

พฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีและอิทธิพลของการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น Flexural Behavior of Epoxy-Bonded Timber and the Influence of Steel Bar Reinforcement

อุษงค์ มณีขัตติย์, เขมวัญญ์ วรรณศิริ*, สุรเดช ต่างเพชร และ อมเรศ มธุรส

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย จ.เชียงราย

*Corresponding author; E-mail address: khemmawit2@hotmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และประเมินผลของการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ประเภทไม้ ซึ่งแบ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง (ไม้แดง) และไม้เนื้ออ่อน (ไม้สน) และประเภทของอีพอกซี ได้แก่ อีพอกซีความหนาแน่นสูงและอีพอกซีความหนาแน่นต่ำ ไม้ตัวอย่างมีขนาดหน้าตัด 50x50 มิลลิเมตร ยาว 760 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ASTM D143 โดยประเมินผลจากแรงดัดสูงสุด การแอ่นตัวสูงสุด ค่าความแข็งแรงแรงสูงสุด และรูปแบบการวิบัติ ผลการศึกษาพบว่า การเสริมเหล็กเส้นกลมผิวเรียบร่วมกับอีพอกซีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้ไม้เนื้อแข็งมีแรงดัดสูงสุดเพิ่มขึ้น 17–20% และไม้เนื้ออ่อนเพิ่มขึ้น 39–124% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมกำลัง การเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นยังช่วยเพิ่มการแอ่นตัวสูงสุด โดยไม้เนื้อแข็งเพิ่มขึ้น 24–37% และไม้เนื้ออ่อนเพิ่มขึ้น 13–91% วัสดุประสานอีพอกซีความหนาแน่นสูงช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงแรงของไม้จากคุณสมบัติการยึดเกาะที่ดี ผลลัพธ์จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบและพัฒนาโครงสร้างไม้ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความยั่งยืนต่อไป

คำสำคัญ: พฤติกรรมการรับแรงดัด, ไม้, อีพอกซี, การเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น

Abstract

This study aimed to investigate the flexural behavior of epoxy-bonded timber and evaluate the influence of reinforcing with smooth round steel bars on structural performance. The variables studied included wood type, classified as hardwood (Redwood) and softwood (Pinewood), and epoxy types comprising high-density epoxy and low-density epoxy. All timber specimens had cross-sectional dimensions of 50x50 mm and a length of 760 mm according to ASTM D143 standard. The parameters evaluated included ultimate bending load, ultimate deflection, ultimate stiffness, and failure modes. The results indicated that reinforcement with smooth round steel bars combined with high-density epoxy significantly increased the ultimate bending load by 17–20% for hardwood and 39–124% for softwood compared to non-reinforced specimens. Reinforcement also increased the ultimate deflection by 24–37% in hardwood and 13–91% in softwood. High-density epoxy contributed to improved stiffness due to its excellent bonding characteristics. The results from this research

can be effectively applied to the design and development of timber structures with enhanced structural performance and sustainability.

Keywords: Flexural behavior, Timber, Epoxy, Steel bar reinforcement

1. บทนำ

ไม้เป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในงานก่อสร้างมาตั้งแต่ยุคโบราณ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่น เช่น ความสามารถในการรับน้ำหนักจำเพาะสูง (high strength-to-weight ratio) ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (environmental friendliness) และความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon sequestration) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดด้านความแข็งแรงเชิงโครงสร้างและความทนทานต่อแรงกระทำภายนอก (durability) ทำให้ไม้มีข้อเสียเปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุโครงสร้างอื่น เช่น คอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็กกล้า ดังนั้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของไม้ในงานโครงสร้าง ได้มีการศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังเพื่อปรับปรุงสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้

เทคนิคการเสริมกำลังไม้ด้วยแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและเหล็กเส้นเสริมกำลังเป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้เทคนิคการเสริมกำลังแบบใกล้พื้นผิว (near-surface mounted, NSM) ซึ่งช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดัดและความแข็งแรงของไม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยของ Mathuros และคณะ [1] ได้ศึกษาการเสริมกำลังไม้โดยใช้แท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วติดตั้งด้วยเทคนิคดังกล่าว พบว่าสามารถเพิ่มกำลังรับแรงดัดของไม้ได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ งานวิจัยของ อมเรศ และคณะ [2] ยังได้ศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว เหล็กเส้นเสริมกำลังและไม้ โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงดึง (pull-out test) เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของแรงยึดเหนี่ยว พบว่าไม้เนื้อแข็งสามารถให้แรงยึดเหนี่ยวสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน และการใช้เหล็กเส้นข้ออ้อยเป็นวัสดุเสริมกำลังให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยังพบว่าในบางกรณีอาจเกิดการหลุดล่อน (debonding) ระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและโครงสร้างไม้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้เทคนิคดังกล่าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของไม้ได้อย่างเต็มที่

อีกแนวทางหนึ่งในการพัฒนาไม้ให้มีสมรรถนะเชิงโครงสร้างสูงขึ้น คือ การเสริมกำลังไม้ด้วยเหล็กเส้น งานวิจัยของ Wei และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาทั้งในเชิงทดลองและทฤษฎีเกี่ยวกับพฤติกรรมของคานไม้เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น โดยทำการทดสอบแรงดัดเพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการรับน้ำหนักและความแข็งแรงของคานไม้ ผลการศึกษพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนการเสริมกำลัง (reinforcement ratio) และการใช้เหล็กเส้น

ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้นช่วยเพิ่มกำลังรับน้ำหนักสูงสุดของคานไม้ได้ อย่างมีนัยสำคัญ และยังช่วยเพิ่มค่าความแข็งแรงของโครงสร้างไม้ได้ถึง 37%

แม้ว่างานวิจัยก่อนหน้านี้จะศึกษาเทคนิคการเสริมกำลังไม้โดยใช้แท่ง พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและเหล็กเส้น รวมถึงพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว ระหว่างวัสดุเสริมกำลังและไม้ แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับ อิทธิพลของประเภทไม้และประเภทอีพอกซีที่ใช้เป็นตัวประสานต่อ พฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีโดยตรง นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ว่าการเสริมกำลังด้วย เหล็กเส้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของไม้ที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และส่งผลต่อรูปแบบการเสียรูปและการวิบัติของไม้ที่เชื่อมประสานได้อย่าง ชัดเจน

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาค้นคว้าอิทธิพลของประเภทไม้ทั้งไม้เนื้อ แข็งและไม้เนื้ออ่อน และประเภทของอีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูงและต่ำ ต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้เชื่อมประสาน รวมถึงการวิเคราะห์ผล ของการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการ พัฒนาเทคนิคการเสริมกำลังไม้ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยตัวอย่างไม้ ถูกเตรียมโดยการเชื่อมประสานไม้สองส่วนเข้าด้วยกันตามแนวยาวโดยใช้ อีพอกซี และกลุ่มตัวอย่างที่ทำการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นเพื่อเปรียบเทียบ กับกลุ่มควบคุม จากนั้นได้ทำการทดสอบแรงดัดเพื่อประเมินค่าแรงดัด สูงสุด การแอ่นตัวสูงสุด ค่าความแข็งแรงสูงสุด และรูปแบบการวิบัติ

ผลการศึกษาช่วยให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งยิ่งขึ้นเกี่ยวกับอิทธิพลของ ประเภทไม้และอีพอกซีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้เชื่อมประสาน ตลอดจนผลการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของ ไม้ ซึ่งจะเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเทคนิคการเสริมกำลังไม้ให้มี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างพื้นฐานที่ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น สะพานไม้ อาคารไม้ และโครงสร้างรองรับ น้ำหนักในพื้นที่ชนบทและเมือง ซึ่งช่วยลดการใช้วัสดุที่ปล่อยก๊าซเรือน กระจกสูง ลดของเสียจากการก่อสร้าง และส่งเสริมการใช้ทรัพยากร หมุนเวียน (renewable resources) อย่างมีประสิทธิภาพ

2. ระเบียบการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ที่ ผ่านการเชื่อมประสานด้วยอีพอกซีและการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิว เรียบ โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา ได้แก่ ประเภทของไม้ (ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้ออ่อน) และรูปแบบของการเสริมกำลัง (ไม้ที่ไม่เสริมกำลัง ไม้ที่ เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และไม้ที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีร่วมกับ เหล็กเส้น) โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย วิธีการออกแบบไม้ตัวอย่าง รายละเอียดของตัวอย่าง ขั้นตอนการเตรียม ตัวอย่าง และวิธีการทดสอบแรงดัด เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการเสริม กำลังในเชิงโครงสร้างของไม้

2.1 คุณสมบัติของวัสดุ

2.1.1 ไม้

ไม้ตัวอย่าง มี 2 ประเภท ได้แก่ ไม้เนื้อแข็ง (ไม้แดง) และไม้เนื้ออ่อน (ไม้สน) คุณสมบัติของไม้ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 143 [4] แสดงดัง ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของไม้

คุณสมบัติ	ประเภทของไม้	
	ไม้เนื้อแข็ง (ไม้แดง)	ไม้เนื้ออ่อน (ไม้สน)
ความชื้น (%)	12.3	11.8
ความหนาแน่น (kg/m ³)	815.4	524.6
แรงอัดขนานเส้น (MPa)	46.0	25.4
แรงอัดตั้งฉากเส้น (MPa)	16.6	8.4
แรงดึง (MPa)	125.5	55.1
โมดูลัสยืดหยุ่นรับแรงดึง (MPa)	15,441	8,427
โมดูลัสแตกหัก (MPa)	107.4	42.5
แรงเฉือนขนานเส้น (MPa)	9.6	6.8

2.1.2 เหล็กเส้นกลมผิวเรียบ

คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร (RB6) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM A615 [5] แสดงดังตาราง ที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ

คุณสมบัติทางกลของเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ	ค่า
แรงดึงสูงสุด (MPa)	510.3
แรงดึง ณ จุดคราก (MPa)	363.4
โมดูลัสความยืดหยุ่นรับแรงดึง (GPa)	211.1
ความเคียวสูงสุด (%)	15.8

2.1.3 วัสดุประสาน

วัสดุประสาน คือ อีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูง (Sikadur®-31 CF Normal) และอีพอกซีที่มีความหนาแน่นต่ำ (Sikadur®-52 TH) โดยมี คุณสมบัติของวัสดุประสานจากผู้ผลิต [6] [7] แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัสดุประสาน

คุณสมบัติของวัสดุประสาน	ค่า	
	Sikadur®-31 CF Normal	Sikadur®-52 TH
ความหนาแน่น (kg/l)	1.90 ± 0.1	1.1
แรงดึง (MPa)	21	25
โมดูลัสยืดหยุ่นรับแรงดึง (MPa)	5,000	-
ความเคียวรับแรงดึง ณ จุดแตกหัก (%)	0.4 ± 0.1	-

2.2 การออกแบบไม้ตัวอย่าง

การศึกษานี้ออกแบบไม้ตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D 143 [4] โดย ไม้ตัวอย่างทั้งหมดได้รับการออกแบบให้มีขนาดหน้าตัด 50×50 มิลลิเมตร และความยาว 760 มิลลิเมตร โดยมีทิศทางของเส้นไม้นานากับแนวยาว ของตัวอย่าง เพื่อให้สามารถประเมินผลกระทบของการเชื่อมประสานด้วย อีพอกซีและการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบไม้ตัวอย่างแบ่งออกเป็นสามรูปแบบ หลัก ได้แก่ ไม้ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง ไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอก ซี และไม่ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีพร้อมการเสริมกำลังด้วย เหล็กเส้น

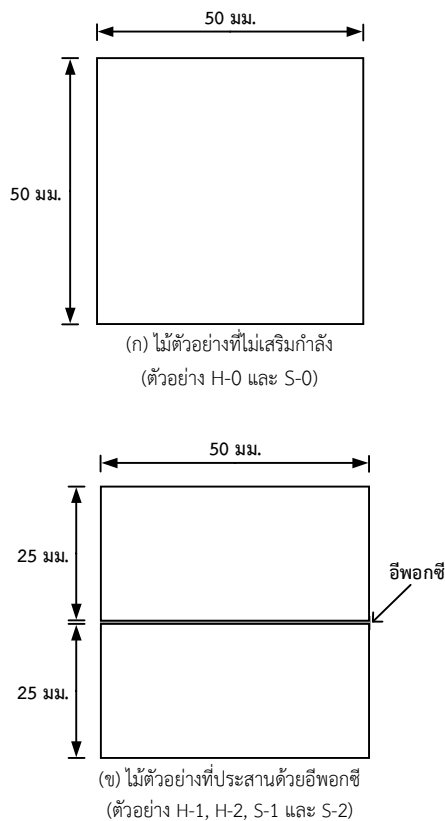
ไม้ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลังถูกกำหนดให้เป็นกลุ่มควบคุมในการศึกษา มี ขนาดหน้าตัด 50×50 มิลลิเมตร และความยาว 760 มิลลิเมตร โดยไม่มี

การเชื่อมประสานหรือเสริมกำลังเพิ่มเติม ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นฐานในการเปรียบเทียบสมรรถนะเชิงโครงสร้างกับไม้ตัวอย่างที่ได้รับการพัฒนาในรูปแบบอื่น สำหรับไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี ได้มีการออกแบบให้ไม้แบ่งออกเป็นสองชิ้น แต่ละชิ้นมีขนาด กว้าง 50 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร และความยาว 760 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเชื่อมประสานด้วยอีพอกซีที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร

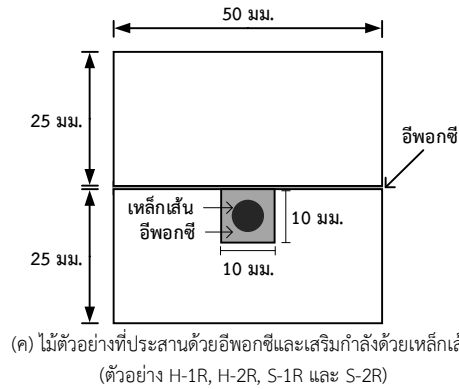
ไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น ได้รับการออกแบบโดยมีโครงสร้างคล้ายกับไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี แต่ได้มีการเพิ่มเหล็กเส้นเป็นองค์ประกอบเสริมกำลัง โดยในชิ้นไม้ด้านล่างจะถูกเจาะรูที่กึ่งกลาง ขนาด 10×10 มิลลิเมตร เพื่อเสริมเหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จากนั้นทำการเชื่อมประสานไม้ทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกันโดยใช้อีพอกซีที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ซึ่งถูกควบคุมให้มีความสม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถประเมินผลของการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ได้อย่างแม่นยำ

การออกแบบไม้ตัวอย่างทั้งสามรูปแบบนี้มุ่งเน้นการควบคุมตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ขนาดของไม้ ทิศทางของเส้นใยไม้ และความหนาของชั้นอีพอกซี เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเชื่อมประสานและการเสริมกำลังต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ได้อย่างเป็นระบบ

รายละเอียดของไม้ตัวอย่างทั้งสามรูปแบบแสดงใน รูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย (ก) ไม้ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง (ข) ไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และ (ค) ไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น โดยทิศทางของเส้นใยไม้แสดงดังรูปที่ 3 (ข)



รูปที่ 1 รายละเอียดของไม้ตัวอย่าง



รูปที่ 1 รายละเอียดของไม้ตัวอย่าง (ต่อ)

2.3 รายละเอียดตัวอย่างและผลการทดสอบ

การศึกษานี้ได้ทำการทดสอบไม้ตัวอย่างทั้งหมดจำนวน 30 ตัวอย่าง โดยตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ประเภทของไม้ ได้แก่ ไม้เนื้อแข็ง (ไม้แดง) และไม้เนื้ออ่อน (ไม้สน) ประเภทของอีพอกซีที่ใช้เป็นวัสดุประสาน ได้แก่ อีพอกซีความหนาแน่นสูงและอีพอกซีความหนาแน่นต่ำ รวมถึงการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดและผลการทดสอบไม้ตัวอย่าง โดยไม้ตัวอย่างทั้งหมดถูกออกแบบและจัดเตรียมตามมาตรฐาน ASTM D143 [4] มีขนาดหน้าตัด 50×50 มิลลิเมตร และความยาว 760 มิลลิเมตร โดยทำการเชื่อมประสานไม้สองชิ้นเข้าด้วยกันตามแนวยาว โดยควบคุมความหนาของชั้นอีพอกซีไว้ที่ 2 มิลลิเมตร สำหรับไม้ตัวอย่างที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น ได้ทำการเจาะรูที่กึ่งกลางเนื้อไม้ขนาด 10×10 มิลลิเมตร เพื่อฝังเหล็กเส้นพร้อมยึดด้วยอีพอกซี จากนั้นทำการทดสอบแรงดัดจนเกิดการวิบัติ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบคือ ค่าแรงดัดสูงสุด การแอ่นตัวสูงสุด ค่าความแข็งแรงสูงสุด และรูปแบบการวิบัติ

ตารางที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างและผลการทดสอบ

ตัวอย่าง	ประเภทไม้	ประเภทวัสดุประสาน	วัสดุเสริมกำลัง	P_u (kN)	Δ_u (mm)	S_u (kN/m)	รูปแบบการวิบัติ
กลุ่ม H-0	H-0-1	ไม้แดง	-	14.99	22.66	740.20	ST
	H-0-2	ไม้แดง	-	13.05	16.09	819.10	ST
	H-0-3	ไม้แดง	-	15.60	19.17	818.00	ST
	ค่าเฉลี่ย			14.54	19.31	792.43	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.33	3.29	45.24	
กลุ่ม H-1	H-1-1	ไม้แดง	1	14.78	22.99	762.20	CT
	H-1-2	ไม้แดง	1	13.76	14.30	886.20	CT
	H-1-3	ไม้แดง	1	13.86	15.09	861.20	CT
	ค่าเฉลี่ย			14.14	17.46	836.53	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.56	4.81	65.58	
กลุ่ม H-2	H-2-1	ไม้แดง	2	6.83	11.71	572.00	DB
	H-2-2	ไม้แดง	2	6.12	12.18	467.10	DB
	H-2-3	ไม้แดง	2	6.42	14.90	454.60	DB
	ค่าเฉลี่ย			6.46	12.93	497.90	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน			0.36	1.72	64.48	

ตารางที่ 4 รายละเอียดตัวอย่างและผลการทดสอบ (ต่อ)

ตารางที่ 4 : ค่าเฉลี่ยทดสอบ กลไกของเสาเข็มภายใต้ (หน่วย)								
ตัวอย่าง		ประเภทไม้	ประเภทวัสดุประสาน	วัสดุเสริมกำลัง	P_u (kN)	Δ_u (mm)	S_u (kN/m)	รูปแบบการวิบัติ
กลุ่ม H-1R	H-1R-1	ไม้แดง	1	RB6	18.29	24.21	820.40	CT
	H-1R-2	ไม้แดง	1	RB6	16.91	23.69	850.70	CT
	H-1R-3	ไม้แดง	1	RB6	15.78	23.81	718.90	CT
	ค่าเฉลี่ย				16.99	23.90	796.67	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.26	0.27	69.03	
กลุ่ม H-2R	H-2R-1	ไม้แดง	2	RB6	9.05	16.59	473.60	DB
	H-2R-2	ไม้แดง	2	RB6	9.68	14.52	609.10	DB
	H-2R-3	ไม้แดง	2	RB6	8.67	17.15	473.60	DB
	ค่าเฉลี่ย				9.14	16.08	518.77	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.51	1.38	78.23	
กลุ่ม S-0	S-0-1	ไม้สน	-	-	7.77	16.67	442.20	CT
	S-0-2	ไม้สน	-	-	8.16	19.00	476.30	CT
	S-0-3	ไม้สน	-	-	6.78	19.73	405.00	CT
	ค่าเฉลี่ย				7.57	18.47	441.17	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.71	1.60	35.66	
กลุ่ม S-1	S-1-1	ไม้สน	1	-	6.52	17.95	350.20	BT
	S-1-2	ไม้สน	1	-	4.59	15.15	271.60	BT
	S-1-3	ไม้สน	1	-	6.32	18.08	337.60	BT
	ค่าเฉลี่ย				5.81	17.06	319.80	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.06	1.65	42.22	
กลุ่ม S-2	S-2-1	ไม้สน	2	-	4.89	12.12	414.20	BT
	S-2-2	ไม้สน	2	-	4.69	11.82	400.00	BT
	S-2-3	ไม้สน	2	-	4.49	8.89	511.50	BT
	ค่าเฉลี่ย				4.69	10.94	441.90	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.20	1.78	60.69	
กลุ่ม S-1R	S-1R-1	ไม้สน	1	RB6	11.52	21.50	652.00	ST
	S-1R-2	ไม้สน	1	RB6	10.19	21.65	584.70	ST
	S-1R-3	ไม้สน	1	RB6	9.89	19.62	534.00	ST
	ค่าเฉลี่ย				10.53	20.93	590.23	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.87	1.13	59.19	
กลุ่ม S-2R	S-2R-1	ไม้สน	2	RB6	5.12	16.67	326.00	ST
	S-2R-2	ไม้สน	2	RB6	6.01	14.83	448.90	ST
	S-2R-3	ไม้สน	2	RB6	5.81	15.42	412.70	ST
	ค่าเฉลี่ย				5.65	15.64	395.87	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.47	0.94	63.16	

จากตารางที่ 4 กำหนดให้ ประเภทวัสดุประสาน 1 หมายถึง อีพอกซีค่าความหนาแน่นสูง (Sikadur®-31 CF Normal) และ ประเภทวัสดุประสาน 2 หมายถึง อีพอกซีค่าความหนาแน่นต่ำ (Sikadur®-52 TH) สำหรับตัวแปร P_u หมายถึง แรงดัดสูงสุดที่ไม้ตัวอย่างสามารถรับได้ มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (kN), Δ_u หมายถึง การแอ่นตัวสูงสุดของไม้ ณ แรงดัดสูงสุด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) และ S_u หมายถึง ความแข็งแรงสูงสุดของไม้ตัวอย่าง มีหน่วยเป็นเมกะปาสคาล (MPa) ส่วนประเภทของการวิบัติ ได้แก่ ST หมายถึง การวิบัติของไม้จากแรงดึงทั่วไป (Simple Tensile

Failure of Timber), CT หมายถึง การวิบัติของไม้จากแรงดึงขวางเฉียง (Cross-Grain Tensile Failure of Timber), DB หมายถึง การลอกหลุดของอีพอกซี (Debonding of Epoxy), และ BT หมายถึง การวิบัติของไม้จากแรงดึงแบบเปราะขาด (Brash Tension Failure of Timber)

2.4 การเตรียมไม้ตัวอย่าง

รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการเตรียมไม้ตัวอย่าง ซึ่งเริ่มจากการตัดไม้ให้มีขนาดตามที่กำหนดในรูปที่ 1 โดยแบ่งออกเป็นสามรูปแบบ ได้แก่ ไม้ตัวอย่างที่ไม่เสริมกำลัง ไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และไม่ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีพร้อมการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น สำหรับไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี ทำการเตรียมไม้จำนวนสองชิ้น โดยแต่ละชิ้นมีขนาดกว้าง 50 มิลลิเมตร สูง 25 มิลลิเมตร และยาว 760 มิลลิเมตร

สำหรับไม้ตัวอย่างที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น ทำการเจาะรูบริเวณกึ่งกลางของชิ้นไม้ด้านล่าง ขนาด 10×10 มิลลิเมตร เพื่อรองรับเหล็กเส้นกลมผิวเรียบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จากนั้นติดตั้งเทปกาวยาวบริเวณรอยต่อไม้เพื่อป้องกันการไหลซึมของอีพอกซีไปยังบริเวณที่ไม่ต้องการ หลังจากนั้นจึงติดตั้งเหล็กเส้นลงในร่องและใช้อีพอกซีเป็นวัสดุประสาน โดยควบคุมให้อีพอกซีอยู่เฉพาะบริเวณที่ประสานและร่องที่เจาะไว้เท่านั้น ทั้งนี้ ความหนาของอีพอกซีบริเวณรอยต่อถูกควบคุมให้อยู่ที่ 2 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้ความสม่ำเสมอในทุกตัวอย่าง

เมื่อกระบวนการประกอบไม้ตัวอย่างเสร็จสมบูรณ์ ทำการบ่มอีพอกซีที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 10 วัน เพื่อให้วัสดุประสานเซตตัวอย่างสมบูรณ์ หลังจากครบกำหนดการบ่ม ทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของรอยต่อ ก่อนนำไม้ตัวอย่างเข้าสู่กระบวนการทดสอบแรงดัดเพื่อประเมินสมรรถนะเชิงโครงสร้างต่อไป



(ก) จัดเตรียมไม้ตัวอย่าง



(ข) ตัดเทปกาวยาว และติดตั้งวัสดุเสริมกำลัง

รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมไม้ตัวอย่าง



(ค) ประกอบไม้ตัวอย่างและบ่มอีพอกซีไว้ที่อุณหภูมิห้อง

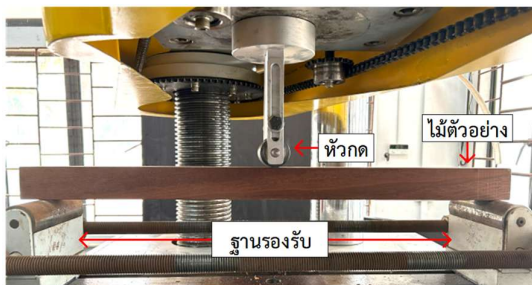


(ง) หลังจากครบกำหนดการบ่ม นำเหล็กรอกออก และทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของรอยต่อ ก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบแรงดัด

รูปที่ 2 ขั้นตอนการเตรียมไม้ตัวอย่าง (ต่อ)

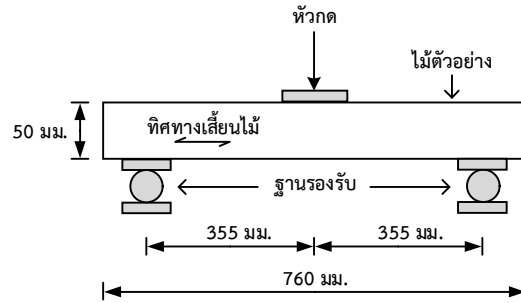
2.5 การทดสอบแรงดัด

การทดสอบแรงดัดของไม้ตัวอย่างทั้งหมด ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal Testing Machine, UTM) ตามมาตรฐาน ASTM D 143 [4] แสดงดังรูปที่ 3 เพื่อประเมินพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้ภายใต้แรงกระทำที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การทดสอบนี้ใช้ไม้ตัวอย่างที่มีช่วงพาด 710 มิลลิเมตร โดยติดตั้งบนฐานรองรับแบบสองจุดและกระทำแรงกดที่กึ่งกลางคานผ่านหัวกดที่ออกแบบให้สอดคล้องกับมาตรฐาน วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วย (1) ไม้ตัวอย่าง (2) หัวกด (loading head) และ (3) ฐานรองรับ (bearing support) แรงกระทำถูกควบคุมให้เพิ่มขึ้นด้วยอัตราการเคลื่อนที่ของหัวกดที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที จนกระทั่งตัวอย่างเกิดการวิบัติ โดยหัวกดสามารถวัดการแอ่นตัวของไม้ที่จุดกึ่งกลางได้โดยตรง ผลการทดสอบประกอบด้วยการบันทึกแรงดัดสูงสุด (ultimate bending strength) การแอ่นตัวสูงสุด (ultimate deflection) ที่จุดกลางช่วงพาดของไม้ตัวอย่าง และลักษณะการวิบัติของตัวอย่าง (failure mode)



(ก) รูปถ่าย

รูปที่ 3 การทดสอบแรงดัด



(ข) รูปจำลอง

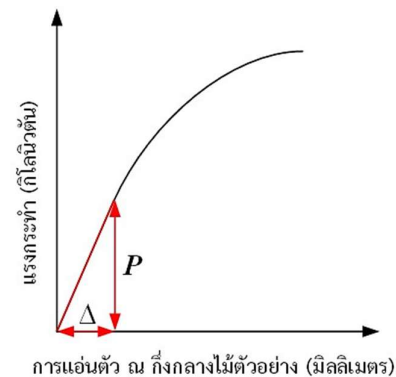
รูปที่ 3 การทดสอบแรงดัด (ต่อ)

3. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบแรงดัดของไม้ตัวอย่างทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยค่าแรงดัดสูงสุด (P_u) การแอ่นตัวสูงสุด (Δ_u) ค่าความแข็งแรงสูงสุด (S_u) และรูปแบบการวิบัติของไม้ตัวอย่างแต่ละประเภท ไม้ตัวอย่างในทุกกลุ่มแสดงพฤติกรรมทางกลแบบเชิงเส้นในช่วงต้นของการรับแรงดัด ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัดกับการแอ่นตัวมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง ก่อนที่พฤติกรรมจะเปลี่ยนไปเป็นแบบไม่เชิงเส้นเมื่อแรงดัดเข้าใกล้ค่ามากที่สุด และนำไปสู่การวิบัติในที่สุด ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ใช้ในการเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ หมายถึง ค่าความแข็งแรงเริ่มต้น (Initial Stiffness) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$S_u = \frac{P}{\Delta} \quad (1)$$

ค่าความแข็งแรงเริ่มต้นดังกล่าว คำนวณจากความชันของกราฟแรงดัดต่อการแอ่นตัวในช่วงที่แสดงพฤติกรรมเชิงเส้น โดยที่ P หมายถึง ค่าแรงดัดในช่วงที่กราฟมีลักษณะเชิงเส้นตรง มีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน (kN) และ Δ หมายถึง ค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับแรงดัด P มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร (mm) โดยช่วงดังกล่าวสามารถสังเกตได้จาก รูปที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางคาน พร้อมระบุช่วงเชิงเส้นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงเริ่มต้น ทั้งนี้ แนวทางการคำนวณดังกล่าวสอดคล้องกับวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยของ Mathuros และคณะ [1] ซึ่งประเมินค่าความแข็งแรงขององค์ประกอบเชิงโครงสร้างโดยพิจารณาความชันของกราฟในช่วงที่วัสดุแสดงพฤติกรรมเชิงเส้น



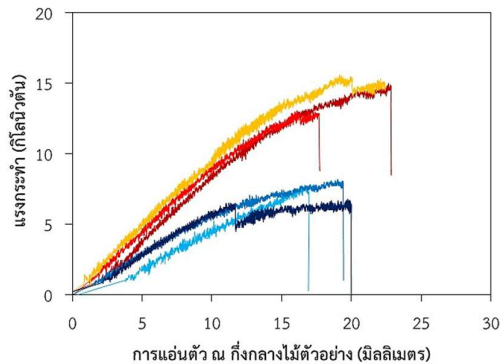
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางคาน พร้อมช่วงที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงเริ่มต้น

โดยมีการวิเคราะห์รายละเอียดและเปรียบเทียบผลการทดสอบอย่างชัดเจนในแต่ละหัวข้อ ดังนี้

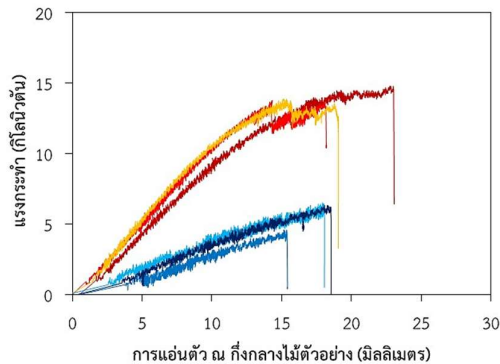
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางไม้ตัวอย่าง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางไม้ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 5 สามารถสังเกตพฤติกรรมเชิงเส้นของไม้ตัวอย่างในช่วงต้นของการรับแรงได้อย่างชัดเจน ก่อนที่วัสดุจะเข้าสู่ช่วงไม่เป็นเชิงเส้นและเกิดการวิบัติในเวลาต่อมา ค่าความแข็งแรงของไม้ตัวอย่างแต่ละกลุ่ม ซึ่งคำนวณจากความชันของกราฟในช่วงพฤติกรรมเชิงเส้น แสดงถึงความสามารถของไม้ในการต้านทานแรงกระทำในช่วงที่วัสดุยังไม่เกิดการเสียรูปถาวร

จากการเปรียบเทียบพบว่า กลุ่มไม้เนื้อแข็ง (H-0, H-1 และ H-1R) มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ยสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน (S-0, S-1 และ S-1R) อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าประมาณ 34% ถึง 162% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของชนิดไม้และวัสดุเสริมกำลังที่มีผลต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของชนิดไม้และวัสดุเสริมกำลังที่มีผลต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kurzinski และคณะ [8] ที่เน้นถึงความสำคัญของการเลือกใช้ไม้ที่มีสมบัติเชิงกลเหมาะสม เช่น ไม้เนื้อแข็ง ในการเพิ่มความแข็งแรงและประสิทธิภาพการรับแรงขององค์ประกอบไม้ในระบบโครงสร้าง สะท้อนถึงบทบาทของคุณสมบัติของไม้ในการส่งผ่านและต้านทานแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะรับแรงดัด

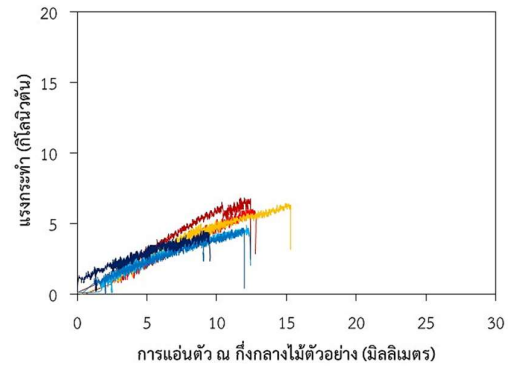


(น) กลุ่มตัวอย่าง H-0 และ S-0

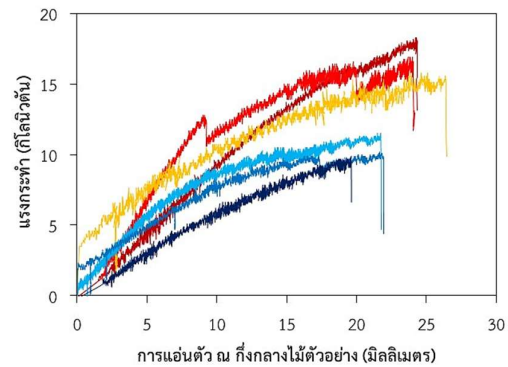


(ข) กลุ่มตัวอย่าง H-1 และ S-1

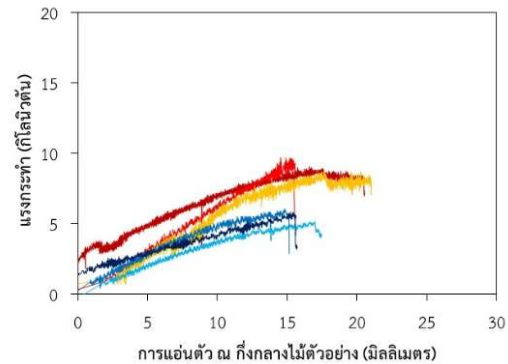
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางไม้ตัวอย่าง



(ค) กลุ่มตัวอย่าง H-2 และ S-2



(ง) กลุ่มตัวอย่าง H-1R และ S-1R



(จ) กลุ่มตัวอย่าง H-2R และ S-2R

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการแอ่นตัว ณ กึ่งกลางไม้ตัวอย่าง (ต่อ)

3.2 แรงดัดสูงสุด

ผลการเปรียบเทียบแรงดัดสูงสุด (P_u) ในรูปที่ 6 (ก) แสดงให้เห็นว่า กลุ่มไม้เนื้อแข็งที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีความหนาแน่นสูงและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น (H-1R) มีค่าแรงดัดเฉลี่ยสูงสุด (16.99 kN) ซึ่งสูงกว่ากลุ่มไม้เนื้อแข็งไม่เสริมกำลัง (H-0) 17% และสูงกว่ากลุ่มไม้เนื้อแข็งที่เชื่อม

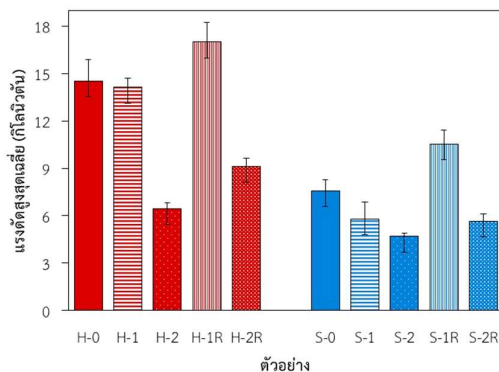
ประสานด้วยอ็อกซีความหนาแน่นสูงอย่างเดียว (H-1) 20% สำหรับกลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่เสริมเหล็กเส้น (S-1R) มีค่าแรงดัดสูงสุดเฉลี่ย 10.53 kN สูงกว่ากลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่ไม่เสริมกำลัง (S-0) ถึง 39% และสูงกว่ากลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่เชื่อมประสานด้วยอ็อกซีความหนาแน่นต่ำ (S-2) ถึง 124% ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้วัสดุประสานที่เหมาะสมช่วยให้การถ่ายแรงระหว่างวัสดุประสานกับเนื้อไม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งเมื่อรวมกับการเสริมเหล็กเส้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแรงดัดของไม้ตัวอย่างได้อย่างชัดเจน

3.3 การแอ่นตัวสูงสุด

ผลการทดสอบ ในรูปที่ 6 (ข) แสดงให้เห็นว่าการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นส่งผลให้การแอ่นตัวสูงสุด (Δ_m) ของไม้ตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ กลุ่มไม้เนื้อแข็งที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น (H-1R) มีค่าการแอ่นตัวเฉลี่ยสูงสุด (23.90 mm) ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมกำลัง (H-0) 24% และสูงกว่ากลุ่มที่ใช้เฉพาะอ็อกซีความหนาแน่นสูง (H-1) ถึง 37% เนื่องจากเหล็กเส้นช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายแรงดึงและลดโอกาสในการเกิดรอยแตก ส่งผลให้ไม้ตัวอย่างมีการแอ่นตัวได้มากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ ในขณะที่ไม้เนื้ออ่อนที่เสริมเหล็กเส้น (S-1R) มีค่าการแอ่นตัวสูงกว่าไม้เนื้ออ่อนที่ไม่เสริมกำลัง (S-0) 13% และสูงกว่าไม้เนื้ออ่อนที่ประสานด้วยอ็อกซีความหนาแน่นต่ำ (S-2) 91% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Jurkiewicz และคณะ [9] ที่ศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของคานโครงสร้างผสมระหว่างเหล็กและไม้ โดยพบว่าการเสริมกำลังด้วยเหล็กช่วยเพิ่มการแอ่นตัวสูงสุดได้อย่างมีนัยสำคัญ อันเป็นผลมาจากการถ่ายแรงร่วมกันระหว่างไม้และเหล็ก ซึ่งส่งเสริมความสามารถในการเปลี่ยนรูปก่อนเกิดการวิบัติขององค์ประกอบโครงสร้าง

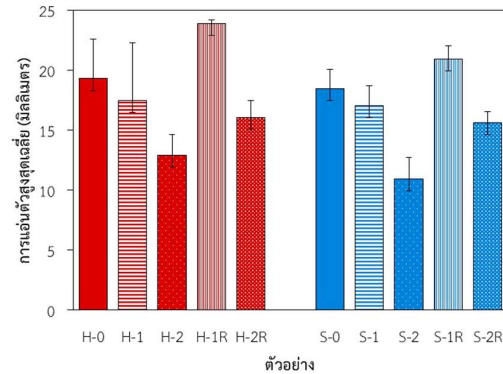
3.4 ค่าความแข็งแรงสูงสุด

จากการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงสูงสุด (S_m) ในรูปที่ 6 (ค) พบว่ากลุ่มไม้เนื้อแข็งที่ประสานด้วยอ็อกซีความหนาแน่นสูง (H-1) มีค่าความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ย (836.53 kN/m) ซึ่งสูงกว่ากลุ่มไม้เนื้อแข็งที่ไม่เสริมกำลัง (H-0) 6% และสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเหล็กเส้น (H-1R) 5% เนื่องจากอ็อกซีความหนาแน่นสูงมีสมบัติในการยึดเกาะที่ดีและมีความแข็งแรงสูงซึ่งช่วยลดการสั่นไถลระหว่างชิ้นวัสดุ ทำให้ไม้มีความสามารถในการต้านทานแรงดัดสูงขึ้น ส่วนกลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่เชื่อมประสานด้วยอ็อกซีความหนาแน่นสูง (S-1) มีค่าความแข็งแรงต่ำสุด (319.80 kN/m) ต่ำกว่ากลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่เสริมเหล็กเส้น (S-1R) ถึง 46%

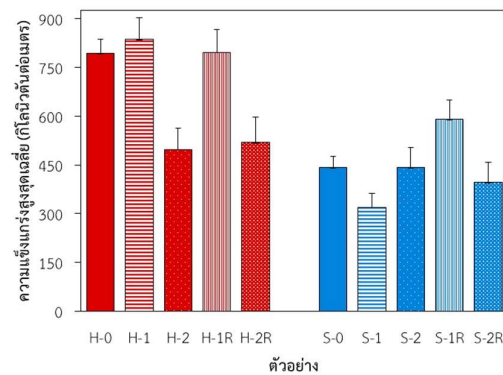


(ก) แรงดัดสูงสุดเฉลี่ย

รูปที่ 6 ผลการทดสอบ



(ข) การแอ่นตัวสูงสุดเฉลี่ย



(ค) ความแข็งแรงสูงสุดเฉลี่ย

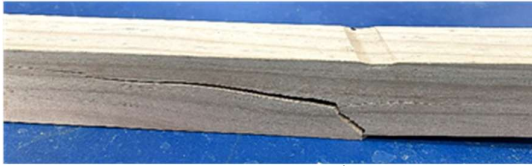
รูปที่ 6 ผลการทดสอบ (ต่อ)

3.5 รูปแบบการวิบัติ

ผลการทดสอบแสดงการวิบัติของไม้ตัวอย่างทั้งหมด 4 ประเภท ในรูปที่ 7 ได้แก่ การวิบัติจากแรงดึงทั่วไป (ST) การวิบัติจากแรงดึงขวางเสี้ยน (CT) การลอกหลุดของอ็อกซี (DB) และการวิบัติจากแรงดึงแบบเปราะขาด (BT) โดยกลุ่มไม้เนื้อแข็งส่วนใหญ่เกิดการวิบัติแบบ ST และ CT สะท้อนถึงความสามารถในการต้านทานแรงดัดที่ดีของไม้เนื้อแข็ง ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งที่ใช้วัสดุประสานอ็อกซีความหนาแน่นต่ำ (H-2 และ H-2R) เกิดการวิบัติแบบ DB อย่างชัดเจน เนื่องจากการยึดเกาะที่ไม่เพียงพอของอ็อกซี ส่งผลให้เกิดการลอกหลุดของวัสดุประสานก่อนที่จะรับแรงถึงกำลังสูงสุด สำหรับกลุ่มไม้เนื้ออ่อนส่วนใหญ่เกิดการวิบัติแบบ CT และ BT ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของไม้เนื้ออ่อนที่มีเส้นสันและเปราะแตกหักง่ายเมื่อรับแรงดึงขวางเสี้ยนสูง อย่างไรก็ตาม กลุ่มไม้เนื้ออ่อนที่เสริมกำลังด้วยเหล็กเส้น (S-1R และ S-2R) เกิดการวิบัติแบบ ST เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเหล็กเส้นสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงดึงและช่วยลดการวิบัติแบบเปราะขาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ [10] ที่ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานไม้กลูมที่เสริมกำลังด้วยพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและเหล็กเส้น โดยพบว่าการเสริมกำลังสามารถเปลี่ยนรูปแบบการวิบัติจากแบบ BT และ CT ไปเป็นแบบ ST ที่มีลักษณะเหนียวมากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานขององค์ประกอบไม้เสริมกำลังในระบบโครงสร้าง ทั้งนี้ ผลการศึกษาดังกล่าวยืนยันถึงบทบาทสำคัญของวัสดุเสริมกำลังในการเปลี่ยนพฤติกรรมการรับแรงของไม้ให้สามารถรับแรงดึงได้มากขึ้นก่อนการวิบัติ



(ก) การวิบัติจากแรงดึงทั่วไป (ST)



(ข) การวิบัติจากแรงดึงขวางเส้น (CT)



(ค) การลอกหลุดของอีพอกซี (DB)



(ง) การวิบัติจากแรงดึงแบบประชิด (BT)

รูปที่ 7 รูปแบบการวิบัติของไม้ตัวอย่าง

4. สรุปผลการทดสอบ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของไม้เชื่อมประสานด้วยอีพอกซี และผลกระทบจากการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ โดยมีตัวแปรหลักที่ศึกษา ได้แก่ ประเภทไม้ (ไม้เนื้อแข็ง คือ ไม้แดง และไม้เนื้ออ่อน คือ ไม้สน) ประเภทของอีพอกซี (ความหนาแน่นสูง และต่ำ) และการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ โดยสรุปผลการศึกษาดังนี้

4.1 แรงดัดสูงสุด

ไม้เนื้อแข็งที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีความหนาแน่นสูงและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ สามารถรับแรงดัดสูงสุดได้สูงที่สุด โดยมีค่าแรงดัดสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมกำลังประมาณ 17–20% ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีความหนาแน่นสูงและเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ มีค่าแรงดัดสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมกำลังถึง 39% และสูงกว่ากลุ่มที่ใช้อีพอกซีความหนาแน่นต่ำถึง 124% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุประสานที่มีการยึดเกาะสูง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทแรงระหว่างชิ้นไม้และวัสดุเสริมกำลัง ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน

4.2 การแอ่นตัวสูงสุด

การเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นช่วยเพิ่มการแอ่นตัวสูงสุดให้กับไม้ตัวอย่างได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยไม้เนื้อแข็งที่เสริมเหล็กเส้นมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้น 24–37% เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมกำลัง ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนที่เสริมเหล็กเส้นมีการแอ่นตัวเพิ่มขึ้นประมาณ 13% เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมกำลัง และเพิ่มขึ้นถึง 91% เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้อีพอกซีความหนาแน่นต่ำ สาเหตุสำคัญเนื่องจากเหล็กเส้นมีความเหนียวและช่วยกระจายแรงดัดที่เกิดขึ้นในไม้ ส่งผลให้ไม้สามารถรับแรงและแอ่นตัวได้มากขึ้นก่อนเกิดการวิบัติ

4.3 ค่าความแข็งแรงสูงสุด

ไม้เนื้อแข็งที่เชื่อมประสานด้วยอีพอกซีความหนาแน่นสูง (ไม่เสริมเหล็กเส้น) ให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดมากที่สุด โดยสูงกว่ากลุ่มไม้เนื้อแข็งที่ไม่เสริมกำลังประมาณ 6% และสูงกว่ากลุ่มที่เสริมเหล็กเส้นประมาณ 5% เนื่องจากอีพอกซีความหนาแน่นสูงมีสมบัติในการยึดเกาะที่ดี ช่วยลดการลื่นไถลที่รอยต่อระหว่างไม้ ส่งผลให้ไม้มีค่าความแข็งแรงเชิงโครงสร้างสูงขึ้น สำหรับไม้เนื้ออ่อนที่เสริมเหล็กเส้นมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าไม้เนื้ออ่อนที่ใช้อีพอกซีความหนาแน่นสูงเพียงอย่างเดียวประมาณ 46%

4.4 รูปแบบการวิบัติ

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวิบัติของไม้ตัวอย่างสามารถจำแนกออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การวิบัติจากแรงดึงทั่วไป (ST) การวิบัติจากแรงดึงขวางเส้น (CT) การลอกหลุดของอีพอกซี (DB) และการวิบัติแบบประชิด (BT) โดยไม้เนื้อแข็งส่วนใหญ่มีรูปแบบการวิบัติแบบ ST และ CT สะท้อนให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ดีของไม้เนื้อแข็งในการรับแรงดัด ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนที่ใช้อีพอกซีความหนาแน่นต่ำมีการลอกหลุดของอีพอกซี (DB) เป็นหลัก เนื่องจากคุณสมบัติการยึดเกาะที่ด้อยกว่า ส่วนไม้เนื้ออ่อนพบการวิบัติแบบ CT และ BT มากที่สุด แสดงถึงความเปราะและความแข็งแรงเชิงกลที่จำกัด อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบในไม้เนื้ออ่อน พบว่ารูปแบบการวิบัติเปลี่ยนมาเป็นแบบ ST มากขึ้น ซึ่งยืนยันได้ว่าเหล็กเส้นช่วยเพิ่มความเหนียวและลดการแตกหักแบบประชิดของไม้ได้อย่างชัดเจน

โดยสรุป ผลการทดสอบจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่สำคัญของประเภทไม้ วัสดุประสาน และการเสริมกำลังด้วยเหล็กเส้นกลมผิวเรียบต่อสมรรถนะเชิงโครงสร้างของไม้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาโครงสร้างไม้ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตลอดจนสนับสนุนการใช้ไม้เป็นวัสดุโครงสร้างที่มีความมั่นคงปลอดภัยและยั่งยืนต่อไป

คำชี้แจงการมีส่วนร่วมของผู้เขียน

ฤษชงค์ มณีขัติย์ ปฏิบัติหน้าที่ในฐานะผู้ประพันธ์อันดับแรก (First Author) โดยมีบทบาทหลักในการรวบรวมและจัดการข้อมูล วิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง และจัดทำต้นฉบับร่างแรก

อมเรศ มธุรส ปฏิบัติหน้าที่ในฐานะผู้มีส่วนสำคัญทางปัญญา (Essentially Intellectual Contributor) โดยมีบทบาทสำคัญในการออกแบบกระบวนการวิจัย วิเคราะห์ข้อมูล สังเคราะห์ผลการศึกษาดูแลจนให้ข้อเสนอแนะทางวิชาการที่มีสาระสำคัญ รวมถึงการบริหารจัดการโครงการ ตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหา และการร่วมจัดทำต้นฉบับให้มีความครบถ้วนสมบูรณ์

เชมวิชญ์ วรรณศิริ ปฏิบัติหน้าที่ในฐานะผู้ประพันธ์บรรณกิจ (Corresponding Author) โดยมีบทบาทในการวางแผนทิศทางงานวิจัย กำหนดระเบียบวิธี วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึก บริหารจัดการโครงการ จัดเตรียมองค์ประกอบประกอบการนำเสนอ และรับผิดชอบในการติดต่อสื่อสารกับบรรณาธิการวารสาร รวมถึงการตรวจสอบและแก้ไขต้นฉบับให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุรเดช ต่างเพชร มีส่วนร่วมในลักษณะสนับสนุน ได้แก่ การสืบค้นข้อมูล การใช้ทรัพยากร และการควบคุมดูแลในบางขั้นตอนของกระบวนการวิจัย รวมถึงการมีส่วนร่วมในการตรวจสอบและแก้ไขต้นฉบับ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณ ศูนย์บริการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่ให้การช่วยเหลือในการทดสอบงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mathuros, A., Thongchom, C., Bui, L. V. H., and Jongvivatsakul, P. (2024). Monotonic and cyclic flexural performance of timber beams strengthened with glass fiber-reinforced polymer rods using near-surface mounted technique. *Structures*, 65, pp. 106729.
- [2] อมเรศ มธุรส, ภูซงค์ มณีขัติย์, เชมวิชญ์ วรรณศิริ, ทวีโชค เตชะธรรมวงศ์ และ สุรเดช ต่างเพชร (2567). การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแท่งพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วกับเหล็กเส้นเสริมกำลังและไม้. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 29*, เชียงใหม่, 29-31 พฤษภาคม 2567, หน้า STR15-1 - STR15-7.
- [3] Wei, Y., Yan, S., Zhao, K., Dong, F., and Li, G. (2020). Experimental and theoretical investigation of steel-reinforced bamboo scrimber beams. *Engineering Structures*, 223, pp. 111179.
- [4] ASTM D143-21 (2021). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [5] A615M-20, ASTM A615 (2020). Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [6] Sika (Thailand) Limited (2020). Sikadur®-31 CF Normal.
- [7] Sika (Thailand) Limited (2022). Sikadur®-52 TH.
- [8] Kurzinski, S., Crovella, P. and Kremer, P. (2022). Overview of Cross-Laminated Timber (CLT) and Timber Structure Standards Across the World. *Mass Timber Construction Journal*, 5, pp. 1–13.
- [9] Jurkiewicz, B., Durif, S., Bouchair, A., and Grazide, C. (2022). Experimental and analytical study of hybrid steel-timber beams in bending. *Structures*, 39, pp. 1231–1248.
- [10] Yang, H., Liu, W., Lu, W., Zhu, S., and Geng, Q. (2016). Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam

beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106, pp. 550–563.