

การทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของลำไม้ไผ่เพื่อจำแนกชั้นคุณภาพทางโครงสร้างของไม้ไผ่ชางหม่น

Compression resistance of bamboo culms for structural grading of *Dendrocalamus sericeus* Munro

ภาณุมาศ ตั้งผดุงรัตน์^{1,*} ขยานนท์ ทรรัชภิญญา¹ ชินพัฒน์ บัวชาติ¹ ปิยะพงษ์ วงศ์เมธา¹ และ พรรณนิภา เขาวนระ²

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่

² สาขาวิชาปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช

*Corresponding author; E-mail address: panumat_ta@cmu.ac.th

บทคัดย่อ

ไม้ไผ่เป็นวัสดุธรรมชาติที่มีศักยภาพในการนำมาใช้เพื่องานก่อสร้างอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตามความไม่แน่นอนทางด้านความสามารถในการรับน้ำหนักของไม้ไผ่ทำให้วิศวกรไม่สามารถกำหนดใช้ค่ามาตรฐานเพื่อการออกแบบโครงสร้างได้อย่างปลอดภัยเหมาะสม งานศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเพื่อจำแนกชั้นคุณภาพทางโครงสร้างของไม้ไผ่ชางหม่นในการรับแรงอัดตามแนวแกน เพื่อนำมาหาดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ (Indicating Properties) ที่มีความสัมพันธ์จากตัวแปรผลทดสอบไม่ทำลายอาทิเช่น เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ความหนาของผนังลำไม้ไผ่ ความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวาง ความหนาแน่น และมวลเชิงเส้น จากการทดสอบโดยใช้วิธีทางสถิติพบว่าความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติที่ดี สำหรับกำลังรับหน่วยแรงอัด (Compression stress) และกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate load) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.54 – 0.62 และ 0.88 – 0.89 ตามลำดับ จากผลการศึกษานี้ทำให้เมื่อสามารถทราบค่าความหนาแน่นและมวลเชิงเส้นของไม้ไผ่ซึ่งทดสอบหาค่าได้ง่ายจะสามารถทราบค่ากำลังอัดของไม้ไผ่ที่วิศวกรสามารถนำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างต่อไปได้

คำสำคัญ: กำลังรับแรงอัด, กำลังรับหน่วยแรงอัด, ดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ, จำแนกชั้นคุณภาพทางโครงสร้าง

Abstract

Bamboo is a natural material with the potential for sustainable construction. However, uncertainty in the bearing capacity of the bamboo results in nonstandard values for structural engineering design. This study develops the structural grading of *Dendrocalamus sericeus* Munro, subjected to axial compression to determine the correlated non-destructive indicating properties, i.e., outer diameter, culm wall thickness, eccentricity, density, and linear mass. From the statistical test values, density and linear mass are the best indicating properties for compression stress and ultimate load with the correlation coefficient (r) of 0.54 – 0.62 and 0.88 – 0.89. From the study results, the compressive strength of the bamboo can be predicted for structural design when the density and the linear mass are known.

Keywords: Compression load, Compression stress, Indicating properties, Structural grading

1. คำนำ

ไม้ไผ่ถูกจัดอยู่ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยวตระกูลหญ้าที่มีลำต้นสูงที่สุดที่พบได้ทั่วไปในภูมิภาคเขตร้อน ในปัจจุบันไม้ไผ่ถูกค้นพบแล้ว 1,662 สายพันธุ์ทั่วโลกโดยแบ่งแยกเป็น 121 สกุล [1] ในประเทศไทยไม้ไผ่เป็นหนึ่งในสายพันธุ์ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและสังคม โดยมี 80 สายพันธุ์ แบ่งแยกออกเป็น 15 สกุล พบมากที่สุดใภูมิภาคเหนือและพบมากในป่าเบญจพรรณของแต่ละภาคของประเทศไทยมีปริมาณไม้ไผ่โดยเฉลี่ยมากกว่าป่าชนิดอื่นๆ [2, 3] สกุลไม้ที่เหมาะสมในการก่อสร้างของประเทศมี 5 สกุล คือ สกุลไผ่ตง (*Dendrocalamus*) สกุลไผ่ไร่ (*Gigantochloa*) สกุลไผ่รวก (*Thyrsostachys*) สกุลไผ่ป่า (*Bambusa*) และ สกุลไผ่สีทอง (*Schizostachyum*) [4] ไม้ไผ่ถูกนำมาแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์และนำมาทำเป็นนั้รฐาน ช่วงหลังมานี้ได้มีการนำไม้ไผ่มาใช้ในอาคารที่มากขึ้น แต่เนื่องจากไม้ไผ่ยังขาดมาตรฐานการรับรองคุณภาพและคุณสมบัติทางกลอยู่ ส่งผลให้มีความยุ่งยากในการทดสอบวัสดุก่อนการใช้งานและเมื่อเป็นวัสดุจากธรรมชาติทำให้ควบคุมคุณภาพได้ยากยิ่งขึ้น ดังนั้นหากมีการทดสอบคุณสมบัติของไม้ไผ่จนสามารถสร้างค่ากลางที่ยอมรับของวัสดุได้เช่นเดียวกับเหล็กหรือไม้ที่มีการแบ่งชั้นคุณภาพตามขีดจำกัดความสามารถ ก็เปิดโอกาสให้วิศวกรมีการพิจารณานำไม้ไผ่ไปใช้สำหรับงานก่อสร้างมากขึ้น

การแบ่งชั้นคุณภาพไม้ไผ่อาศัยมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ISO 22157-1: 2004 [5] สำหรับการทดสอบกลสมบัติของไม้ไผ่และ ISO 19624: 2018 [6] สำหรับการจำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไผ่ตามการทดสอบกลสมบัติ โดยหาหลักเกณฑ์ความสัมพันธ์ระหว่างการทดสอบที่ต้องให้แรงกระทำแบบทำลายโดยการนำวัสดุไปทดสอบทางกลจนถึงจุดวิบัติเพื่อได้ค่าสูงสุด และการวัดโดยไม่ทำลายมาจับคู่กัน เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับหน่วยแรงอัดของไม้ไผ่กับความหนาแน่น (Density) หรือ มวลเชิงเส้น (Linear mass) หรือ ปริมาณความชื้น (Moisture content) เป็นต้น

Bahtiar E. T. และคณะ [7] ได้จำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไผ่ 3 ชนิด ได้แก่ *G. atroviolacea*, *G. apus*, และ *G. pseudoarundinacea* ซึ่งอยู่ในสายพันธุ์ของ *Gigantochloa* จำนวนชนิดละ 100 ตัวอย่าง พบว่ามวลเชิงเส้นกับความสามารถในการรับแรงอัดในแนวตั้งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่สูงโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.83 - 0.97 และความหนาแน่นกับกำลังรับหน่วยแรงอัดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ระหว่าง 0.84 – 0.92 Bahtiar E. T. และคณะ [8] ได้ทำการทดสอบหาลำดับต้านทานแรงอัดของไม้ไผ่ *Guadua angustifolia* เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดโดยใช้เป็นดัชนีตัวชี้วัดความสามารถ (Indicating properties) และคุณสมบัติใน

การกำหนดชั้นคุณภาพ (Grade-determining properties) สำหรับค่าตัวแทนของกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (Characteristic Value) พบว่ามวลเชิงเส้นนั้นเป็นดัชนีตัวแปรชี้วัดความสามารถต่อกำลังรับแรงอัดได้ดีที่สุดและความหนาแน่นนั้นเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถต่อกำลังรับหน่วยแรงอัดของไม้ได้ดีที่สุด

งานวิจัยนี้จัดทำมาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถรับแรงในแนวแกนของไม้ไผ่และตัวแปรแบบไม้ทำลาย เพื่อเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์และสามารถนำไปใช้ออกแบบสำหรับงานโครงสร้างหลักที่ใช้ไม้ไผ่ภายในประเทศไทยได้ในอนาคต โดยได้ทำการเลือกสายพันธุ์ไม้ไผ่ชางหม่น (*Dendrocalamus sericeus* Munro) ซึ่งพบมากและหาได้ง่ายรวมทั้งราคาในตลาดไม่สูงและมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในงานก่อสร้าง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะภายนอกของไม้ไผ่

จากรูปที่ 1 ต้นไม้ไม่มีผิวแข็งและเรียบมัน มีลำต้นกลมและกลวงตรงกลาง มีข้อ (Node) และ ปล้อง (Internode) กระจายอยู่ทั่วทั้งลำ ความหนาของผนังลำไม้ที่โคนต้นจะหนาและบางลงตามความสูงของลำต้น [3, 7, 8] เส้นใยขนานไปกับลำต้นและประสานกันแน่นทำให้มีความเหนียวที่สูงเมื่อรับแรงตามแนวแกน โค้งดัดองได้ตามต้องการ

2.2 การทดสอบแบบไม้ทำลาย

เป็นการทดสอบเพื่อหาลักษณะทางกายภาพที่ไม่ทำให้ตัวอย่างเกิดความเสียหายดังนี้

(ก) ปริมาณความชื้น (Moisture content, M_c)

$$M_c = \frac{w_2 - w_o}{w_o} \times 100\% \quad (1)$$

(ข) ความหนาแน่น (Density, ρ)

$$\text{ณ ผึ่งแห้ง: } \rho_a = \frac{4w_1}{\pi L (D^2 - (D-2t)^2)} \quad (2)$$

$$\text{ณ อบแห้ง: } \rho_o = \frac{\rho_a}{(1 + M_c)} \quad (3)$$

$$\text{ปริมาณความชื้นที่ 12\%: } \rho_{12} = 1.12\rho_o \quad (4)$$

(ค) มวลเชิงเส้น (Linear mass, q)

$$\text{ณ ผึ่งแห้ง: } q_a = \frac{w_1}{L} \quad (5)$$

$$\text{ณ อบแห้ง: } q_o = \frac{q_a}{(1 + M_c)} \quad (6)$$

$$\text{ปริมาณความชื้นที่ 12\%: } q_{12} = 1.12q_o \quad (7)$$

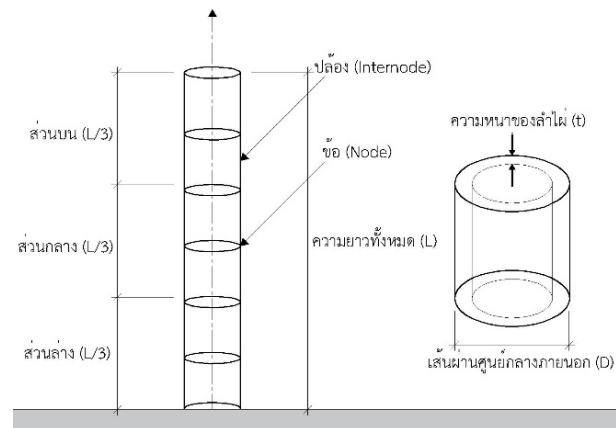
(ง) ความสมบูรณ์ของพื้นที่หน้าตัด

$$e_c = \sqrt{1 - \frac{(D_{\min})^2}{(D_{\max})^2}} \quad (8)$$

$$o_v = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (9)$$

$$d_o = \frac{(D_{\max} - D_{\min})}{D_{\text{avg}}} \quad (10)$$

โดยที่ L คือ ความยาวของตัวอย่าง มีค่าเท่ากับหรือประมาณเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเฉลี่ย (D_{avg}) ของตัวอย่าง ค่าที่มากที่สุด (D_{max}) และค่าที่น้อยที่สุด (D_{min}) สำหรับการเก็บข้อมูลของน้ำหนักของไม้ไผ่มีการเก็บน้ำหนักตัวอย่าง 3 ครั้ง คือ ก่อนการทดสอบแบบทำลาย (w_1) หลังการทดสอบแบบทำลาย (w_2) และหลังจากเข้าตูอบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (w_o) เมื่อเก็บข้อมูลครบแล้วนำมาคำนวณตามสมการที่ (1) – (10) สำหรับปริมาณความชื้นที่ 12% นั้นเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 22157-1: 2019 [9] e_c คือ ความไม่สมบูรณ์ (Eccentricity) o_v คือ อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางที่น้อยที่สุดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุด (Ovality) และ d_o คือ ส่วนต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากที่สุดกับน้อยที่สุดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Ovality, d_o) โดยเรียกว่า ISO Ovality หรือ d_o คือค่าที่บ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางของตัวอย่าง กรณีหน้าตัดตามขวางมีความสมบูรณ์มีค่า e_c เท่ากับ 0 และ o_v เท่ากับ 1 [10] โดยความสำคัญของความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางมีผลต่อความชะลูดของเสา (Slender column) เนื่องจากค่าของรัศมีการหมุน (Radius of gyration) มีค่าน้อยซึ่งส่งผลให้เกิดการโก่งคดเอียงในทิศทางของแกนรอง (Minor axis direction) เป็นหลัก [8]



รูปที่ 1 ลักษณะของไม้ไผ่

2.3 การทดสอบกำลังในการรับน้ำหนัก

การทดสอบการให้น้ำหนักกระทำต่อตัวอย่างจนประลัยทำให้ทราบค่ากำลังของการรับน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ โดยการทดสอบกำลังสามารถทำได้ตามมาตรฐาน ISO 22157-1: 2004 [5] ดังเช่นการทดสอบการให้แรงอัดตามแนวแกนโดยเครื่องกดที่อัตราการให้แรงที่ 0.01 มิลลิเมตรต่อวินาที จนประลัยบันทึกค่าแรงสูงสุดได้กำลังรับแรงอัดประลัย (Ultimate Compressive strength, F_u) และนำไปคำนวณหาค่ากำลังหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ตามสมการที่ (11)

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_w} = \frac{4F_u}{\pi(D^2 - (D-2t)^2)} \quad (11)$$

หน่วยแรงที่ยอมให้ตามมาตรฐานการออกแบบ ISO 22156: 2004 [11] ได้มาจากค่าการทดสอบกลสมบัติตามมาตรฐาน ซึ่งต้องหาค่าตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง (Characteristic Value, R_k) จากจำนวนตัวอย่างไม่ต่ำกว่า 10 ตัวอย่าง คำนวณตามสมการที่ (12) และเมื่อได้ค่าตัวแทนของกลุ่ม

ตัวอย่างแล้วจึงนำมาคำนวณหาค่าหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable Stresses, σ_{all}) ตามสมการที่ (13)

$$R_k = R_{0.05} \left(1 - \frac{2.7 \cdot S_D}{\mu \sqrt{n}} \right) \quad (12)$$

$$\sigma_{all} = R_k \cdot G \cdot \frac{D}{S} \quad (13)$$

เมื่อ $R_{0.05}$ คือค่าที่ได้จากการทดสอบที่ 5 percentile S_D คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน μ คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง n คือจำนวนตัวอย่าง G คือค่าปรับแก้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับการใช้งานจริงซึ่งค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 0.5 D คือค่าปรับแก้จากประเภทของแรงกระทำที่โครงสร้างได้รับ (1.0 สำหรับแรงกระทำคงที่, 1.25 สำหรับแรงกระทำคงที่และชั่วคราว, 1.50 สำหรับแรงกระทำประเภทแรงลม) และ S คือค่าปัจจัยด้านความปลอดภัยอยู่ที่ 2.25

2.4 การจำแนกชั้นคุณภาพตามความสามารถในการรับแรงในแนวแกน

ISO 19624: 2018 [6] ได้กำหนดกระบวนการคัดเลือกและจำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไฟโดยการเชื่อมความสัมพันธ์ตั้งสมการเชิงเส้นที่ (14) ระหว่างค่าผลการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นตัวแปรอิสระ (x_i) เช่น การตรวจพินิจภายนอกเพื่อหาตำหนิ การวัดขนาดมิติ เป็นต้น กับการทดสอบแบบทำลายในการหาความสามารถในการรับแรงประเภทต่างๆ ที่ต้องการจำแนกชั้นคุณภาพเป็นตัวแปรตาม (y_i) โดยในสมการที่ (15) แสดงวิธีการหาค่าของช่วงความเชื่อมั่น 95% ของกลุ่มตัวอย่าง (The 5% exclusion limit: $R_{0.05}$) ที่อยู่ในสมการที่ (12)

$$y_i = a + bx_i \quad (14)$$

$$R_{0.05} = y_i - t_{(v,0.95)} \cdot S_E \quad (15)$$

$$\text{โดยที่ } S_E = \left(1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{0.5} \cdot S_r$$

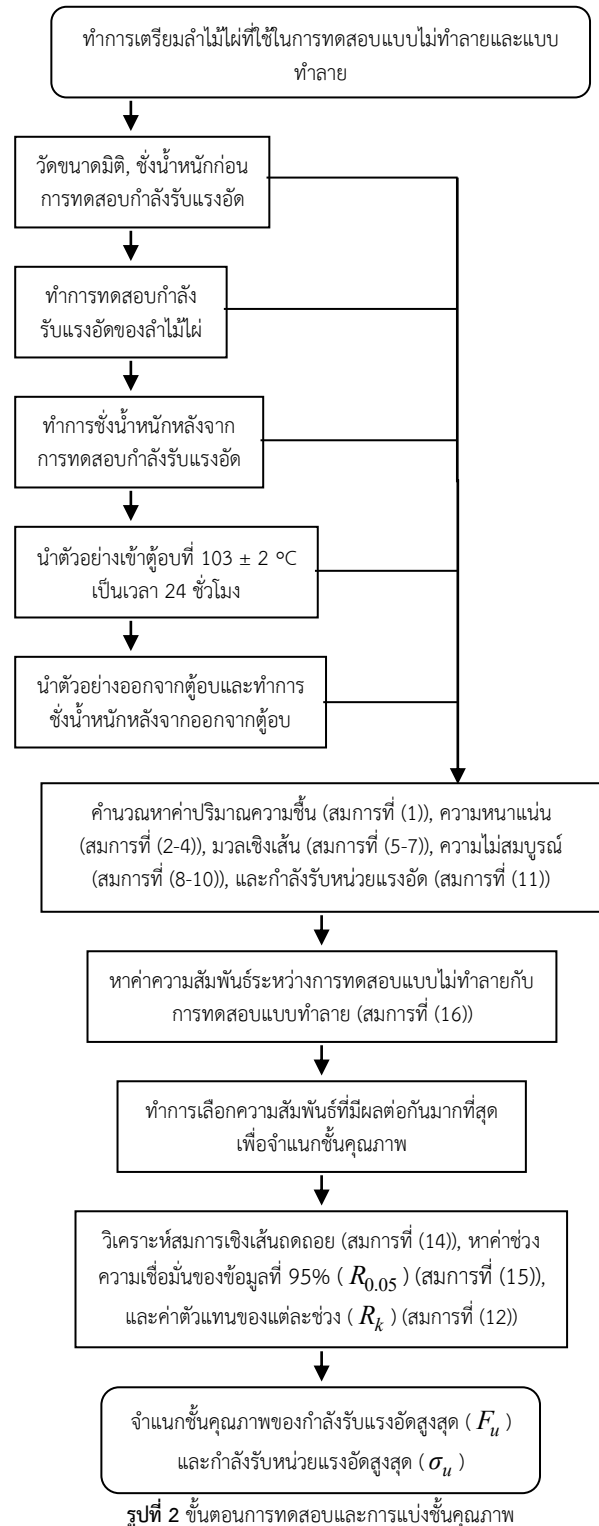
เมื่อ a คือค่าคงที่ที่ได้จากความสัมพันธ์ของ y_i และ x_i b คือค่าสัมประสิทธิ์ของ x_i n คือจำนวนตัวอย่าง S_E คือ Standard error of prediction at a given value of x_i S_r คือ Standard error of regression x_i คือค่าคาดการณ์ (Predictor value) \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของค่าคาดการณ์ (Mean of predictor) $t_{(v,0.95)}$ คือค่าการแจกแจงผกผันของ t-Test ด้านเดียวที่ความอิสระที่ v สำหรับแถบความเชื่อมั่นที่ 95% (one tail student's t-distribution value with v degree of freedom for 95% probability)

3. วิธีการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบที่ไม่ทำลาย

งานศึกษานี้มีขั้นตอนการดำเนินงานแสดงดังรูปที่ 2 ในการทดสอบกลสมบัติของลำไม้ไฟเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 22157-1: 2004 [5] ซึ่งไม้ไฟที่ทดสอบเป็นไม้ไฟหางหมื่น (*Dendrocalamus sericeus* Munro) จาก อ.เชียงแสน จ.เชียงรายโดยผ่านกระบวนการถนอม

(Treatment) ซึ่งใช้อัตราส่วนผสมของกรดบอริกและสารละลายบอแรกซ์อยู่ที่ 1:1.5 แช่เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 วัน และนำไปตากให้แห้งในอากาศปกติโดยไม่ตากแดดโดยตรงเพื่อป้องกันการแตกของลำไม้ไฟจนลำไม้ไฟเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองซึ่งใช้เวลาประมาณ 15 วัน ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศด้วย



จากลำไม้ไฟทั้งหมด 39 ลำ ได้ทำการตัดแบ่งลำไม้ไฟเป็นท่อนสั้น จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 116 ตัวอย่าง โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ส่วนท่อนปล้อง

ระหว่างข้อ (Internode) และส่วนท่อนข้อ (Node) ที่มีข้ออยู่กลางความยาวของตัวอย่าง

3.2 การจำแนกชั้นคุณภาพ

จากผลการทดสอบทั้งหมด ได้นำมาจับคู่ระหว่างผลการทดสอบแบบไม่ทำลายเป็นตัวแปรต้นและผลการทดสอบทำลายเป็นตัวแปรตามเพื่อพิจารณาว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficients of correlation: r) คำนวณดังสมการที่ (16) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของข้อมูล 2 ชุดมีค่าระหว่าง -1 ถึง +1 โดยเมื่อค่าที่เข้าใกล้ -1 หรือ +1 นั้นมีค่าสัมพันธ์ของข้อมูลที่ชัดเจน และค่า -1 คือค่าทั้งสองเป็นส่วนกลับกัน ส่วน +1 คือค่าทั้งสองที่ไปทางเดียวกัน

$$r = \frac{\left(\frac{1}{n-1}\right)\left(\Sigma XY - \left(\frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n}\right)\right)}{S_x \cdot S_y} \quad (16)$$

เมื่อ X และ Y คือค่าของชุดข้อมูลทดสอบของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ตามลำดับ S_x และ S_y คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ตามลำดับ

หลังจากนั้นได้ทำการคัดเลือกคู่ผลทดสอบที่มีความสัมพันธ์ โดยทั่วไปแล้วเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มาแล้วบ่งบอกได้ยากว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด จึงได้มีการแบ่งช่วงความสัมพันธ์ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) กับระดับความสัมพันธ์ทางสถิติ

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)	ระดับความสัมพันธ์
-0.01 ถึง -0.09 หรือ +0.01 ถึง +0.09	เล็กน้อย (Trivial)
-0.10 ถึง -0.29 หรือ +0.10 ถึง +0.29	ต่ำถึงกลาง (Low - moderate)
-0.30 ถึง -0.49 หรือ +0.30 ถึง +0.49	กลางถึงสูง (Moderate - substantial)
-0.50 ถึง -0.69 หรือ +0.50 ถึง +0.69	สูงถึงสูงมาก (Substantial - very strong)
-0.70 ถึง -0.89 หรือ +0.70 ถึง +0.89	สูงมาก (Very strong)
-0.90 ถึง -0.99 หรือ +0.90 ถึง +0.99	เกือบสมบูรณ์ (Near perfect)

เพื่อแบ่งชั้นคุณภาพออกเป็นช่วง ๆ ของตัวแปรตาม ด้วยการพิจารณาแบบกราฟขั้นบันไดตามวิธี Confidence band method [12] ในมาตรฐาน ISO 19624: 2018 [6] โดยยกตัวอย่างการจำแนกชั้นคุณภาพซึ่งได้แบ่งช่วงข้อมูลของตัวแปรอิสระ โดยการเลือกค่ามากและน้อยที่สุดแล้วทำการแบ่งช่วงให้เท่ากันตลอดช่วงข้อมูลของตัวแปรอิสระ รวมทั้งพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลตัวแปรตามให้มีความเหมาะสม

4. ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการทดสอบหาความสามารถรับแรงในแนวแกนของไม้ไผ่ขางหม่น จากตัวอย่างทั้งหมด 116 ตัวอย่าง จากลำไม้ไผ่ 39 ซึ่งผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติและความสามารถในการรับแรงตามแนวแกน

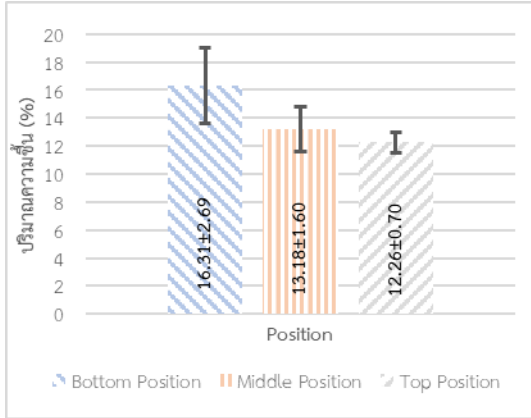
รายละเอียด	n	Min	Max	mean	SD.
ส่วนที่ 1 การทดสอบที่ไม่ทำลาย					
ความหนาของผนังลำไม้ไผ่ (t , มม.)	116	6.78	27.29	13.21	4.75
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D , มม.)	116	74.60	109.29	89.83	7.88
ปริมาณความชื้น (M_c , %)	116	11.07	23.70	14.06	2.62
ความไม่สมบูรณ์ (e_c)	116	0.05	0.41	0.24	0.07
อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง (σ_v)	116	0.91	1.00	0.97	0.02
อัตราส่วนตาม ISO (d_o)	116	0.00	0.09	0.03	0.02
ความหนาแน่น ณ ฝั่งแห้ง (ρ_a , กก./ลบ.ม.)	116	546.71	1,113.26	848.36	122.98
ความหนาแน่น ณ อบแห้ง (ρ_o , กก./ลบ.ม.)	116	485.86	1,001.36	744.07	109.06
ความหนาแน่น ณ ความชื้น 12% (ρ_{12} , กก./ลบ.ม.)	116	544.16	1,121.52	833.36	122.15
มวลเชิงเส้น ณ ฝั่งแห้ง (q_a , กก./ม.)	116	1.06	4.92	2.62	0.80
มวลเชิงเส้น ณ อบแห้ง (q_o , กก./ม.)	116	0.94	3.98	2.29	0.66
มวลเชิงเส้น ณ ความชื้น 12% (q_{12} , กก./ม.)	116	1.05	4.46	2.56	0.74
ส่วนที่ 2 การทดสอบแบบทำลายโดยการให้แรงอัดประลัย					
กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u , กิโลนิวตัน)	116	71.98	256.93	169.19	41.87
กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u , เมกะปาสกาล)	116	36.23	71.92	55.64	8.22

4.1 ขนาดมิติ

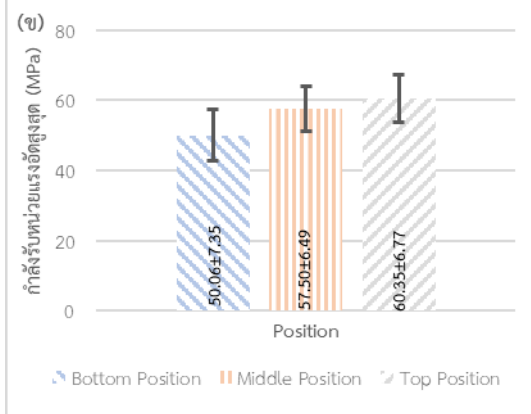
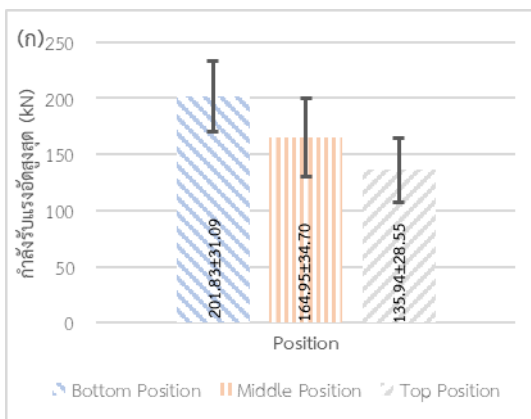
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตัวอย่างทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 74.60 ถึง 109.29 มม. และมีความหนาของผนังลำไม้ไผ่อยู่ที่ 6.78 ถึง 27.29 มม. โดยที่ความหนาของผนังลำไม้ไผ่นั้นมีขนาดที่โคนต้นหนาและมีขนาดบางลงตามความสูงของลำไม้ไผ่

4.2 ปริมาณความชื้น

จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าอยู่ระหว่าง 11.07% - 23.70% โดยค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.06% (ตารางที่ 2) จากรูปที่ 3 เป็นความแตกต่างกันระหว่างตำแหน่งของไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด โดยตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 22157-1: 2004 [5] ได้กำหนดขั้นตอนการแบ่งไว้โดยให้แบ่งออกเป็นสามส่วนเท่าๆ กันตามความยาวของลำไม้ไผ่ และทำเครื่องหมายไว้ดังนี้ ด้านล่าง (Bottom: B) ตรงกลาง (Middle: M) และด้านบน (Top: T) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่าด้านล่างของต้นไม้ไผ่มีปริมาณความชื้นที่เยอะที่สุด และจากนั้นลดลงตามตำแหน่งของลำไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3 ปริมาณความชื้นตามตำแหน่งของลำไม้ไผ่ (ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

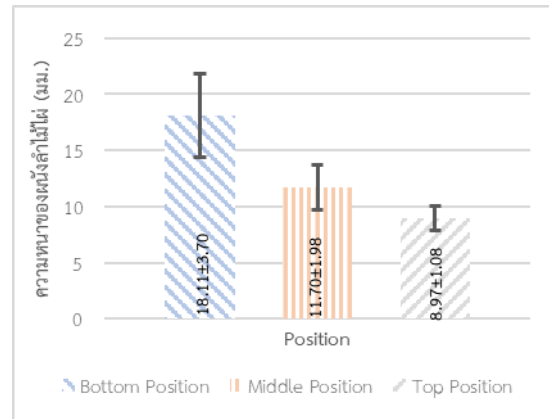


รูปที่ 4 ตำแหน่งของลำไม้ไผ่ (ก) กำลังรับแรงอัดสูงสุด (ข) กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

ผลของปริมาณความชื้นต่อความสามารถในการรับแรงในแนวแกนแสดงตามรูปที่ 4.(ก) และ 4.(ข) โดยเป็นกำลังรับแรงอัดสูงสุด (kN) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (MPa) ตามตำแหน่งของลำไม้ไผ่ที่ใช้ในการทดสอบ จากรูปที่ 4.(ก) พบว่ามีความสัมพันธ์คล้ายกับปริมาณความชื้น (รูปที่ 3) ซึ่งพบว่าตำแหน่งที่มีความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ด้านล่างมีค่าเฉลี่ย 201.83±31.09 kN ส่วนตำแหน่งตรงกลางมีค่าเฉลี่ย 164.95±34.70 kN และตำแหน่งด้านบนเฉลี่ย 135.94±28.55 kN ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.(ข) พบว่ากำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุดที่มีค่ามากที่สุดเป็นในส่วนของด้านบนโดยมีค่าเฉลี่ย 60.35±6.77 MPa ส่วนตำแหน่งตรงกลางมีค่าเฉลี่ย 57.50±6.49 MPa และตำแหน่งด้านล่างมีค่าเฉลี่ย 50.06±7.35

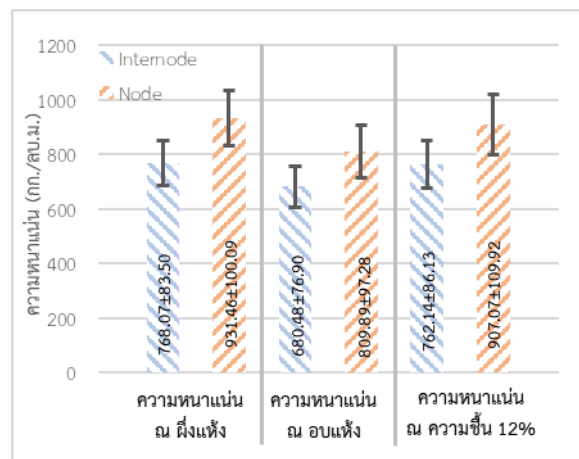
MPa ตามลำดับ ซึ่งตรงกันข้ามกับกำลังรับแรงอัดสูงสุด เป็นผลมาจากความหนาของผนังลำไม้ไผ่ที่มีค่ามากในตำแหน่งด้านล่างและลดลงที่ปลายด้านบนตามรูปที่ 5 ซึ่งจากการที่กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกประมาณ 100 มม. ทำให้ความหนาของผนังลำไม้ไผ่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงในแนวแกนเป็นผลมาจากเส้นใยภายในที่ถูกบีบและอัดแน่นตามพื้นที่หน้าตัดที่เล็กลงโดยที่จากด้านล่างมีพื้นที่หน้าตัดมากที่สุดและเล็กลงมาเรื่อยๆจนถึงด้านบนสุด



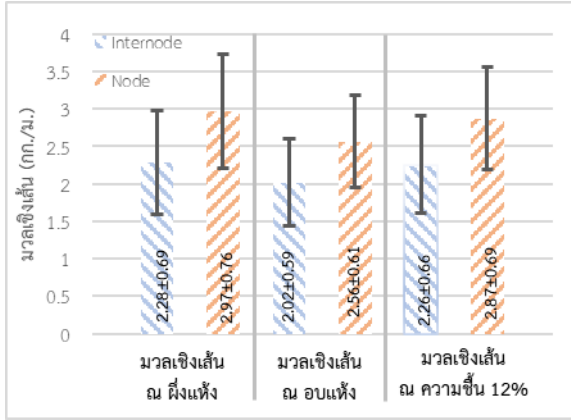
รูปที่ 5 ความหนาของผนังลำไม้ไผ่ตามตำแหน่งของลำไม้ไผ่ (ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

4.3 ความหนาแน่น (Density: ρ) และมวลเชิงเส้น (Linear mass: q)

ความหนาแน่น และ มวลเชิงเส้นแบ่งตามปริมาณความชื้นที่แตกต่างกันทั้ง 3 แบบคือ ความชื้น ณ ผึ่งแห้ง (ρ_a, q_a) ความชื้น ณ อบแห้ง (ρ_o, q_o) และความชื้นที่ 12% (ρ_{12}, q_{12}) แสดงตามรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามมาตรฐาน ISO 22157-1: 2019 [9] ได้กำหนดมาตรฐานปริมาณความชื้นของไม้ไผ่อยู่ที่ 12% ซึ่งพบว่าความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น ณ ความชื้น 12% มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น ณ ผึ่งแห้งอยู่เล็กน้อยเพราะปริมาณความชื้นของตัวอย่างที่นำมาทดสอบมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 14.06% และจากปริมาณความชื้นที่ต่างกันนี้ทำให้น้ำหนักของน้ำในตัวอย่างไม่เท่ากันมีผลให้น้ำหนักโดยรวมของตัวอย่างและความหนาแน่นสูงขึ้น มีผลต่อความแข็งแรงของไม้จึงทำให้ความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น ณ ผึ่งแห้ง มีค่ามากกว่าความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น ณ ความชื้น 12%



รูปที่ 6 ปริมาณของความหนาแน่นที่แตกต่างกันตามปริมาณความชื้น (ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 7 ปริมาณของมวลเชิงเส้นที่ต่างกันตามปริมาณความชื้น (ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)

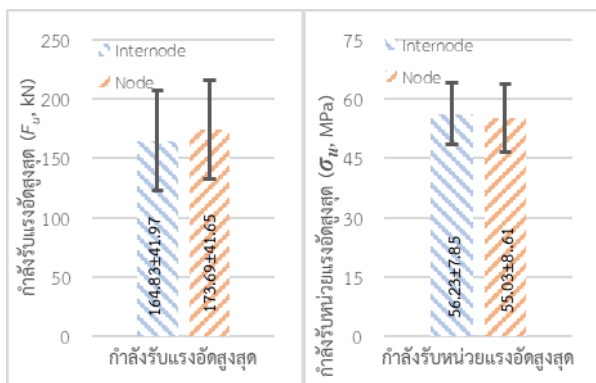
จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างตัวอย่างปล้อง (internode) และข้อ (node) อยู่มาก สืบเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างข้อนั้นมีชิ้นส่วนโตอะแพรม (diaphragms) ที่ขวางอยู่ตรงกลาง ตัวอย่างส่งผลให้มวลโดยรวมของตัวอย่างข้อนั้นมีค่ามากขึ้น จึงเป็นผลให้ตัวอย่างข้อนั้นมีค่ามากกว่าตัวอย่างปล้องทั้งในส่วนของความหนาแน่นและมวลเชิงเส้น

4.4 ความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวาง

ค่าของความไม่สมบูรณ์ (eccentricity: e_c) อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Ovality: α_v) และ อัตราส่วนตาม ISO (ISO Ovality: d_o) ตามตารางที่ 2 มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.24 ± 0.07 , 0.97 ± 0.02 , และ 0.03 ± 0.02 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าที่ได้พบว่าค่าความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางสำหรับไม้ไผ่ขางหม่นนั้นมีค่าค่อนข้างที่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามค่าที่ได้มานั้นเป็นเพียงการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางว่ามีลักษณะที่เป็นวงกลมที่สมบูรณ์หรือเปล่า แต่เมื่อนำไม้ไผ่เหล่านั้นมาใช้งานโครงสร้างหลักอย่างเสา นั้น การโก่งตัวตามยาวที่เป็นธรรมชาติของไม้ไผ่ที่มีอยู่แล้วส่งผลกับกำลังรับแรงอัดของเสามากกว่าค่าความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวาง

4.5 ความสามารถในการรับแรงในแนวแกน

ความสามารถในการรับแรงในแนวแกนนั้นแบ่งได้ออกเป็นสองค่าคือ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate load, F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (Ultimate compression stress, σ_u) จากตารางที่ 2 ได้ค่าเฉลี่ยของการทดสอบทั้งสองอยู่ที่ 169.19 ± 41.87 kN และ 55.64 ± 8.22 MPa ตามลำดับ



รูปที่ 8 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดและกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด

จากรูปที่ 8 แสดงความแตกต่างของตัวอย่างการทดสอบปล้องและตัวอย่างการทดสอบข้อโดยที่มีความแตกต่างกันเล็กน้อย ทั้งในส่วนของการกำลังรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate load, F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (Ultimate compression stress, σ_u)

4.6 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ (Indicating properties: IP) กับความสามารถในการรับแรงตามแนวแกน

โดยผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลายและค่ากำลังอัดเป็นไปตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficients of correlation: r) ระหว่างตัวแปรที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ (Indicating properties: IP) กับความสามารถในการรับแรงตามแนวแกน

ตัวแปรการทดสอบแบบไม่ทำลาย	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) กับค่ากำลังอัด	
	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u , kN)	กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u , MPa)
ความหนาของผนังลำไม้ไผ่ (t , มม.)	0.76	-0.63
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D , มม.)	0.53	-0.05
ปริมาณความชื้น (M_c , %)	0.49	-0.54
ความไม่สมบูรณ์ (e_c)	-0.04	0.10
อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง (α_v)	0.02	-0.08
อัตราส่วนตาม ISO (d_o)	-0.02	0.08
ความหนาแน่น ณ ผึ่งแห้ง (ρ_a , กก./ลบ.ม.)	-0.03	0.54
ความหนาแน่น ณ อบแห้ง (ρ_o , กก./ลบ.ม.)	-0.10	0.62
ความหนาแน่น ณ ความชื้น 12% (ρ_{12} , กก./ลบ.ม.)	-0.10	0.62
มวลเชิงเส้น ณ ผึ่งแห้ง (q_a , กก./ม.)	0.88	-0.35
มวลเชิงเส้น ณ อบแห้ง (q_o , กก./ม.)	0.89	-0.32
มวลเชิงเส้น ณ ความชื้น 12% (q_{12} , กก./ม.)	0.89	-0.32

จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความหนาของผนังลำไม้ไผ่ (t) และเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (D) หากค่าทั้งสองมีค่ามากขึ้นมีผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) ของไม้ไผ่ขางหม่นมีค่าสูงตามไปด้วย สาเหตุที่มีผลกันมาจากค่าทั้งสองนั้นแสดงถึงค่าของพื้นที่หน้าตัดตามขวาง แต่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความหนาของผนังลำไม้ไผ่ (t) กับค่ากำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) มีค่าเป็นลบ ผลคือยิ่งค่ามากเท่าไรส่งผลให้ค่าของกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุดลดลง และไม่มีความสัมพันธ์ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกกับกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Bahtiar E. T. และคณะ [7]

ส่วนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของความหนาแน่นส่งผลต่อกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ไปในทางบวกโดยที่มีค่า r อยู่ระหว่าง 0.54 - 0.62 เป็นค่าที่อยู่ในระดับสูงทำให้ความหนาแน่นมากขึ้นเท่าไร กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ก็ยิ่งมากขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) นั้นกับมีค่า r อยู่ระหว่าง -0.03 ถึง -0.10 ซึ่งเป็นค่าความสัมพันธ์เล็กน้อยและไปในทางลบ เป็นผลให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) มีค่าน้อยลงเมื่อความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้นแต่จากค่าสหสัมพันธ์ที่ต่ำจึงส่งผลน้อย โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นที่มากบ่งบอกถึงความหนาแน่นของเส้นใยในเนื้อของไม้ไฟซึ่งส่งผลต่อกำลังรับหน่วยแรงอัด (σ_u)

สำหรับมวลเชิงเส้นนั้น พบว่ามีค่า r ที่สูงมาก (r มากกว่า 0.88) สำหรับกำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) และไปในทางบวก และในทำนองเดียวกัน กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ก็มีความสัมพันธ์กลางถึงสูง (r มากกว่า -0.32) แต่ไปในทางลบซึ่งเป็นผลให้เมื่อมวลเชิงเส้นมาก กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) ก็มากตามแต่กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ลดลง

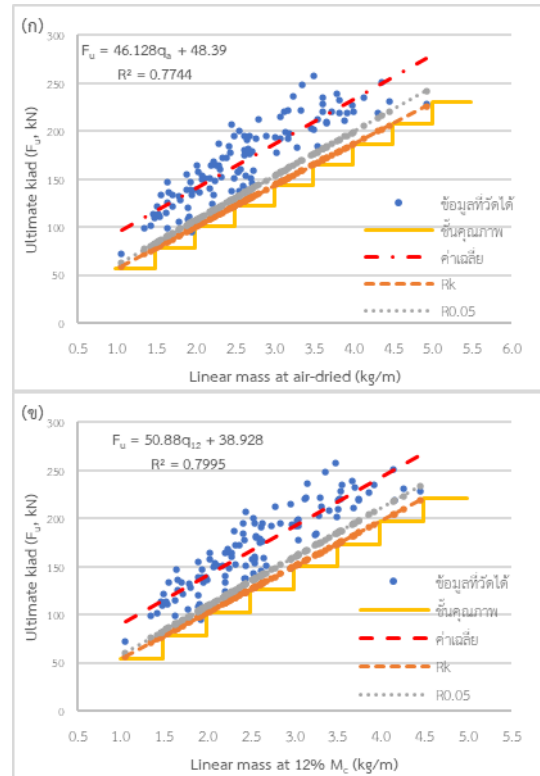
สำหรับปริมาณความชื้นที่ได้มานั้นมีค่า r ที่คืออยู่ที่ 0.49 และ -0.54 สำหรับกำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับความสัมพันธ์กลางถึงสูงมาก แต่กับมีค่า r ที่ต่ำในส่วนของความไม่สมบูรณ์ (e_c) อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง (σ_p) และอัตราส่วนตาม ISO (d_o) ทั้งในด้านกำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) อย่างที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.4 ที่ความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางไม้ใช้ข้อบ่งชี้ว่าสามารถที่รับแรงอัดได้สูงตามไปด้วยยังเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบนั้นสันได้ด้วยความสมบูรณ์ของหน้าตัดตามขวางยังไม่ส่งผลต่อความสามารถรับแรงในแนวแกน

จากที่กล่าวมาข้างต้นได้ข้อสรุปว่ามวลเชิงเส้นนั้นมีความเหมาะสมที่สุดที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถในด้านกำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) ของเสาไม้ไฟ และความหนาแน่นนั้นมีความเหมาะสมในการใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความสามารถด้านกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u)

4.7 การจำแนกชั้นคุณภาพของกำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u)

เป็นการจำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไฟโดยพิจารณาความสัมพันธ์ที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.6 โดยวิเคราะห์สมการเชิงเส้นถดถอยอย่างง่ายเข้ามาใช้จำแนกชั้นคุณภาพ ความสัมพันธ์ระหว่าง มวลเชิงเส้น (q_a, q_{12}) กับ กำลังรับแรงอัดสูงสุด (F_u) ซึ่งได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 9 ตารางที่ 4 และ 5 ซึ่งช่วงในการจำแนกครอบคลุมตลอดช่วงของมวลเชิงเส้น สำหรับตารางที่ 4 และ 5 แสดงลำดับค่าเฉลี่ยที่แถบความเชื่อมั่นที่ 95% ของกลุ่มตัวอย่าง ($R_{0.05}$) และค่าตัวแทนของกลุ่มประชากร (R_k) สำหรับการคำนวณหาค่าของทั้งสองคำนวณได้ตามสมการที่ (12) และ (15)

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (ρ_a, ρ_{12}) ที่ใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ ในการจำแนกชั้นคุณภาพของกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (σ_u) ได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 10 ตารางที่ 6 และ 7 โดยมีช่วงจำแนกครอบคลุมตลอดกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งตารางที่ 6 และ 7 แสดงลำดับค่าเฉลี่ยที่แถบความเชื่อมั่นที่ 95% ของกลุ่มตัวอย่าง ($R_{0.05}$) และค่าตัวแทนของกลุ่มประชากร (R_k) สำหรับการคำนวณหาค่าของทั้งสองคำนวณได้ตามสมการที่ (12) และ (15)



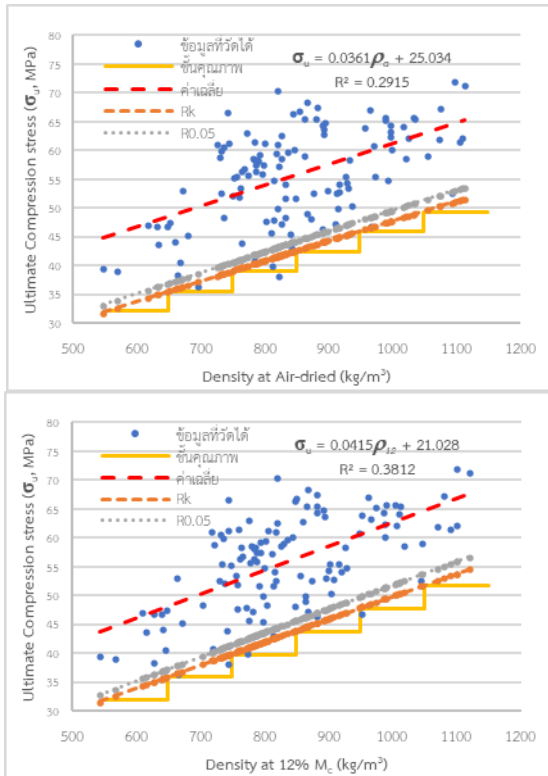
รูปที่ 9 การจำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไฟช่างหม่นกับมวลเชิงเส้น (ก) ณ ฝั่งแห้ง และ (ข) ณ ความชื้น 12%

ตารางที่ 4 การจำแนกชั้นคุณภาพของกำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับไม้ไฟช่างหม่นโดยใช้มวลเชิงเส้น ณ ฝั่งแห้ง (q_a) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ

จำแนกชั้นคุณภาพ (q_a , kg/m)	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate load: F_u , kN)			\bar{R} / R_k
	\bar{R}	$R_{0.05}$	R_k	
1.00 – 1.49	105.82	72.53	68.03	1.56
1.50 – 1.99	128.88	95.55	89.62	1.44
2.00 – 2.49	151.95	118.57	111.22	1.37
2.50 – 2.99	175.01	141.59	132.81	1.32
3.00 – 3.49	198.08	164.61	154.40	1.28
3.50 – 3.99	221.14	187.63	175.99	1.26
4.00 – 4.49	244.20	210.65	197.58	1.24
4.50 – 4.99	267.27	233.67	219.17	1.22
มากกว่า 5.00	290.33	256.69	240.76	1.21

ตารางที่ 5 การจำแนกชั้นคุณภาพของกำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับไม้ไฟช่างหม่นโดยใช้มวลเชิงเส้น ณ ความชื้น 12% (q_{12}) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ

จำแนกชั้นคุณภาพ (q_{12} , kg/m)	กำลังรับแรงอัดสูงสุด (Ultimate load: F_u , kN)			\bar{R} / R_k
	\bar{R}	$R_{0.05}$	R_k	
1.00 – 1.49	103.27	70.88	66.48	1.55
1.50 – 1.99	128.71	96.28	90.31	1.43
2.00 – 2.49	154.15	121.68	114.13	1.35
2.50 – 2.99	179.59	147.09	137.96	1.30
3.00 – 3.49	205.03	172.49	161.79	1.27
3.50 – 3.99	230.47	197.89	185.62	1.24
4.00 – 4.49	255.91	223.30	209.44	1.22
มากกว่า 4.50	281.35	248.70	233.27	1.21



รูปที่ 10 การจำแนกชั้นคุณภาพของไม้ไผ่ข้างหม่นกับความหนาแน่น (ก) ณ ผึ่งแห้ง และ (ข) ณ ความชื้น 12%

ตารางที่ 6 การจำแนกชั้นคุณภาพกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุดของไม้ไผ่ข้างหม่น โดยใช้ความหนาแน่น ณ ผึ่งแห้ง (ρ_a) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ

จำแนกชั้นคุณภาพ (ρ_a , kg/m)	กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (Ultimate compression stress: σ_u , MPa)			\bar{R} / R_k
	\bar{R}	$R_{0.05}$	R_k	
550 – 649	46.68	35.04	33.77	1.38
650 – 749	50.29	38.64	37.24	1.35
750 – 849	53.90	42.24	40.71	1.32
850 – 949	57.51	45.84	44.18	1.30
950 – 1049	61.12	49.44	47.65	1.28
มากกว่า 1050	64.73	53.04	51.12	1.27

ตารางที่ 7 การจำแนกชั้นคุณภาพกำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุดของไม้ไผ่ข้างหม่น โดยใช้ความหนาแน่น ณ ความชื้น 12% (ρ_{12}) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ

จำแนกชั้นคุณภาพ (ρ_{12} , kg/m)	กำลังรับหน่วยแรงอัดสูงสุด (Ultimate compression stress: σ_u , MPa)			\bar{R} / R_k
	\bar{R}	$R_{0.05}$	R_k	
550 – 649	45.91	35.11	33.83	1.36
650 – 749	50.06	39.25	37.82	1.32
750 – 849	54.21	43.39	41.81	1.30
850 – 949	58.36	47.53	45.80	1.27
950 – 1049	62.51	51.67	49.79	1.26
มากกว่า 1050	66.66	55.81	53.78	1.24

ค่าอัตราส่วน \bar{R} / R_k ที่เป็นค่ากำลังที่ใช้ในการออกแบบโดยอิงค่าของกลุ่มตัวแทน (R_k) ที่ได้มีค่าที่ต่ำกว่าค่ากำลังเฉลี่ย (\bar{R}) มากทำให้ในแง่ของมูลค่าเป็นการออกแบบที่สิ้นเปลือง ซึ่งตามตารางที่ 4 ถึง 7 นั้นได้ค่า

อัตราส่วนอยู่ที่ 1.2 จนถึง 1.5 ซึ่งสามารถนำค่านี้มาใช้ในการออกแบบทั้งวิธีสถานะขีดจำกัด (Limit state design) หรือ วิธีแบบ LRFD ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านความปลอดภัยบางส่วนที่เหมาะสมกับวัสดุด้วย [8] สำหรับรูปที่ 10 และตารางที่ 6 และ 7 สามารถนำค่าของตัวแทนของกลุ่มตัวอย่าง (Characteristic value: R_k) นี้มาใช้แทนการคำนวณหน่วยแรงที่ยอมให้ (Allowable stress) ในสมการที่ (13) ได้

5. สรุปผลงานวิจัย

จากผลที่ได้ทดสอบรวมทั้งการสำรวจหาตัวแปรที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ (Indicating Properties) โดยหัวข้อสำคัญคือการหาค่าการรับแรงตามแนวแกนของไม้ไผ่ข้างหม่นโดยที่อ้างอิงจากตัวแปรอีกหนึ่งตัวซึ่งต้องไม่ใช้การนำไม้ไผ่ไปทดสอบโดยตรงเพราะมีความล่าช้าในการเตรียมวัสดุและรอผลการทดสอบจากสถาบันที่รับทดสอบค่าจากการทดสอบพบว่า ความหนาแน่นและมวลเชิงเส้นนั้นมีความสัมพันธ์กับกำลังรับหน่วยแรงอัด (σ_u) และกำลังรับแรงอัด (F_u) ตามลำดับ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) อยู่ระหว่าง 0.54 ถึง 0.62 สำหรับกำลังรับหน่วยแรงอัด (σ_u) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) อยู่ระหว่าง 0.88 ถึง 0.89 สำหรับกำลังรับแรงอัด (F_u) นอกเหนือจากนี้ยังมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ อาทิเช่น ปริมาณความชื้นที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่ 0.49 และ -0.54 สำหรับกำลังรับแรงอัด (F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัด (σ_u) หรือความหนาของผนังลำไม้ไผ่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่ 0.76 และ -0.63 สำหรับกำลังรับแรงอัด (F_u) และกำลังรับหน่วยแรงอัด (σ_u) ซึ่งในงานศึกษานี้เลือกค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่สูงเพื่อมาหาความสัมพันธ์และค่าการเข้าสู่ของข้อมูล (R^2) เนื่องจากไม้ไผ่เป็นวัสดุที่ดูดซึมน้ำได้ดังนั้นปริมาณความชื้นที่เหมาะสมในการใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ขึ้นเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดโดย ISO ที่ 12% เพราะฉะนั้นในการวัดทั้งความหนาแน่นและมวลเชิงเส้นจึงได้นำปริมาณความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องได้เป็นตัวเลือกสำหรับหาดัชนีบ่งชี้คุณสมบัติ (Indicating Properties) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความหนาของผนังลำไม้ไผ่ไม่มีความสัมพันธ์กับมวลเชิงเส้น ซึ่งสามารถนำมาใช้หาค่าของมวลเชิงเส้นเพื่อสอดคล้องค่าไปหาค่ากำลังรับแรงอัด (F_u) ของไม้ไผ่ที่ได้จำแนกชั้นคุณภาพไว้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Canavan, S., Richardson, D. M., Visser, V., Roux, J. J., Vorontsova, M. S., and Wilson, J. R. (2016) "The global distribution of bamboos: assessing correlates of introduction and invasion," *AoB Plants*, Dec 23 2016.
- [2] กลุ่มสำรวจทรัพยากรป่าไม้ ส่วนสำรวจและวิเคราะห์ทรัพยากรป่าไม้ สำนักฟื้นฟูและพัฒนาพื้นที่อนุรักษ์, "การสำรวจไม้ไผ่ของประเทศไทย," 2552.
- [3] Chaowana, K., Wisadsatorn, S., and Chaowana, P. (2021) "Bamboo as a Sustainable Building Material—Culm Characteristics and Properties," *Sustainability*, vol. 13, no. 13.
- [4] Daram, S. (2019) "The Analysis of Safety Factor for Bamboo Used in Construction," *Journal of Architecture, Design and Construction*, vol. 1, no. 3, pp. 11-27.

- [5] International Organization for Standardization, "ISO 22157-1:2004; Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 1," 2004.
- [6] International Organization for Standardization, "ISO 19624:2018; Bamboo structures - Grading of bamboo clumps - Basic principles and procedures," 2018.
- [7] Bahtiar, E. T., Imanullah, A. P., Hermawan, D., Nugroho, N., and Abdurachman, (2019) "Structural grading of three sympodial bamboo culms (Hitam, Andong, and Tali) subjected to axial compressive load," *Engineering Structures*, vol. 181, pp. 233-245.
- [8] Bahtiar, E. T., Trujillo, D., and Nugroho, N., (2020) "Compression resistance of short members as the basis for structural grading of *Guadua angustifolia*," *Construction and Building Materials*, vol. 249.
- [9] International Organization for Standardization, "ISO 22157-1:2019; Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 1," 2019.
- [10] Bahtiar, E. T., Nugroho, N., Surjokusumo, S., and Karlinasari, L., (2013) "Eccentricity Effect on Bamboo's Flexural Properties," *Journal of Biological Sciences*, vol. 13(2), pp. 82-87.
- [11] International Organization for Standardization, "ISO 22156:2004; Bamboo — Structural design," 2004.
- [12] Nurmadina., Nugroho, N., and Bahtiar, E. T., (2017) "Structural grading of *Gigantochloa apus* bamboo based on its flexural properties," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 1173-1189.