกอบลดกำลังการตัดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปจากการเงื่อนไขงานวิจัยนี้แสดงผลภายในช่วงอัตราส่วนความยาวของคานต่อความลึกของหน้าตัดอยู่ระหว่าง 7 ถึง 56 ซึ่งผลของการเงื่อนไขจะมีอิทธิพลสูงสำหรับคานไม้ยางพาราประกอบเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ผิวล่างเนื่องจากค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคานไม้ยางพาราประกอบในกลุ่มนี้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคานไม้ยางพาราประกอบในกลุ่มที่ทำการเสริมกำลังทั้งผิวบนและล่าง

6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัว (Load Deflection Relation)

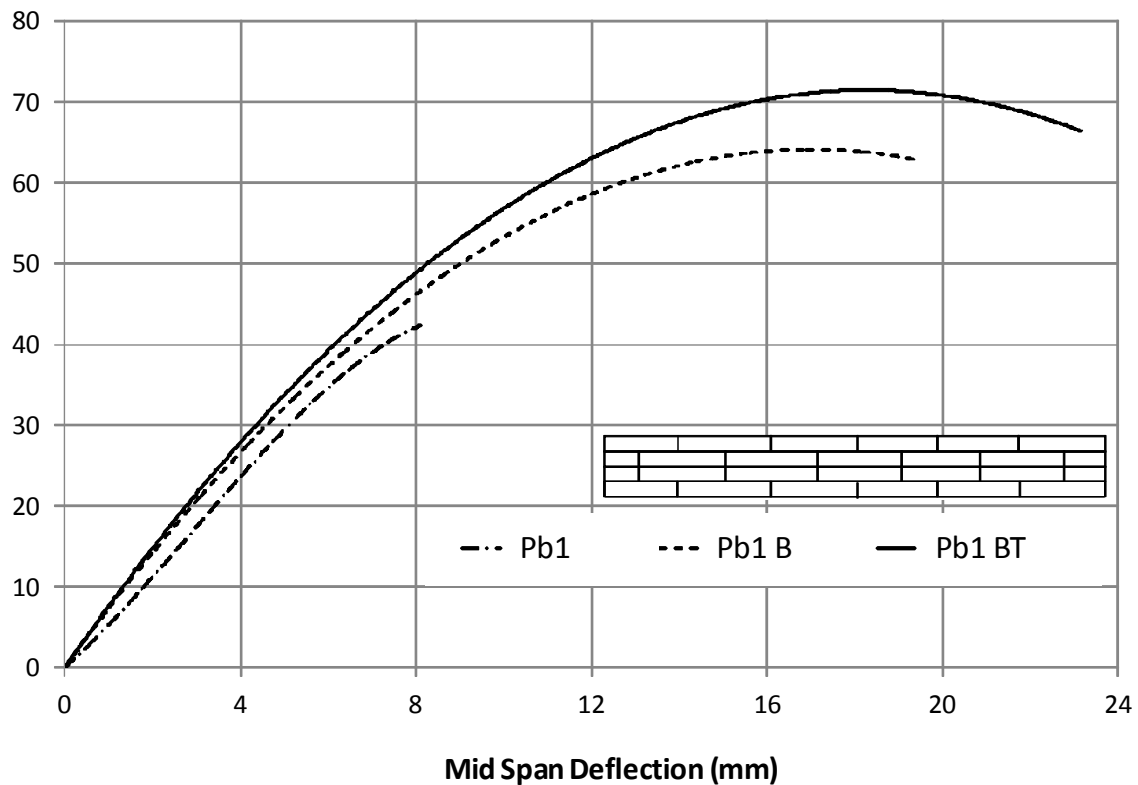
สำหรับการทดสอบภายใต้การดัดแบบ 3 และ 4 จุด พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานไม้ยางพาราประกอบในแนวตั้งพบว่าลักษณะความสัมพันธ์ของคานไม้ยางพาราประกอบทั้งที่เสริมกำลังและไม่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่าในช่วงตั้งแต่รับแรงกระทำจนกระทั่งประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของกำลังรับแรงสูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวมีลักษณะใกล้เคียงเชิงเส้น (Linear) ขณะที่ภายหลังจากช่วงดังกล่าวจะเริ่มพบว่าคานไม้ยางพาราประกอบเริ่มพบรอยแตกร้าวซึ่งทำให้ค่าความแข็งแรงของคานไม้เริ่มลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวในช่วงดังกล่าวนี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งจนกระทั่งคานไม้ยางพาราประกอบวิบัติ นอกจากนี้ยังพบว่าผลจากการเสริมกำลังคานไม้ยางพาราประกอบด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทำให้คานไม้ยางพาราประกอบมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปภายหลังจากช่วงความสัมพันธ์เชิงเส้นได้มากกว่าคานไม้ประกอบยางพาราที่ไม่ได้ทำการเสริมกำลัง (พิจารณาเปรียบเทียบในรูปที่ 6.2)



รูปที่ 6.2 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวภายใต้การตัด 4 จุด

สำหรับการทดสอบด้วยการตัดแบบ 5 จุดซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อให้คานไม้ยางพาราประกอบวิบัติภายใต้อิทธิพลของแรงเฉือน ยังคงพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการโก่งตัวของคานในแนวดิ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับการตัดแบบ 3 จุดและ 4 จุด อย่างไรก็ตามสำหรับคานไม้ยางพาราประกอบที่ไม่ทำการเสริมกำลังจะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัวจะมีลักษณะเชิงเส้นจนกระทั่งคานเกือบจะวิบัติดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนระหว่างคานไม้ยางพาราประกอบที่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากคานไม้ที่ทำการเสริมกำลังจะมีความสามารถเปลี่ยนแปลงรูปหลังรับแรงกระทำสูงสุดได้ โดยความสามารถดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับลักษณะและจำนวนการเสริมกำลัง

Applied Load P (kN)



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการโก่งตัวภายใต้การตัด 5 จุด

6.7 รูปการวิบัติ (Failure Mode)

โดยผลจากการทดสอบสังเกตพบว่ามีลักษณะรูปแบบของรอยต่อและตำแหน่งของการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีผลต่อค่าการโก่งตัวและความแข็งแรงจากการทดสอบคานไม้ภายใต้การตัด โดยคานไม้บางพารูปประกอบภายใต้การตัดในงานวิจัยนี้มีลักษณะการแตกร้าวและการวิบัติในแต่ละคานคล้ายคลึงกันคือ เมื่อคานไม้ประกอบรับแรงกระทำถึงค่าความเครียดใกล้เคียงกับค่าความเครียดวิบัติด้านรับแรงดึงจะพบว่าคานไม้เริ่มรอยแตกในส่วนรับแรงดึงดังแสดงในรูปที่ 6.4 และรอยร้าวจะขยายตัวออกตามแนวนอนเมื่อรับแรงกระทำเพิ่มขึ้น



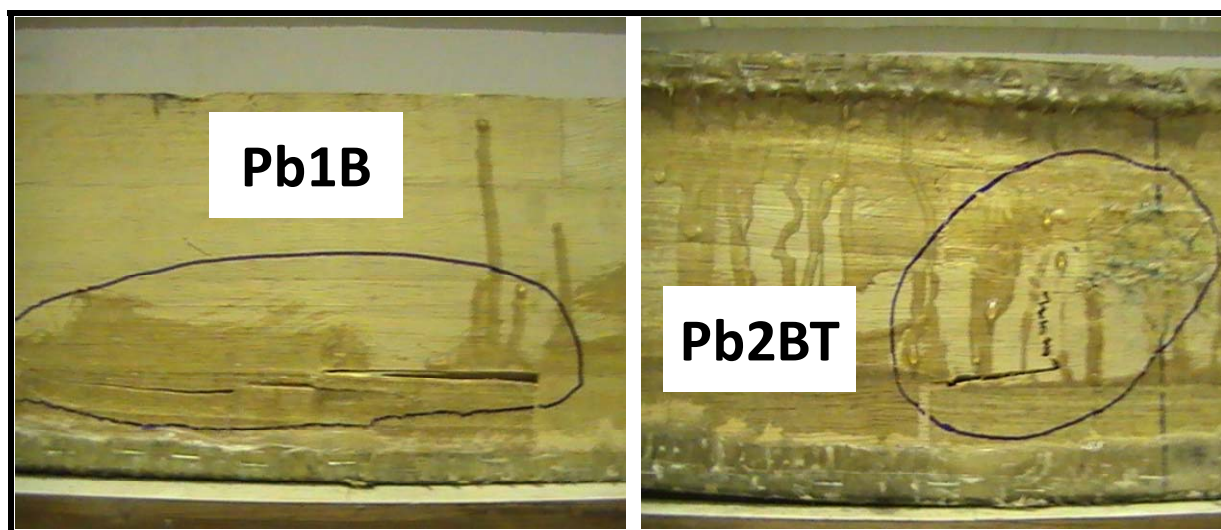
รูปที่ 6.4 รอยแตกร้าวขนาดเล็กที่ด้านรับแรงดึง

อย่างไรก็ตามสำหรับคานไม้ยางพาราประกอบที่ทำการเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะไม่พบความเสียหายของวัสดุเสริมกำลังถึงแม้ว่าจะเกิดรอยแตกร้าวของคานไม้ในด้านรับแรงดึงแล้วก็ตามรอยร้าวที่ขยายตัวมากขึ้นอาจจะมีบางส่วนขยายเข้าใกล้รอยต่อของคานไม้ซึ่งจะทำให้คานไม้เกิดการแตกหักอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 การวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบ

ซึ่งอย่างไรก็ตามค่าความเครียดที่ผิวบนสุดของหน้าตัดของคานไม้ที่ทำการทดสอบส่วนใหญ่แล้วพบว่าความเครียดยังคงมีค่าต่ำกว่าค่าความเครียดวิบัติในด้านรับแรงอัด สำหรับคานไม้ยางพาราประกอบที่ทำการเสริมกำลังทั้งผิวบนและล่างสุดรูปแบบการวิบัติมีความคล้ายคลึงกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือจะพบรอยแตกร้าวบนหน้าตัดด้านรับแรงดึงซึ่งรอยร้าวดังกล่าวจะขยายไปสู่ผิวรอยต่อของคานไม้ซึ่งทำให้คานวิบัติในที่สุด นอกจากนี้สำหรับรูปแบบการวิบัติของคานไม้ยางพาราประกอบซึ่งถูกทดสอบภายใต้การดัดแบบ 5 จุดพบรูปแบบการวิบัติคล้ายคลึงที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 การวัดของคานไม้ยางพาราประกอบภายใต้การตัดแบบ 5 จุด

6.8 ตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูป (Deformability Factor)

ค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูปถูกทำการประเมินสำหรับคานไม้ยางพาราประกอบเพื่อตรวจสอบความสามารถและพฤติกรรมในช่วงหลังการรับน้ำหนักสูงสุด โดยอาศัยวิธีการตามมาตรฐาน EN 1995-1-1: European Committee for Standardization 2004 ดังแสดงรายละเอียดการประเมินไว้ในหัวข้อที่ 5.4 จากผลการประเมินค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูปพบว่าค่าตัวประกอบดังกล่าวมีแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าเฉลี่ยของค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูปมีค่าระหว่าง 1.643-2.23 สำหรับคานไม้ยางพาราประกอบเสริมกำลังทั้งผิวบนและผิวล่างของคาน และมีค่าระหว่าง 1.529-1.629 สำหรับคานไม้ยางพาราประกอบที่ผิวล่างของคาน นอกจากนี้ในกรณีของคานไม้ยางพาราประกอบซึ่งไม่ทำการเสริมกำลังพบว่าค่าตัวประกอบการเปลี่ยนแปลงรูปมีค่าอยู่ระหว่าง 1.353-1.517.