

การออกแบบและวิเคราะห์คานไม้ไผ่อัดสำหรับหมอนประแจทางรถไฟ

Design and Analysis of Laminated Bamboo Beams for Railway Sleepers

กัสกร ทองอนันต์¹ ณัฐพล พ่อนัย² และ ชยตม์ งามโขนน³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน แนวโน้มการใช้วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะวัสดุทดแทนที่สามารถลดการพึ่งพาทรัพยากรแบบดั้งเดิม เช่น ไม้ คอนกรีต และเหล็ก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินสมรรถนะของหมอนรองรางรถไฟที่ผลิตจากไม้ไผ่อัดลามิเนต โดยใช้ไม้ไผ่หางหม่น (*Dendrocalamus sericeus*) และไม้ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper*) ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถผลิตได้ภายในประเทศไทย การผลิตหมอนไม้ไผ่ทำโดยกระบวนการอัดร้อนและอัดเย็นร่วมกับกาว 2 ประเภท ได้แก่ EPI และ PUR พร้อมทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน ISO 12856-2 ในรูปแบบ 4-Point Bending, 3-Point Bending และ Rail Seat Section จากผลการทดลองพบว่าหมอนที่ใช้กาว EPI ให้ค่าความแข็งแรงและความเหนียวสูงกว่าอย่างชัดเจน โดยสามารถรับแรงได้สูงถึง 185.83 kN และมีค่า MOE สูงถึง 25.68 GPa ขณะที่หมอนที่ใช้กาว PUR แม้จะทนชื้นได้ดีและไม่มีการแยกชั้นของวัสดุ แต่กลับแสดงพฤติกรรมเปราะและมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของไม้ไผ่ในฐานะวัสดุทางเลือกที่ยั่งยืนและสามารถพัฒนาให้ทดแทนหมอนรางจากวัสดุดั้งเดิมได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ไม้ไผ่ลามิเนต, หมอนประแจ, ISO 12856-2, ความแข็งแรง, ความยั่งยืนของวัสดุ

Abstract

The demand for sustainable construction materials has grown significantly in recent years, especially for alternatives to traditional resources such as wood, concrete, and steel. This research aims to develop and evaluate the performance of railway sleepers made from laminated bamboo using *Dendrocalamus sericeus*— and *Dendrocalamus asper*— a bamboo species cultivated in Thailand—combined with two adhesive types: EPI (Emulsion Polymer Isocyanate) and PUR (Polyurethane Reactive Adhesive). The sleepers were fabricated using both hot-press and cold-press processes and tested according to ISO 12856-2 standards using 4-point bending, 3-point bending, and rail seat section loading. Results show that the EPI-bonded sleepers exhibited superior mechanical properties, achieving a maximum load capacity of 185.83 kN and an MOE of up to 25.68 GPa. In contrast, PUR-bonded specimens demonstrated better moisture resistance and delamination resistance, but lower strength and more brittle failure characteristics. This study demonstrates the potential of laminated bamboo as a viable and sustainable alternative for railway sleeper applications in real-world engineering environments.

Keywords: laminated bamboo, railway sleeper, ISO 12856-2, flexural strength, material sustainability

1 บทนำ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา วัสดุก่อสร้างที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธามักพึ่งพาทรัพยากรแบบดั้งเดิม เช่น ไม้เนื้อแข็ง คอนกรีต และเหล็ก ซึ่งแม้วัสดุเหล่านี้จะมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย แต่กลับมีข้อจำกัดด้านความยั่งยืน เช่น การใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิต การปล่อยคาร์บอนในปริมาณมาก และการลดลงของทรัพยากรธรรมชาติ โดยเฉพาะไม้เนื้อแข็งที่ต้องใช้เวลานานในการปลูกทดแทน ปัจจุบันเหล่านี้นำไปสู่การแสวงหาวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น

หนึ่งในวัสดุที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในระดับนานาชาติคือ “ไม้ไผ่” เนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่เติบโตเร็ว มีวงจรชีวิตสั้น และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ภายในเวลาไม่กี่ปี อีกทั้งยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงตึงแรงดีสูง โมดูลัสของความยืดหยุ่นสูง และความเหนียวที่เพียงพอต่อการดูดซับแรงกระแทก งานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศต่างยืนยันว่าไม้ไผ่สามารถพัฒนาให้เป็นวัสดุวิศวกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในรูปแบบ “ไม้ไผ่ลามิเนต” (Laminated Bamboo Lumber; LBL) ซึ่งมีการประกอบไม้ไผ่หลายชั้นเข้าด้วยกันด้วยกาวภายใต้แรงอัดและความร้อน ทำให้สามารถเพิ่มความเสถียร ลดการบิดตัว และเพิ่มค่าความแข็งแรงทางกลได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 1 ภาพถ่าย Laminated Bamboo Lumber

ในบริบทของงานระบบราง “หมอนรองรางรถไฟ” (railway sleeper) ถือเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำหน้าที่ยึดและถ่ายแรงจากรางลงสู่หินโรยทางและดินฐานราก หมอนรองรางแบบดั้งเดิมที่ใช้ไม้เนื้อแข็งเริ่มลดบทบาทลงเนื่องจากความไม่ทนทานต่อความชื้นและปลวก ส่วนหมอนคอนกรีตแม้จะแข็งแรงแต่มิมีน้ำหนักมาก ขนส่งยาก และใช้พลังงานสูงในการผลิต ส่งผลให้เกิดการพิจารณาวัสดุทางเลือกอย่างไม้ไผ่เข้ามาทดแทน โดยเฉพาะในระบบรางที่มีลักษณะพิเศษ เช่น ทางรถไฟสายรองหรือเขตพื้นที่ชนบทที่ต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบาและติดตั้งได้ง่าย

จากแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไม้ไผ่ขางหม่น (Dendrocalamus sericeus) และไม้ไผ่ตง (Dendrocalamus asper) ซึ่งเป็นไม้ไผ่สายพันธุ์พื้นเมืองที่พบได้ในหลายจังหวัดของประเทศไทย มาใช้ในการผลิตหมอนรองรางรูปแบบไม้ไผ่ลามิเนต โดยทำการผลิตหมอนด้วยกระบวนการอัดร้อนและอัดเย็น และเปรียบเทียบสมรรถนะของกาว 2 ประเภทที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมไม้ ได้แก่ EPI (Emulsion Polymer Isocyanate) และ PUR

(Polyurethane Reactive Adhesive) จากนั้นจึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของหมอนที่ผลิตได้ด้วยวิธีการที่สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO 12856-2 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่กำหนดแนวทางการประเมินความแข็งแรงของหมอนรองรางจากวัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุทางเลือก



รูปที่ 2 ไม้ไผ่ขางหม่น (Dendrocalamus sericeus)

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยประเมินศักยภาพของไม้ไผ่ในฐานะวัสดุสำหรับหมอนรองราง ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง รวมถึงสนับสนุนแนวทางการออกแบบระบบรางที่ยั่งยืนในอนาคต ลดการพึ่งพาวัสดุสิ้นเปลือง และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรท้องถิ่นอย่างมีประสิทธิภาพ

2 เนื้อความหลัก

2.1 การทบทวนวรรณกรรม

2.1.1 หมอนรองรางและวัสดุทดแทน

หมอนรองรางเป็นส่วนประกอบที่มีหน้าที่รับแรงจากรางและถ่ายทอดสู่พื้นดินอย่างสมดุล การเลือกใช้วัสดุที่เหมาะสมจึงมีผลโดยตรงต่อความมั่นคง ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของระบบราง วัสดุที่ใช้ในอดีต เช่น ไม้ธรรมชาติ มีข้อดีด้านความยืดหยุ่นและน้ำหนักเบา แต่มีปัญหาการเสื่อมสภาพเมื่อเจอสภาพอากาศชื้นหรือปลวกกัดกิน ขณะที่คอนกรีตและเหล็กแม้จะมีความแข็งแรงสูง แต่มิมีน้ำหนักมากและไม่ยั่งยืน วัสดุทางเลือกอย่างไม้ไผ่จึงได้รับความสนใจในฐานะวัสดุธรรมชาติที่สามารถทดแทนวัสดุเดิมได้ โดยเฉพาะในรูปแบบลามิเนตซึ่งเพิ่มความแข็งแรงและเสถียรภาพให้กับวัสดุอย่างมีนัยสำคัญ



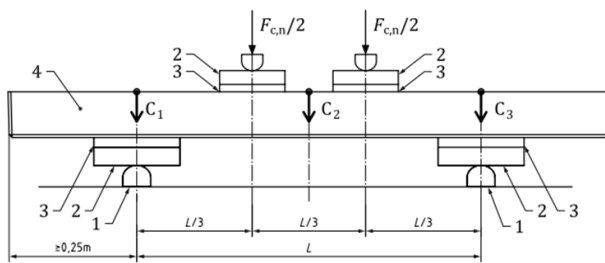
รูปที่ 3 หมอนรองราง

2.1.2 คุณสมบัติของไม้ไฟและการยึดติด

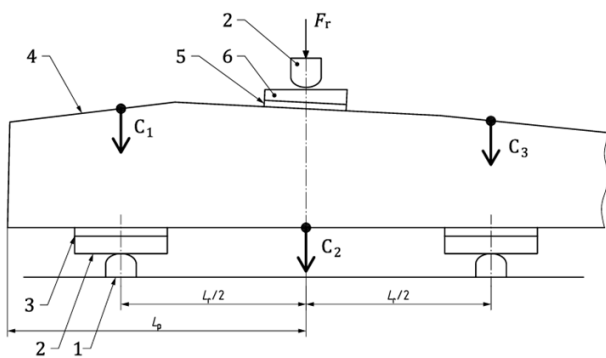
ไม้ไฟช่างหมอนและไม้ตงมีเส้นใยความแข็งแรงสูง โครงสร้างภายในเป็นวัสดุคอมโพสิตตามธรรมชาติที่สามารถต้านทานแรงดึง แรงกด และแรงดัดได้ดี ลักษณะยืดหยุ่นของไม้ไฟยังทำให้สามารถดูดซับแรงกระแทกได้โดยไม่แตกหักง่าย กาวที่ใช้ในการยึดไม้ไฟให้เป็นแผ่นลามิเนตมีบทบาทสำคัญต่อสมรรถนะสุดท้ายของชิ้นงาน กาว EPI มีคุณสมบัติเด่นด้านแรงยึดสูง ทนชื้น ปลดสารพิษ ขณะที่กาว PUR มีความยืดหยุ่น ทนความชื้น และแข็งตัวเร็ว จึงเหมาะกับการผลิตในปริมาณมาก

2.2 ระเบียบวิธีวิจัย

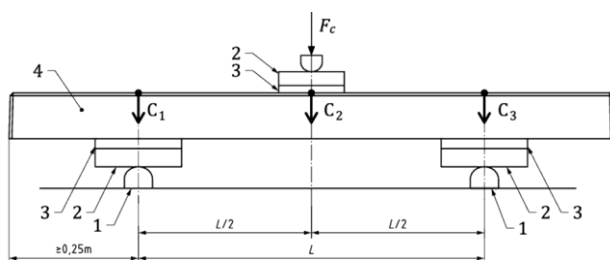
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบขั้นตอนการผลิตหมอนไม้ไฟอัดลามิเนตจากไม้ไฟช่างหมอน (*Dendrocalamus sericeus*) และ ไม้ตง (*Dendrocalamus asper*) ที่ผ่านการแปรรูปในประเทศไทย และทำการทดสอบสมบัติเชิงกลภายใต้มาตรฐาน ISO 12856-2 ซึ่งประกอบด้วย การทดสอบ 3 ลักษณะ ได้แก่ การดัดแบบ 4 จุด (4-point bending), การดัดแบบ 3 จุด (3-point bending) และการรับแรงในตำแหน่งรองราง (rail seat section) เพื่อประเมินค่าทางกล ได้แก่ ความแข็งแรง (Stiffness), โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity: MOE) และโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of Rupture: MOR)



รูปที่ 4 การดัดแบบ 4 จุด



รูปที่ 5 การรับแรงในตำแหน่งรองราง



รูปที่ 6 การดัดแบบ 3 จุด

2.2.1 การผลิตหมอนไม้ไฟ

กระบวนการผลิตหมอนไม้ไฟลามิเนตในงานวิจัยนี้ใช้ไม้ไฟพันธุ์ช่างหมอน (*Dendrocalamus sericeus*) และ ไม้ตง (*Dendrocalamus asper*) ซึ่งเป็นไม้ไฟพื้นถิ่นของประเทศไทยที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดัดสูง โมดูลัสของความยืดหยุ่นที่เหมาะสม และโครงสร้างภายในที่เป็นเส้นใยแน่นหนา ไม้ไฟชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6–10 เซนติเมตร ความยาวปล้อง 30–40 เซนติเมตร และมีเนื้อไม้หนา จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ผลิตเป็นไม้ไฟแปรรูปเชิงโครงสร้าง

ไม้ไฟที่ได้จากแหล่งปลูกในจังหวัดปราจีนบุรี ถูกนำมาตัดปลายและเลื่อยเป็นแผ่นบาง (เรียกว่า "strips") โดยตัดตามแนวรัศมีของต้นไฟเพื่อให้ได้เส้นใยที่เรียงตัวตามแนวแรง ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงในทิศทางรับแรงดัด จากนั้น strips จะถูกนำไปตากแดดจนกว่าความชื้นจะอยู่ในช่วง 8–12% เพื่อป้องกันการพองตัวหรือยุบตัวภายหลังการผลิต ขั้นตอนต่อไปเป็นการขัดผิวด้านนอกและด้านในของ strips เพื่อลดชั้น wax และ silica ซึ่งเป็นชั้นป้องกันธรรมชาติของไม้ไฟที่อาจรบกวนการยึดเกาะของกาว



รูปที่ 7 strip ไม้ไฟช่างหมอน

เมื่อได้แถบไม้ไฟขนาดที่ต้องการแล้ว (ประมาณ 10 × 6 มม.) จึงเข้าสู่ขั้นตอนการประกอบเป็นแผ่นไม้ไฟลามิเนต โดยการทากาวชนิด EPI (Emulsion Polymer Isocyanate) หรือ PUR (Polyurethane Reactive Adhesive) ลงบนพื้นผิวด้านกว้างของแต่ละแผ่น แล้วเรียงซ้อนในทิศทางเดียวกัน ก่อนนำเข้าเครื่องอัดร้อน (Hot Press) ที่อุณหภูมิ 120–140 องศาเซลเซียส ภายใต้แรงดันประมาณ 3 เมกะปาสกาล เป็นเวลา 10 นาที กระบวนการนี้จะทำให้กาวเซตตัวเร็ว และสามารถซึมลึกเข้าไปในเนื้อไม้เพื่อยึดชิ้นงานให้เป็นแผ่นไม้ลามิเนตที่แข็งแรง



รูปที่ 8 เครื่องอัดร้อน

หลังจากผ่านการอัดร้อนแล้ว จะได้แผ่นไม้ไฟขนาด 6 มม. ที่แข็งแรงและเรียบเนียน จากนั้นจึงทำการตัดแต่งให้ได้ขนาด $250 \times 6 \times 2400$ มม. เพื่อเตรียมประกอบเป็นหมอนรองราง โดยจะนำแผ่นไม้ไฟลามิเนตจำนวน 25 ชั้น มาทำการซ้าอีกครั้งและจัดเรียงในทิศทางเส้นใยเดียวกันแล้วเข้าเครื่องอัดเย็น (Cold Press) ด้วยแรงดัน 5 เมกะปาสกาล เป็นระยะเวลา 5–6 ชั่วโมง ทั้งนี้ ระยะเวลาการอัดขึ้นอยู่กับประเภทของกาที่ใช้ โดยกา PUR จะเซตตัวเร็วกว่ากา EPI เล็กน้อย



รูปที่ 9 เครื่องอัดเย็น

เมื่อกาเซตตัวเรียบร้อยแล้ว จะได้หมอนไม้ไฟขนาดมาตรฐาน $250 \times 150 \times 2400$ มม. ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบเชิงกลในห้องปฏิบัติการ หมอนที่ได้จะถูกขัดผิวด้วยกระดาษทรายเพื่อลดความคมของมุมและเตรียมผิวสำหรับการเคลือบ โดยใช้สีย้อมไม้ TOA Woodstain ผสม TOA Thinner เบอร์ 21 ในอัตราส่วน 5:1 โดยทาทั้งหมด 3 ชั้น เว้นระยะให้แห้งประมาณ 6 ชั่วโมงต่อชั้น การเคลือบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความทนทานต่อความชื้น แสง และเชื้อรา รวมทั้งยืดอายุการใช้งานของหมอนในสภาพแวดล้อมจริง



รูปที่ 10 ภาพการทาสีย้อมไม้

กระบวนการทั้งหมดนี้เน้นการใช้วัสดุในประเทศ เครื่องจักรทั่วไปในอุตสาหกรรมไม้ และไม้ผ่านกระบวนการถนอมไม้แบบคาร์บอไนเซชันหรือสารเคมีที่มีค่าใช้จ่ายสูง เพื่อให้สามารถประเมินต้นทุนการผลิตและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมในอนาคตได้อย่างเป็นจริง

2.2.2 การเตรียมการทดสอบ

การทดสอบดำเนินการด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) รุ่น Amsler 500D74 พร้อมติดตั้ง Load Cell 50 ตัน, Linear Variable Differential Transformer (LVDT) และ Strain Gauge เพื่อตรวจวัดแรงและการโก่งตัวของหมอน โดยทดสอบในลักษณะ 4-point bending (center section, negative moment), 3-point bending (center section, positive moment) และ rail seat section (3-point bending at support zone)

2.2.3 การคำนวณค่าทางกล

(a) ความแข็ง

คำนวณจากอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อการโก่งตัวในช่วง elastic linear phase ดังในสมการที่ (1)

$$K = \frac{\Delta Load}{\Delta Displacement} \quad (1)$$

$\Delta Load$ คือ ค่าความแตกต่างของแรงที่เพิ่มขึ้นระหว่างช่วงวิเคราะห์ โดยมีหน่วยเป็นกิโลนิวตัน, $\Delta Displacement$ คือ ค่าการโก่งตัวของชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากแรงที่กระทำ โดยมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

(b) โมดูลัสของความยืดหยุ่น

สำหรับ 4-point bending และ rail seat section ใช้สมการที่ (2)

$$E = \frac{mL^3}{48I} \quad (2)$$

สำหรับ 3-point bending ใช้สมการที่ (3)

$$E = \frac{mL^3}{4bd^2} \quad (3)$$

E คือ ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น มีหน่วยเป็นกิโลนิวตันต่อมิลลิเมตร หรือจิกะปาสกาล, m คือ ความชันของกราฟ Load–Displacement มีหน่วย

เป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร, L คือ ระยะห่างระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร, b คือ ความกว้างของหน้าตัด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร, d คือ ความสูงของหน้าตัด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร และ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย

(c) มอดูลัสของการแตกหัก

สำหรับ 4-point bending และ 3-point bending ใช้สมการที่ (4)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{bd^2} \quad (4)$$

สำหรับ rail seat section ใช้สมการที่ (5)

$$\sigma_f = \frac{M_{max}C}{I} \quad (5)$$

P คือ ค่าแรงสูงสุดก่อนเกิดการแตกหัก มีหน่วยเป็นนิวตัน, M_{max} คือ โมเมนต์ดัดสูงสุด มีหน่วยเป็นนิวตันมิลลิเมตร, C คือ ระยะจากแกนกลาง ถึงผิวด้านนอก, I คือ ค่าโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด

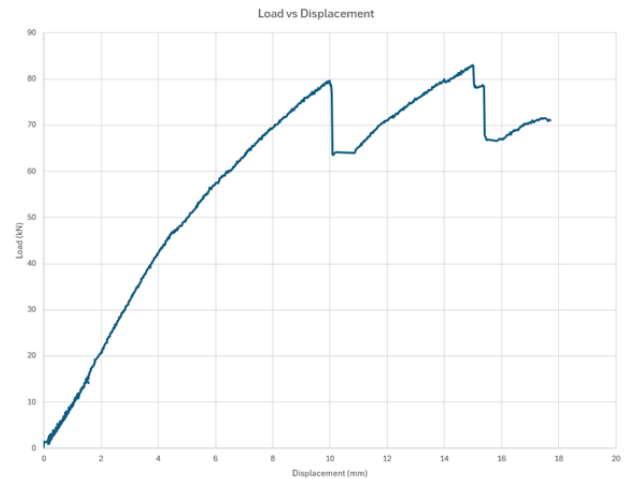
2.3 ผลการทดลอง

2.3.1 หมอนไม้ไผ่ขางหม่นที่ใช้กาว EPI และทดสอบด้วยวิธี 4-Point Bending

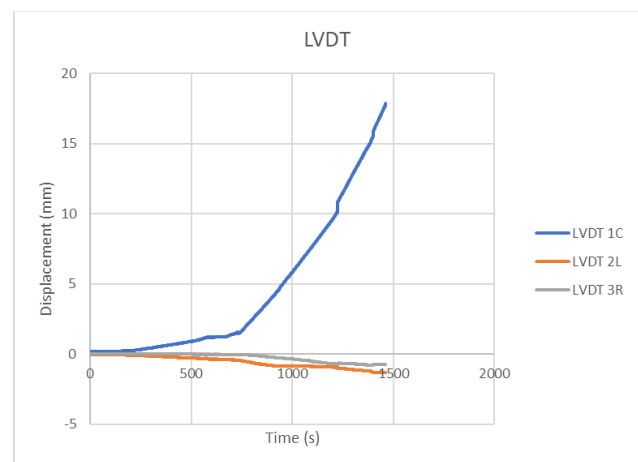
ตัวอย่างแรกเป็นหมอนที่ผลิตจากไม้ไผ่ขางหม่น (*Dendrocalamus sericeus*) โดยใช้กาว EPI ซึ่งเป็นกาวชนิด Emulsion Polymer Isocyanate ที่มีคุณสมบัติการยึดเกาะสูง ทนความชื้น และมีความเหมาะสมกับงานไม้ภายนอก ชิ้นงานถูกผลิตโดยนำแผ่นไม้ไผ่ที่ผ่านการอัดร้อนหนา 6 มม. จำนวน 25 แผ่นมาซ้อนทากาวแล้วอัดเย็นด้วยเครื่อง Cold Press ความดัน 5 MPa เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้หมอนขนาด $250 \times 150 \times 2400$ มิลลิเมตร

การทดสอบกระทำในลักษณะ 4-point bending โดยมีระยะระหว่างจุดรองรับเท่ากับ 1.5 เมตร จุดกระทำแรงอยู่ที่ 0.5 เมตรจากแต่ละฝั่ง ใช้ Load Cell 50 ตัน, LVDT และ Strain Gauge บันทึกข้อมูลในช่วงเวลา 0.1 วินาทีต่อค่า ผลการทดสอบแสดงว่า หมอนสามารถรับแรงสูงสุดได้ 82.97 kN โดยมีค่า MOE ประมาณ 10.37 GPa และ Stiffness อยู่ที่ 10.37 kN/mm แสดงถึงพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นดีเยี่ยม

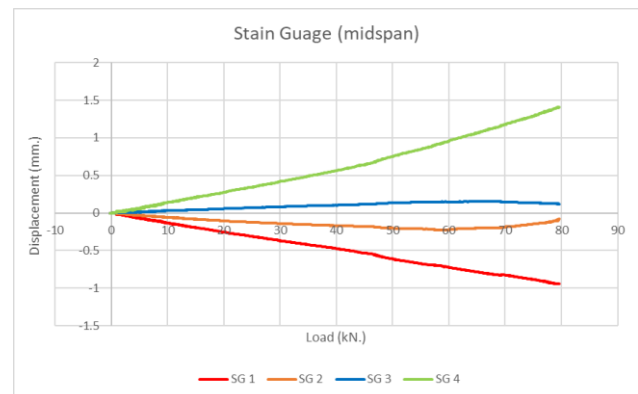
รอยแตกแรกเกิดขึ้นที่ 1.6 kN และพัฒนาอย่างต่อเนื่องแบบเฉียดเฉียดและแยกชั้น (delamination) แต่ยังคงสามารถรับแรงได้ต่อหลังจากเกิด crack แรก แสดงถึงความเหนียว (toughness) และ residual strength ที่ดี เหมาะสำหรับการใช้งานในจุดที่หมอนต้องรับแรงดัดอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 11 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm) การทดสอบแรงดัดแบบ 4 จุด



รูปที่ 12 กราฟ Displacement (mm) vs time (s) จาก LVDT



รูปที่ 13 กราฟ Displacement (mm) vs Load (kN) จาก Stain Gauge

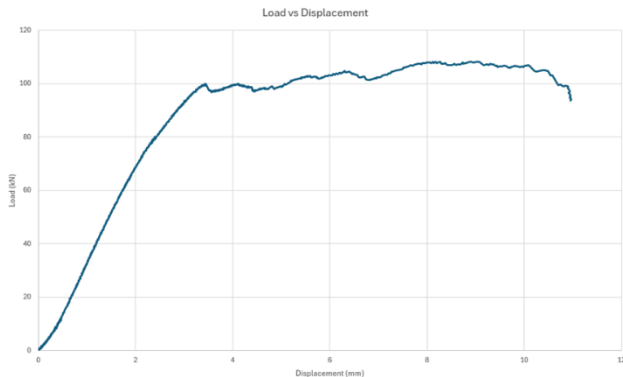
2.3.2 หมอนไม้ไผ่ขางหม่นที่ใช้กาว EPI และทดสอบด้วยวิธี Rail Seat Section

ตัวอย่างที่ 2 ใช้ไม้ไผ่ชนิดเดียวกันกับตัวอย่างที่ 1 และใช้กาว EPI เช่นเดียวกัน แต่เปลี่ยนรูปแบบการทดสอบเป็นการกระทำแรงบริเวณใต้ตำแหน่งรางหรือที่เรียกว่า Rail Seat Section ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องรับแรงเฉือนกระจกและแรงแนวดึงสูง

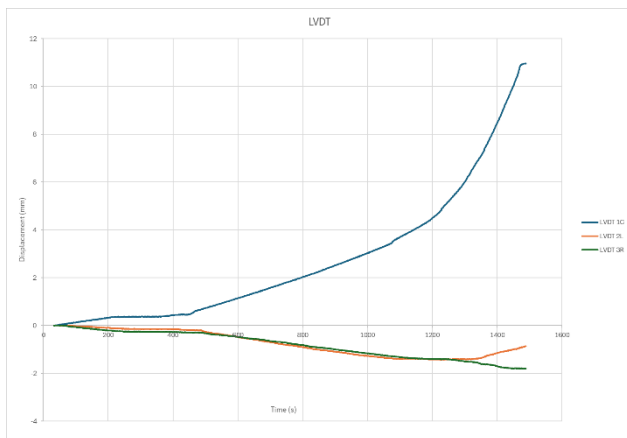
การทดสอบนี้ใช้แผ่นเหล็กและแผ่นรองรางมาตรฐานวางครอบคลุมบริเวณ rail seat โดยมีระยะระหว่างจุดรองรับเพียง 0.6 เมตร เพื่อจำลอง

แรงกดจากรางรถไฟจริง ตัวอย่างสามารถรับแรงได้สูงสุด 108.00 kN โดยเกิด crack แรกที่ประมาณ 98 kN และมีพฤติกรรมเชิงยืดหยุ่นจนถึง 108 kN ก่อนเกิดการพังทลายบางส่วน

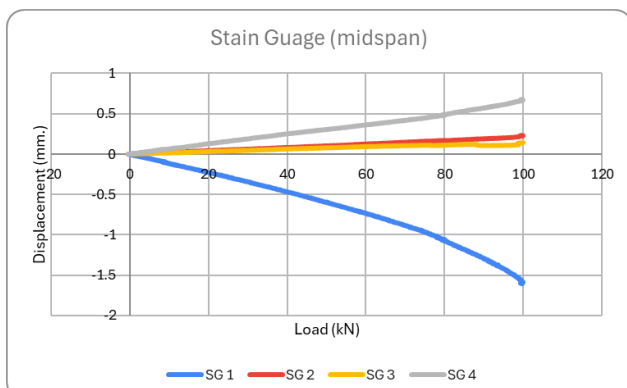
ค่าที่ได้จากการคำนวณ MOE อยู่ที่ประมาณ 1.84 GPa ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างแรกเนื่องจากช่วง span สั้นลง ขณะที่ Stiffness สูงถึง 28.79 kN/mm และ MOR ประมาณ 61.35 MPa เป็นตัวเลขที่โดดเด่นมากในหมวด rail seat ตัวอย่างนี้แสดงพฤติกรรมแบบไม่เปราะ (non-brittle) และสามารถรับแรงต่อได้บางส่วนหลังจุดวิกฤติ



รูปที่ 14 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm)



รูปที่ 15 กราฟ Displacement (mm) vs time (s) จาก LVDT



รูปที่ 16 กราฟ Displacement (mm) vs Load (kN) จาก Stain Gauge

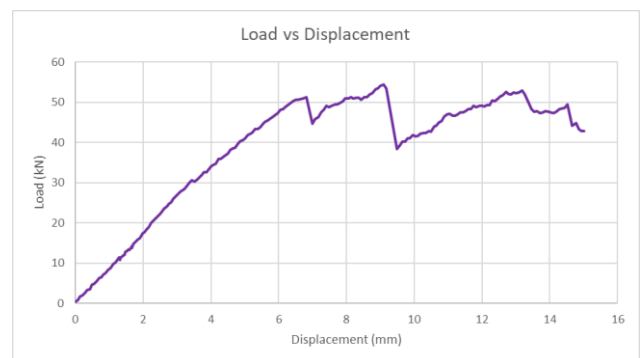
2.3.3 หมอนไม้ไผ่ขางหมอนที่ใช้กาว PUR และทดสอบด้วยวิธี 3-Point Bending

ตัวอย่างนี้ใช้ไม้ไผ่ขางหมอนเช่นเดียวกับตัวอย่างก่อนหน้านี้ แต่เปลี่ยนประเภทกาวเป็น PUR (Polyurethane Reactive Adhesive) ซึ่งเป็น

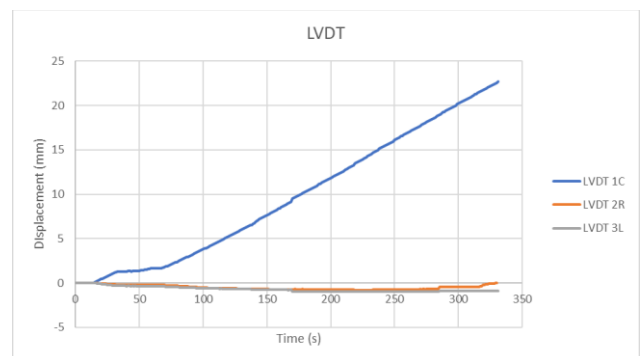
กาวที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านการยึดเกาะดีเยี่ยม ทนชื้น และเหมาะกับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการการผลิตรวดเร็ว

การทดสอบดัดในลักษณะ 3-point bending โดยมี span ยาวถึง 2.4 เมตร และโหลดกระทำตรงกลาง ผลการทดสอบแสดงพฤติกรรมเปราะชัดเจน ค่าแรงสูงสุดที่รับได้คือ 54.48 kN ก่อนเกิดการแตกร้าวทันทีโดยไม่มี residual capacity

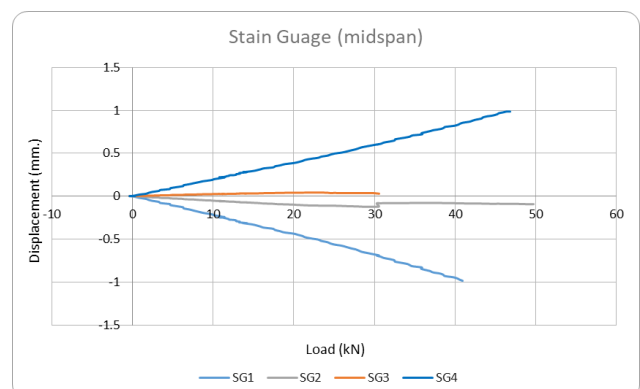
ค่าทางกลที่ได้จากการวิเคราะห์คือ MOE ≈ 8.4 GPa และ Stiffness ≈ 8.4 kN/mm ค่า MOR ประมาณ 34.76 MPa พฤติกรรมการแตกร้าวเป็นลักษณะแตกเฉียงตรงกลางโดยไม่มีการแยกชั้น (no delamination) ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของกาว PUR ที่ยึดแน่นแต่มีความยืดหยุ่นต่ำ จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องรับแรงซ้ำหรือต้องการความเหนียวสูง



รูปที่ 17 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm) การทดสอบแรงดัดแบบ 3 จุด



รูปที่ 18 กราฟ Displacement (mm) vs time (s) จาก LVDT



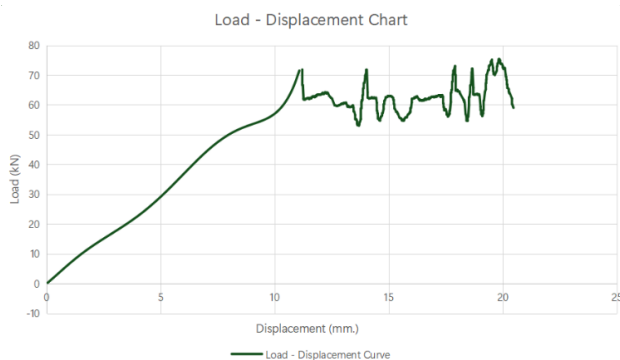
รูปที่ 19 กราฟ Displacement (mm) vs Load (kN) จาก Stain Gauge

2.3.4 หมอนไม้ไผ่ตงที่ใช้กาว EPI และทดสอบด้วยวิธี 4-Point Bending

ตัวอย่างที่ 4 ใช้ไม้ไผ่พันธุ์ตง (Dendrocalamus asper) ซึ่งมีลักษณะเด่นคือเนื้อไม้หนา โปร่ง และยืดหยุ่นสูง โดยใช้กาว EPI เช่นเดียวกับตัวอย่าง 1 และ 2 ในการยึดแผ่นไม้ไผ่แต่ละชั้น ขั้นตอนการผลิตเหมือนเดิม โดยใช้กระบวนการ Hot Press และ Cold Press ในการรวมแผ่นไม้ไผ่ให้ได้ชิ้นงานขนาดมาตรฐาน $250 \times 150 \times 2400$ มม.

การทดสอบแบบ 4-point bending จัดให้มีจุดกระทำแรง 2 จุด ห่างจากจุดรองรับด้านซ้ายและขวาย่างละ 0.5 เมตร ($L = 1.5$ m) จากผลการทดสอบ พบว่าหมอนสามารถรับแรงสูงสุดได้ประมาณ 71.87 kN โดย MOE ที่ได้คือ 5.97 GPa และ Stiffness 3.65 kN/mm ค่าทางกลต่ำกว่าหมอนจากไม้ไผ่ขางหมอนอย่างชัดเจน

พฤติกรรมการเสียหายพบว่าไม้ไผ่ตงมีการโก่งตัวสูงก่อนจะแตกร้าว ทำให้ crack ที่เกิดมีลักษณะกระจายตัวและค่อยเป็นค่อยไป บ่งชี้ถึงความยืดหยุ่นสูงแต่ความแข็งแรงโดยรวมต่ำกว่า แต่อาจเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการการดูดซับแรงแบบนุ่มนวล เช่น ระบบรางที่รับน้ำหนักเบาหรือชั่วคราว



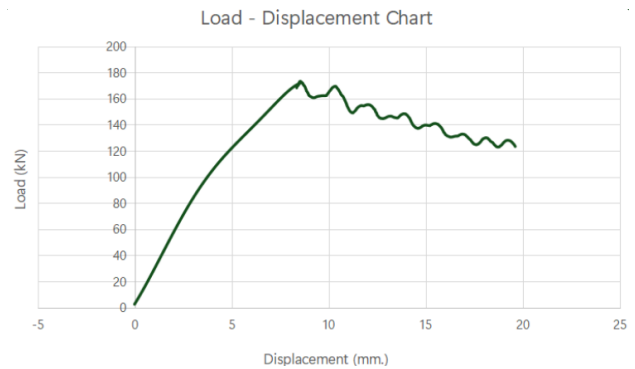
รูปที่ 20 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm) จาก Load cell 50T

2.3.5 หมอนไม้ไผ่ตงที่ใช้กาว EPI และทดสอบด้วยวิธี Rail Seat Section

ตัวอย่างที่ 5 ใช้ไม้ไผ่ตงและกาว EPI เช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 4 แต่เปลี่ยนการทดสอบเป็นแบบ rail seat section ซึ่งเน้นการจำลองแรงในตำแหน่งที่รางกดลงบนหมอนโดยตรง โดยลด span เหลือเพียง 600 มม. และวางแผ่นเหล็กกับแผ่นรองรางมาตรฐานเพื่อกระจายแรงในพื้นที่เฉพาะ

ผลการทดสอบให้ค่าแรงสูงสุดถึง 185.83 kN ซึ่งเป็นค่าที่สูงที่สุดในบรรดาทุกตัวอย่าง ค่า MOR ที่ได้จึงโดดเด่นอย่างมาก ขณะที่ MOE อยู่ที่ 1.31 GPa และ Stiffness 20.49 kN/mm พฤติกรรมของวัสดุแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงเฉือนกระจุกได้ดีมาก แม้ค่าความยืดหยุ่นจะไม่สูง

รอยแตกร้าวเกิดขึ้นแบบเฉียบพลันโดยไม่มีรอยเตือนล่วงหน้า สอดคล้องกับพฤติกรรมการรับแรงเฉือนเฉพาะที่ที่มักเกิด stress concentration อย่างรวดเร็ว จึงแนะนำให้ใช้ในพื้นที่รับแรงเฉพาะ เช่น rail pad หรือจุดเชื่อมต่อ rail baseplate

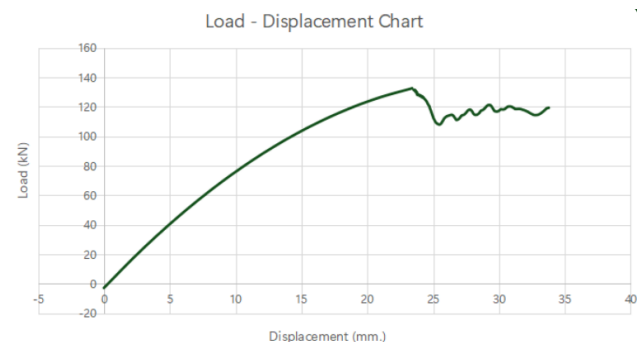


รูปที่ 21 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm) จาก Load cell 50T

2.3.6 หมอนไม้ไผ่ตงที่ใช้กาว EPI และทดสอบด้วยวิธี 3-Point Bending

ตัวอย่างสุดท้ายเป็นหมอนจากไม้ไผ่ตงทดสอบแบบ 3-point bending ซึ่งโหลดทั้งหมดกระทำ ณ จุดกึ่งกลางของ span ขนาด 2.4 เมตร ผลการทดสอบชี้ว่าหมอนสามารถรับแรงสูงสุดได้ถึง 137.156 kN โดยไม่เกิดรอยร้าวทันที ค่า MOE ที่ได้คือ 25.68 GPa ซึ่งสูงที่สุดในงานวิจัยนี้ และ MOR อยู่ที่ 175.56 MPa ขณะที่ Stiffness อยู่ที่ 6.27 kN/mm

พฤติกรรมการแตกร้าวเกิดแบบลึกเฉียงเข้าสู่แกนกลางโดยไม่มีการแยกชั้น แสดงถึงโครงสร้างภายในที่สม่ำเสมอและการเชื่อมต่อของกาวที่แน่นหนา ตัวอย่างนี้จึงแสดงถึงศักยภาพของไม้ไผ่ตงในงานโครงสร้างที่ต้องรับแรงแบบ point load สูง เช่น โครงสร้างทางยกระดับ หรือฐานรองเครื่องกล



รูปที่ 22 กราฟ Load (kN) vs Displacement (mm) จาก Load cell 50T

3 บทสรุป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์สมรรถนะเชิงกลของหมอนรองรางที่ผลิตจากไม้ไผ่ลามิเนต โดยใช้ไม้ไผ่ 2 สายพันธุ์ คือ ขางหม่น และตง ร่วมกับกาว 2 ประเภท คือ EPI และ PUR เพื่อศึกษาผลกระทบของวัสดุและการออกแบบต่อค่าทางกลและพฤติกรรมการเสียหายของหมอน โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 12856-2 ใน 3 รูปแบบ คือ 4-point bending, 3-point bending และ rail seat section ครอบคลุมตัวอย่างทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง พบว่า หมอนที่ใช้กาว EPI ให้ค่าความแข็งแรง (MOR) และความยืดหยุ่น (MOE) สูงกว่าหมอนที่ใช้กาว PUR อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในตัวอย่างที่ใช้ไม้ไผ่ขางหม่นและ

ทดสอบแบบ 4-point bending ซึ่งให้ค่า MOE สูงถึง 10.37 GPa และสามารถรับแรงได้สูงสุด 82.97 kN ในขณะที่หมอนไม้ไผ่ตงเมื่อทดสอบด้วย rail seat section ให้ค่า MOR สูงถึง 185.83 MPa แสดงถึงศักยภาพในการรับแรงเฉือนเฉพาะจุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่า MOE จะต่ำกว่า

หมอนที่ใช้กา PUR แม้จะแสดงค่าทางกลต่ำกว่า แต่ให้ผลดีในด้านการต้านทานความชื้นและไม่มีปัญหาเรื่อง delamination ใดๆก็ตาม พฤติกรรมโดยรวมของวัสดุ PUR มีลักษณะเปราะ และมี residual strength ต่ำ จึงอาจไม่เหมาะกับตำแหน่งที่ต้องรับแรงซ้ำหรือแรงกระแทกจากรางโดยตรง

ในภาพรวม ไม้ไผ่ขางหม่นให้ค่าความแข็งแรงที่เสถียรกว่าไม้ไผ่ตง แต่ไม้ไผ่ตงให้ค่า MOE สูงในบางกรณีและสามารถรับแรงเฉพาะจุดได้ดีเมื่อใช้ร่วมกับกา EPI ผลการศึกษายังพบว่าการเลือกชนิดไม้ไผ่และกาต้องสัมพันธ์กับตำแหน่งการใช้งาน เช่น บริเวณกึ่งกลางคาน (ที่ต้องรับแรงดัด) ควรเลือกขางหม่น + EPI ขณะที่บริเวณใต้รางควรเลือกไม้ไผ่ตง + EPI

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการใช้ไม้ไผ่ลามิเนตในงานระบบรางอย่างเป็นรูปธรรม โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทที่ต้องการวัสดุ น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ และผลิตได้ในประเทศ พร้อมเสนอแนวทางให้มีการต่อยอดทดสอบภาคสนามในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อประเมินอายุการใช้งาน ความคงทนระยะยาว และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชยุตม์ งามโขง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ให้คำแนะนำ ตรวจสอบความถูกต้องทางวิชาการ และสนับสนุนตลอดกระบวนการวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอขอบคุณบริษัท Thailand Bamboo และบริษัท BAMBUNIQUE ที่ให้ความร่วมมือในการผลิตตัวอย่างหมอนไม้ไผ่ รวมถึงให้การสนับสนุนเครื่องจักรและทรัพยากรต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการดำเนินโครงการนี้ นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือทดลองและคำแนะนำทางเทคนิค

ท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนร่วมโครงการทุกคน ที่ให้กำลังใจ แบ่งปันความรู้ และสนับสนุนกันตลอดเส้นทางของการทำโครงการนี้ จนบรรลุเป้าหมายอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมป่าไม้. (2544). ระบบแนะนำไม้ใช้ปลูกตามสภาพพื้นที่: ไม้ขางหม่น (*Dendrocalamus sericeus*).
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (2549). อุตสาหกรรมรายสาขา เฟอร์นิเจอร์ไม้ "หลักปฏิบัติเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด (การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการป้องกันมลพิษ)". กรกฎาคม 2549.
- [3] ศิริพงษ์ คงธนะ. (2561). การศึกษาคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่ขางหม่นเพื่อใช้เป็นวัสดุโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, วิทยาเขตกำแพงแสน.
- [4] สมนึก มนูญชัย, กิตติภพ ต้นสัจจา, & ชลิต ธรรมวิบูลย์. (2565). การศึกษาคุณสมบัติทางกลของไม้ไผ่อดลามิเนตสำหรับใช้ในงานโครงสร้าง.
- [5] Proceedings of the 28th National Conference on Civil Engineering (NCCE28) (หน้า 2250-2256). สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- [6] Cai, L., & Xiang, Y. (2015). Optimum processing parameters for wood-bamboo hybrid composite sleepers. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 77-83.
- [7] Chen, G., Wang, L., Wu, Z., & Li, H. (2020). Mechanical behavior of laminated bamboo lumber for structural application: An experimental investigation. *ResearchGate*.
- [8] Dauletbeke, A., Li, H., Xiong, Z., & Lorenzo, R. (2021). A review of mechanical behavior of structural laminated bamboo lumber. *Sustainable Structures*, 1(1), 000004.
- [9] Ghavami, K. (1995). Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 17(4), 281-288.
- [10] Jitpakdee, S., Petchprapai, C., & Thepmongkorn, N. (2023). The application of bamboo in the railway industry: A sustainable solution for track construction. *ResearchGate*.
- [11] Lu, J., Wang, Q., Li, Y., & Duan, Z. (2021). Development of laminated bamboo lumber: Processing, performance and applications. *Construction and Building Materials*, 271, 121537.
- [12] Nugroho, N., Wardenier, J., & van de Lindt, J. W. (2007). Flexural performance of laminated bamboo lumber. *Murdoch University Research Repository*.
- [13] Sharma, B., Gatóo, A., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34(2), 114-129.
- [14] K. H., Soh, C. K., & Chen, Z. (2023). Laminated bamboo lumber beams for structural applications: Experimental study and numerical modeling. *Infrastructures*, 8(4), 174.