

ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของไม้บางชนิด

กาญจนพร หวานพีช¹ พรพิมล วชิรมิตรี¹ วรทัศน์ นิราศระทม² สิริกัญญา กำปันทอง³
 นันทน์ นามมหาจักร³ อรพรรณ จิรยุทธนศักดิ์⁴ ณัฐรัตน์ เก่งกล้า⁵ มณิศรา พิริยวิรุฒม์⁶
 พิจารณ์ จรเสนา⁷ สรวุฑ ชื่นคำ⁸ และ สุทัศน์ รัตนพันธ์^{9*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: sutatch.ratanaphan@mail.kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

³ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁴ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิทยาศาสตร์นาโนและเทคโนโลยีนาโน คณะวิทยาศาสตร์

⁵ นักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁶ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁷ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

⁸ อาจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี

⁹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาวิชาวิทยาศาสตร์นาโนและเทคโนโลยีนาโน คณะวิทยาศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 16 กันยายน 2563

แก้ไข : 1 มิถุนายน 2564

ตอบรับ : 7 กรกฎาคม 2564

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.3

คำสำคัญ :

ความหนาแน่นของไม้ /
 สมบัติเชิงกล / ไม้แดง / ไม้สัก /
 ไม้ยางพารา / ไม้สน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของไม้ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย 4 ชนิด ได้แก่ ไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง คณะผู้วิจัยเลือกใช้เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการตรวจสอบโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้แต่ละชนิด และเปรียบเทียบรูปแบบการจัดเรียงตัวของเซลล์ท่อลำเลียงของไม้กับค่าความหนาแน่น ค่าโมดูลัสของการแตกหัก และค่าความแข็งของไม้ จากผลการวิจัย พบว่า ไม้แต่ละชนิดประกอบไปด้วยกลุ่มเซลล์ที่มีรูพรุนจัดเรียงตัวเข้าด้วยกันเป็นเนื้อไม้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่มีรูปแบบการกระจายตัวของขนาดเซลล์ที่แตกต่างกัน โดยการกระจายตัวของขนาดเซลล์ของไม้สนเป็นการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งแตกต่างจากกรณีของไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง ที่มีลักษณะการแจกแจงแบบทวินาม โดยในกรณีของการแจกแจงแบบทวินามนั้น ไม้แต่ละชนิดจะมีการจัดเรียงตัวของเซลล์ขนาดเล็กที่แทรกระหว่างเซลล์ที่มีขนาดใหญ่ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าความหนาแน่น ค่าโมดูลัสของการแตกหัก และค่าความแข็งของไม้แต่ละชนิดแตกต่างกันไปด้วย โดยความหนาแน่นของไม้สนมีค่าเป็น 0.51 ± 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าความหนาแน่นของไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง ที่มีค่าเป็น 0.76 ± 0.06 , 0.79 ± 0.06 และ 1.05 ± 0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ค่าโมดูลัสของการแตกหักของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง มีค่าเป็น 64.4 ± 5.6 , 104.7 ± 11.5 , 73.1 ± 8.8 และ 127.2 ± 8.8 เมกะพาสคาล ตามลำดับ ในส่วนของค่าความแข็งของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง มีค่าเป็น 45 ± 3.4 , 58 ± 3.9 , 51 ± 3.6 และ 68 ± 4.4 ชอร์ดี ตามลำดับ

Relationships between Microstructures and Mechanical Properties of Selected Woods

Khanjanaporn Whanpueth¹, Pornpimol Wachiranimit¹, Warratas Nirasratom², Siriganya Kampanthong³, Nant Nammahachak³, Ooraphan Chirayutthanasak⁴, Nattarat Kengkla⁵, Manisara Phiriyawirut⁶, Pijarn Jornsano⁷, Sarawut Cheunkar⁸ and Sutatch Ratanaphan^{9*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

* Corresponding Author: sutatch.ratanaphan@mail.kmutt.ac.th

¹ Undergraduate Student, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

² Undergraduate Student, Department of Electrical Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology.

³ Graduate Student, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

⁴ Graduate Student, Nanoscience and Nanotechnology Graduate Program, Faculty of Science.

⁵ Researcher, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

⁶ Associate Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

⁷ Lecturer, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering.

⁸ Lecturer, Division of Biotechnology, School of Bioresources and Technology.

⁹ Assistant Professor, Department of Tool and Materials Engineering, Faculty of Engineering, and Nanoscience and Nanotechnology Graduate Program, Faculty of Science.

Article Info

Article History:

Received: September 16, 2020

Revised: June 1, 2021

Accepted: July 7, 2021

DOI : 10.14456/kmuttrd.2021.3

Keywords:

Wood Density /

Mechanical Properties /

Redwood (*Xylia xylocarpa*) /

Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) /

Rubber Wood (*Hevea brasiliensis*) /

Pine Wood (*Pinus sylvestris*)

Abstract

The present research investigated the relationships between microstructures and mechanical properties of widely used species of woods in Thailand. The arrangements of cellular microstructures of pine wood, rubber wood, teak wood and red wood were examined via scanning electron microscopy and were compared with the densities, moduli of rupture and hardness of the woods. Woods were noted to consist of porous cells, arranged in a similar fashion but with clearly different cellular size distributions. While the size distribution of pine wood could be well described by normal distribution, those of rubber wood, teak wood and red wood were bimodal distribution in nature. In the case of the binomial distributions, inter-penetrating arrangements of smaller cells among larger ones were also noted to be different among the different woods, resulting in the different values of densities, moduli of rupture, and hardness. The density of pine wood of 0.51 ± 0.02 grams per cubic centimeter was lower than those of rubber wood, teak wood and red wood, which were 0.76 ± 0.06 , 0.79 ± 0.06 and 1.05 ± 0.02 g/cm³, respectively. The moduli of rupture for pine wood, rubber wood, teak wood and red wood were 64.4 ± 5.6 , 104.7 ± 11.5 , 73.1 ± 8.8 , and 127.2 ± 8.8 MPa, respectively. The hardness values of pine wood, rubber wood, teak wood and red wood were 45 ± 3.4 , 58 ± 3.9 , 51 ± 3.6 , and 68 ± 4.4 Shore D, respectively.

1. บทนำ

ความสวยงามของลวดลายและสีสันทองไม้สามารถเพิ่มสุนทรียภาพของเฟอร์นิเจอร์ โครงสร้างอาคารที่พิกอาศัยและงานสถาปัตยกรรม จากเหตุผลดังกล่าวปริมาณความต้องการใช้ไม้ในประเทศไทยจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะสถิติการนำเข้าและส่งออกผลิตภัณฑ์ไม้แปรรูปประเภทเฟอร์นิเจอร์ ซึ่งพบว่าปริมาณการนำเข้าผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์เพิ่มขึ้นจาก 1,921,941 หน่วย ใน พ.ศ. 2560 ไปเป็น 2,603,445 หน่วย ใน พ.ศ. 2561 และปริมาณการส่งออกผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์เพิ่มขึ้นจาก 12,180,485 หน่วย ใน พ.ศ. 2560 ไปเป็น 14,803,743 หน่วย ใน พ.ศ. 2561 [1-2] แสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการใช้งานไม้เพื่อการส่งออกเฟอร์นิเจอร์อยู่เป็นจำนวนมาก นอกจากนั้นแล้วเพื่อใช้เป็นข้อปฏิบัติสำหรับการใช้ไม้เป็นวัสดุก่อสร้างได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ ประหยัดและปลอดภัย วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับอาคารไม้ วสท 1002-16 ใน พ.ศ. 2517 [3] โดยไม้จะถูกจำแนกตามชนิดของสายพันธุ์ไม้และความสามารถรับแรงดัดต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นห้าประเภทคือ ไม้เนื้ออ่อนมาก ไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็งปานกลาง ไม้เนื้อแข็ง และไม้เนื้อแข็งมาก ในช่วงเวลาเดียวกันนั้น กองวิจัยผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ซึ่งเป็นหน่วยงานราชการแห่งเดียวในประเทศไทยที่มีงานในหน้าที่เกี่ยวข้องกับการนำไม้ไปใช้ประโยชน์ได้เสนอหลักเกณฑ์การกำหนดประเภทไม้ต่อกรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ซึ่งได้รับความเห็นชอบในหนังสือกรมป่าไม้ กส 0702/6679 พ.ศ. 2517 ในเรื่องข้อกำหนดเกี่ยวกับไม้ที่ใช้ในการก่อสร้าง [4] โดยในหลักเกณฑ์การกำหนดไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งของกรมป่าไม้ไม่ได้ใช้ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (Modulus of rupture; MOR) ของไม้ตะเคียนทองแห้งเป็นค่ามาตรฐานในการแบ่งชนิดไม้ หากค่าโมดูลัสของการแตกหักของไม้ชนิดนั้นๆ มากกว่า 1,000 กก./ตร.ซม. และมีอายุการใช้งานได้มากกว่า 6 ปี ซึ่งเทียบกันได้กับไม้ตะเคียนทองแล้ว สายพันธุ์ไม้นั้นจะจำแนกให้เป็นไม้เนื้อแข็ง ในส่วนของไม้เนื้อแข็งปานกลาง ค่าโมดูลัสของการแตกหักจะอยู่ระหว่าง 600 ถึง 1,000 กก./ตร.ซม. และอายุการใช้งานจะอยู่ระหว่าง 2 ถึง 6 ปี สำหรับไม้เนื้ออ่อนนั้นจะมีค่าโมดูลัสของการแตกหักต่ำกว่า 600 กก./ตร.ซม. และอายุการใช้งานที่ต่ำกว่า 2 ปี ภายหลังจากวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

และกรมป่าไม้ได้ออกข้อกำหนดในการจำแนกชนิดไม้มาแล้วเป็นระยะเวลากว่าสามสิบปี สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทยได้ออกมาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมือง (มยผ.) โดยเฉพาะสำหรับไม้แปรรูปสำหรับงานก่อสร้างเป็นมาตรฐานงานไม้ มยผ. 1104-52 พ.ศ. 2552 [5] โดยได้แบ่งชนิดไม้ตามสมบัติค่าโมดูลัสของการแตกหักโดยใช้หลักเกณฑ์เดียวกันกับของกรมป่าไม้ และยังได้เพิ่มมาตรฐานการทดสอบกำลังต้านทานแรงดัดของไม้ (มยผ. 1224-51) [6] โดยใช้หัตถวิธีที่มีลักษณะตามที่กำหนดไว้ใน ASTM D143 [7] อนึ่งแม้ว่าไม้จะมีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่เหมือนกันได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses) และลิกนิน (Lignin) แต่การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ชีวภาพเหล่านี้มีลำดับชั้นเชิงโครงสร้าง (Structural hierarchy) ที่แตกต่างกัน จากการสังเกตที่ผิวหน้าไม้ที่ตัดให้เรียบด้วยแว่นขยายจะพบว่าไม้เนื้ออ่อนจะมีโครงสร้างเนื้อไม้ที่ไม่มีรูพรุน (Non-porous wood) ซึ่งแตกต่างจากไม้เนื้อแข็งที่เนื้อไม้ที่มีรูพรุน (Porous wood) [4] อย่างไรก็ตามหากใช้วิธีจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM; Scanning electron microscopy) ซึ่งมีกำลังขยายที่สูงกว่าแว่นขยายแล้วจะพบว่าโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้เนื้ออ่อนนั้นจะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กๆ ซึ่งเป็นเซลล์ท่อลำเลียงน้ำและแร่ธาตุของไม้ โดยเซลล์ท่อลำเลียงนี้จะมีลักษณะเป็นท่อเรียวยาว ตรงกลางเป็นช่องว่าง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 40 ไมโครเมตร และมีรูปแบบการกระจายตัวของขนาดของเซลล์เป็นการแจกแจงแบบแบบปกติและเซลล์เหล่านี้จะถูกเรียกว่า เทรคีต (Tracheid) โดยนักพฤกษศาสตร์ผู้เชี่ยวชาญทางสรีรวิทยาของพืช (Plant physiology) รูนุกเบิกชื่อ Carl Sanio ใน พ.ศ. 2406 [8] ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่ Carl Sanio ใช้คำเทรคีตโดยจากรากศัพท์ภาษากรีก Trakheia ซึ่งแปลว่าท่อลำเลียง ในส่วนของไม้เนื้อแข็งนั้นจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถมองเห็นได้จากแว่นขยายนี้จะเป็นเซลล์ท่อลำเลียงที่มีขนาดใหญ่กว่า 40 ไมโครเมตรและถูกเรียกว่าเวสเซล (Vessel) ในบริบทนี้เวสเซลซึ่งเป็นภาษาอังกฤษแปลว่าท่ออาจจะถูกใช้เพื่อบ่งบอกความแตกต่างของไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง โดยท่อลำเลียงขนาดใหญ่เหล่านี้จะกระจายตัวแทรกอยู่ระหว่างกลุ่มเซลล์ท่อลำเลียงที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากในเชิงวิวัฒนาการแล้วไม้เนื้อแข็งพัฒนามาจากไม้เนื้ออ่อน เซลล์ท่อลำเลียงที่มีอยู่

แต่เดิมก่อนการวิวัฒนาการและมีขนาดเล็กกว่าจึงถูกเรียกว่า เทรคิต [9] โครงสร้างระดับจุลภาคเซลล์ท่อลำเลียงของไม้ จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ไม้มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน ออกไปตามแต่ชนิดของสายพันธุ์ไม้นั้น ๆ [9–12] แม้ว่าจะมี งานวิจัยภายในประเทศ ที่ศึกษาสมบัติเชิงกลของไม้ ยกตัวอย่าง เช่น ไม้สัก [13] ไม้ยูคาลิปตัส [14] และไม้ยางพารา [15] แต่ งานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติ เชิงกลและโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ เลือศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของการแตกหัก ความแข็งแรงและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างเซลล์ระดับจุลภาค ของไม้และความหนาแน่นของเซลล์ท่อลำเลียงของไม้ที่การใช้ อย่างแพร่หลายในประเทศ

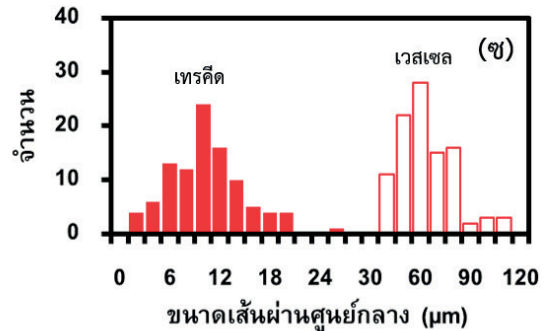
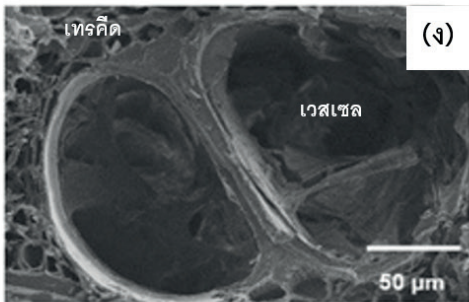
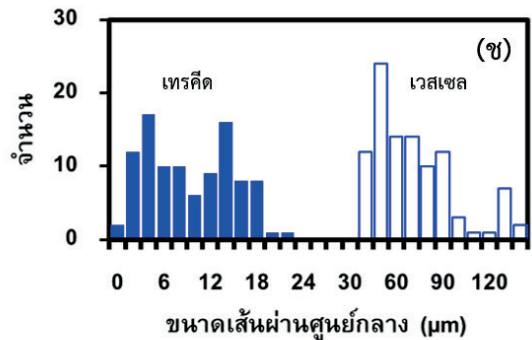
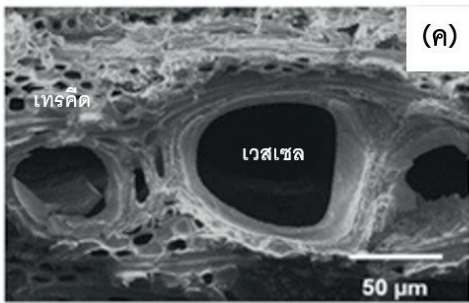
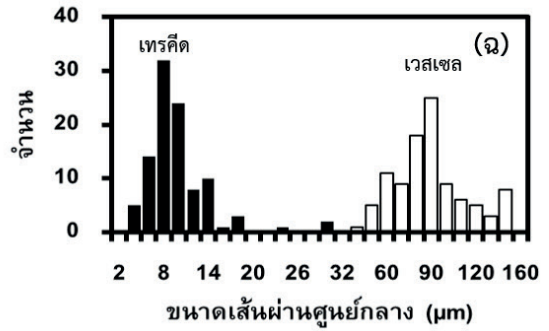
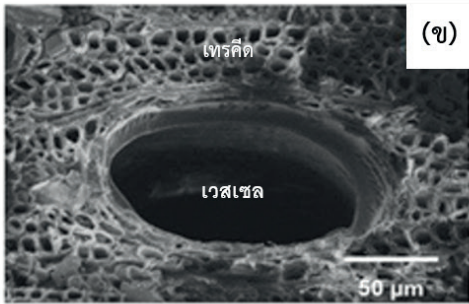
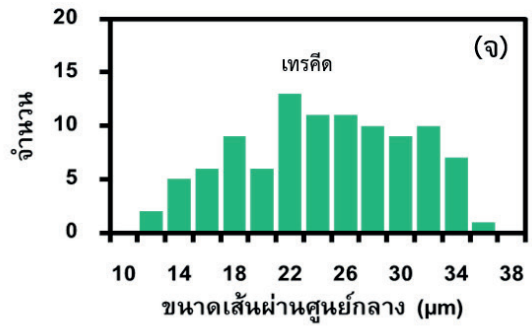
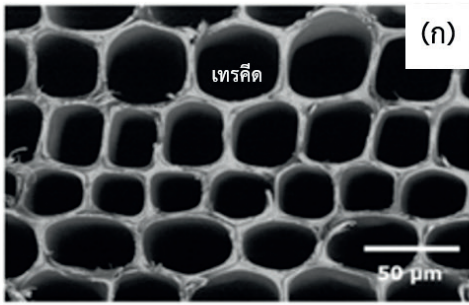
1. วิธีการวิจัย

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดเรียงตัวของ โครงสร้างระดับจุลภาคของไม้และสมบัติเชิงกลของไม้ คณะผู้ วิจัยได้เลือกไม้สน (*Pinus sylvestris*) ไม้ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ไม้สัก (*Tectona grandis* Linn. f.) และไม้แดง (*Xylocarpus*) ซึ่งไม้เหล่านี้นอกจากจะมีการใช้งานอย่าง แพร่หลายในอุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ในประเทศแล้ว ไม้เหล่านี้ ยังมีสมบัติเชิงกลที่ครอบคลุมในช่วงของไม้เนื้อแข็งปานกลาง และไม้เนื้อแข็งเมื่ออ้างอิงตามมาตรฐาน วสท 1002-16, กส 0702/6679 และ มยพ. 1104-52 ซึ่งชิ้นงานไม้ทั้งสี่ชนิดที่ ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทบำรุงไทยเคหะภัณฑ์ จำกัด โดยไม้สักนั้นเป็นไม้ที่ปลูกในประเทศไทย แต่ในส่วนของ ไม้ยางพารา ไม้แดงและไม้สนนั้นได้นำเข้ามาจากประเทศมาเลเซีย ประเทศเมียนมาร์และประเทศนิวซีแลนด์ ตามลำดับ โครงสร้าง ระดับจุลภาคของไม้ถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (JEOL JSM-6610LV) เนื่องจากในไม้เนื้อแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตจะมี ขนาดเล็กกว่าขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซล การจำแนก ชนิดของเซลล์ท่อลำเลียงจะพิจารณาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเซลล์ สำหรับการกระจายตัวของเซลล์ท่อลำเลียงใน ไม้แต่ละชนิดนั้นจะคำนวณจากขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบ เทรคิตและเซลล์แบบเวสเซลเป็นจำนวนชนิดละ 100 เซลล์ โดยใช้โปรแกรม ImageJ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยและค่า เบี่ยงเบนมาตรฐานจะคำนวณได้จากข้อมูลการกระจายตัวของ

ขนาดของเซลล์ท่อลำเลียง ค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของเซลล์ ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ในไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง คำนวณได้จากกรับจำนวนเวสเซลในภาพถ่ายโครงสร้างระดับ จุลภาคต่อพื้นที่ในหน่วยตารางมิลลิเมตร (จำนวนท่อต่อตาราง มิลลิเมตร) ในส่วนของความหนาแน่นของไม้จะคำนวณจาก หลักการของอาร์คิมิดีส โดยการชั่งน้ำหนักของชิ้นงานไม้ในอากาศ เทียบกับในน้ำด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่งของบริษัท METTLER Toledo รุ่น AB204-S ค่าโมดูลัสของการแตกหัก ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D7264 Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials โดยใช้การทดสอบแบบกดสามจุด (Three-points bending test) ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine; LLOYD) ที่มีขนาดโหลดเซลล์ (Load cell) 50 กิโลนิวตัน ขนาดของชิ้นงานไม้จะอยู่ในช่วงความกว้าง 26 ถึง 32 มิลลิเมตร ความยาว 120 ถึง 130 มิลลิเมตร ความหนา 8 ถึง 10 มิลลิเมตร และใช้ระยะช่วงกคกว้าง 80 มิลลิเมตร ส่วน ความแข็งแรงของไม้จะตรวจสอบด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ (Durometer) ในหน่วยชอร์ดี (Shore D) โดยในการทดสอบหาค่าความ หนาแน่น ความแข็งแรงและโมดูลัสของการแตกหักของไม้ จะใช้ ชิ้นงานไม้ในแต่ละการทดสอบอย่างละ 3 ชิ้นงาน เพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการศึกษาโครงสร้างของไม้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างระดับจุลภาค ของไม้สนแตกต่างจากไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง ดังแสดง ในรูปที่ 1 โดยโครงสร้างเซลล์ท่อลำเลียงของไม้สน ในรูปที่ 1ก ประกอบด้วยเซลล์ที่มีขนาดใกล้เคียงกัน จัดเรียงตัวอย่างเป็น ระเบียบ แต่โครงสร้างระดับจุลภาคของไม้ยางพารา ในรูปที่ 1ข ไม้สัก ในรูปที่ 1ค และไม้แดง ในรูปที่ 1ง นั้น จากการสังเกต พบว่าไม้ทั้ง 4 ชนิดมีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และจำนวนเซลล์ท่อลำเลียงแตกต่างกัน โดยในกรณีของไม้สนนั้น มีการกระจายตัวที่สมมาตรซึ่งมีตำแหน่งจุดสูงสุดของการกระจายตัว ตำแหน่งเดียวจึงถูกอธิบายด้วยการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) [16] แต่ในส่วนของไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง จะมีการแจกแจงแบบทวินาม (Bimodal distribution) [17] ดังแสดงใน รูปที่ 1จ - รูปที่ 1ช



รูปที่ 1 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ (ก) ไม้สน (ข) ไม้ยางพารา (ค) ไม้สักและ (ง) ไม้แดง และการกระจายตัวของขนาดท่อลำเลียงแบบเทรคิตและเวสเซลของ (จ) ไม้สน (ฉ) ไม้ยางพารา (ช) ไม้สักและ (ซ) ไม้แดง โดยกราฟแท่งแบบทึบและโปร่งจะแสดงการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตและเวสเซล

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นเปรียบเทียบงานวิจัยที่ผ่านมา [18–21] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตและเวสเซลในไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง รวมถึงค่าความหนาแน่นของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ของไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง

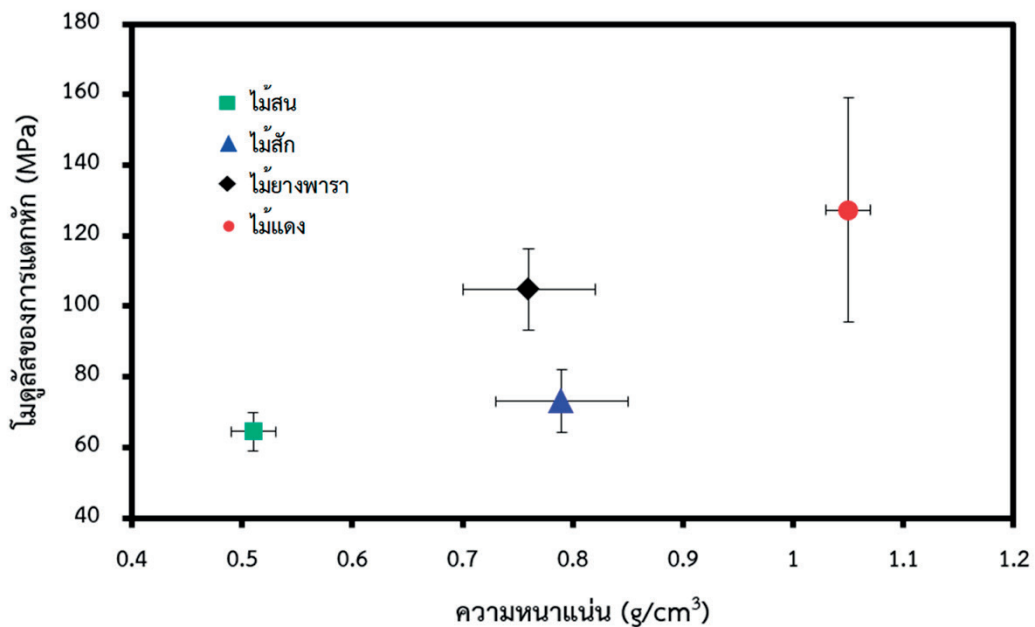
| ชนิดไม้ | ความหนาแน่น (g/cm ³) | ความหนาแน่น อ้างอิง (g/cm ³) | เส้นผ่านศูนย์กลางของ เซลล์ท่อลำเลียง (µm) | | ความหนาแน่นของเซลล์ท่อ ลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ (จำนวนท่อ/mm ²) |
|------------|-------------------------------------|---|--|-----------|---|
| | | | เทอร์คิต | เวสเซล | |
| ไม้สน | 0.51 ± 0.02 | 0.42 ^[18] | 25.4 ± 6 | - | - |
| ไม้ยางพารา | 0.76 ± 0.06 | 0.59 ^[19] | 10.9 ± 4 | 94.1 ± 24 | 6 ± 1 |
| ไม้สัก | 0.79 ± 0.06 | 0.74 ^[19,20] | 10.4 ± 5 | 75.5 ± 27 | 10 ± 2 |
| ไม้แดง | 1.05 ± 0.02 | 1.01 ^[21] | 11.5 ± 5 | 68.5 ± 17 | 15 ± 4 |

จากความแตกต่างนี้ นักสรีรวิทยาของพืชได้นิยามให้เซลล์ท่อลำเลียงในไม้สน และเซลล์ในไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง ซึ่งมีขนาดของเซลล์ในช่วงของการกระจายตัวแบบแรก หรือเป็นกลุ่มเซลล์ที่มีขนาดเล็กกว่าเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิต และเซลล์ที่มีขนาดของเซลล์ใหญ่กว่า ซึ่งแทรกตัวอยู่ระหว่างเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตของไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดงว่า เซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซล [9, 22-23] โดยขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตในไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดงมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน คือ 10.9±4, 10.4±5 และ 11.5±5 ไมโครเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ (จำนวนท่อต่อตารางมิลลิเมตร) ของไม้ยางพารา ไม้สัก และ ไม้แดง สามารถคำนวณได้จากภาพถ่ายโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในรูปที่ 1ข - รูปที่ 1ง ขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตในไม้ทั้งสามชนิดนี้เล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตของไม้สน คือ 25.4 ไมโครเมตร อย่างไรก็ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลในไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง คือ 94.1±24, 75.5±27 และ 68.5±17 ไมโครเมตร ตามลำดับ ก็ยังมีขนาดที่ใหญ่กว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตของไม้สน นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์

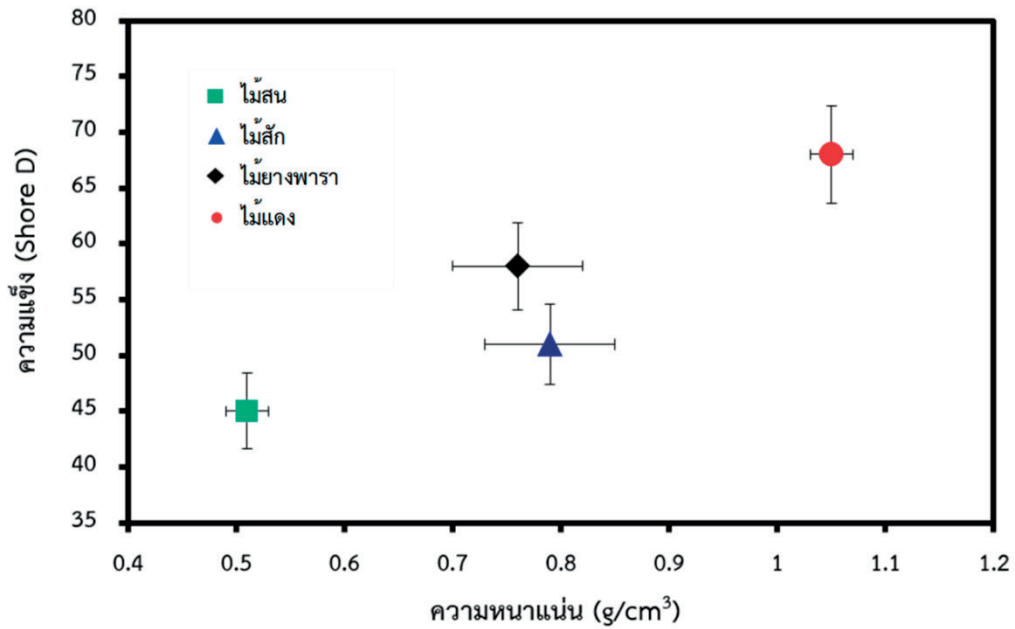
ท่อลำเลียงกับค่าความหนาแน่นของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ของไม้ทั้ง 4 ชนิด ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าความหนาแน่นของไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง คือ 0.76±0.06, 0.79±0.06 และ 1.05±0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ นั้นจะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ และมีค่าความหนาแน่นที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับไม้สน คือ 0.51±0.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตแต่เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ว่าการที่เซลล์ท่อลำเลียงของไม้มีแต่เพียงเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิต หรือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ท่อลำเลียงที่มีขนาดใกล้เคียงกันซึ่งถูกอธิบายด้วยการแจกแจงแบบปกตินั้นจะทำให้ความหนาแน่นมีค่าน้อย เนื่องจากไม่เกิดการเบียดตัวกันของเซลล์ท่อลำเลียง เทียบกันกับไม้ที่มีทั้งเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิต และเวสเซล ซึ่งมีท่อลำเลียงที่มีขนาดแตกต่างกัน อธิบายได้ว่าเป็นการแจกแจงแบบทวินามนั้นจะเกิดการเบียดกันของเซลล์ท่อลำเลียง ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของไม้ชนิดนั้นๆ มีค่าสูงขึ้น [24] และแม้ว่าตามมาตรฐาน วสท 1002-16, กส 0702/6679 และ มยผ. 1104-52 นั้นจะจำแนกประเภทของไม้อ้างอิงตามสมบัติเชิงกล ซึ่งไม้สนจะถูกจำแนกเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลาง แต่จากโครงสร้างระดับจุลภาคโดยเฉพาะการจัดเรียงตัวของเซลล์ท่อลำเลียงของไม้สน นักสรีรวิทยาของพืชจะจำแนกให้ไม้สนซึ่งประกอบไปด้วยเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทอร์คิตแต่เพียงอย่างเดียววนั้นเป็นไม้เนื้ออ่อน ในส่วนของไม้ยางพารา

ไม้สักและไม้แดงซึ่งประกอบด้วยเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคีดและเวสเซลล์จะถูกจำแนกให้เป็นไม้เนื้อแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนั้นแล้วการจำแนกไม่ว่าเป็นไม้เนื้อแข็งหรืออ่อนนั้นจึงอาจแตกต่างกันได้ตามปัจจัยที่ใช้ในการจำแนกชนิดไม่ว่าพิจารณาจากโครงสร้างระดับจุลภาคหรือสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับการใช้งานไม้เป็นโครงสร้างซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน วสท 1002-16, กส 0702/6679 และ มยพ. 1104-52 อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นและค่าโมดูลัสของการแตกหักของไม้แสดงแนวโน้มแปรผันตรงกับความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลล์ต่อพื้นที่ โดยไม้แดงจะมีค่าโมดูลัสของการแตกหักที่สูงที่สุด คือ 127.2 ± 31.7 เมกะพาสคาล รองลงมาเป็นไม้ยางพารา ไม้สักและไม้สน คือ 104.7 ± 11.5 , 73.1 ± 8.8 และ 64.4 ± 5.6 เมกะพาสคาล ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และตารางที่ 2 โดยความแตกต่างของโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้ นอกจากจะส่งผลต่อความหนาแน่นของไม้และค่าโมดูลัสของการแตกหักแล้ว ยังจะส่งผลต่อความแข็งแรงของไม้อีกด้วย ไม้แดงซึ่งมีความหนาแน่นสูงที่สุดจะมีความแข็งแรงมากที่สุด

คือ 68 ± 4.4 ชอร์ดี รองลงมาเป็นไม้ยางพารา ไม้สักและไม้สน คือ 58 ± 3.9 , 51 ± 3.6 และ 45 ± 3.4 ชอร์ดี ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนั้นความแข็งแรงของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดงยังแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตรงกับค่าโมดูลัสของการแตกหัก ดังแสดงในรูปที่ 4 แม้ว่าโดยปกติแล้วการทดสอบความแข็งแรงของไม้จะนิยมวัดในหน่วยของแจนกา (Janka) ซึ่งเป็นการวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการกดลูกบอลเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.28 มิลลิเมตร ลงในเนื้อไม้ให้ได้ครึ่งลูก ซึ่งแตกต่างจากการวัดความแข็งแรงในหน่วยของชอร์ดี ซึ่งจะสัมพันธ์กับระยะทางที่หัวเข็มจมเข้าไปในเนื้อไม้ อย่างไรก็ตามข้อมูลการเปรียบเทียบการทดลองค่าความแข็งแรงในหน่วยของแจนกา และชอร์ดี ในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงทั้งสองหน่วยการวัดนี้แปรผันตรงกัน โดยไม้แดงมีความแข็งแรงสูงสุด คือ 68 ± 4.4 ชอร์ดี และ 7.65 กิโลนิวตัน [25] ส่วนไม้สนที่มีค่าชอร์ดีต่ำที่สุดก็จะมีค่าความแข็งแรงแจนกา ที่ต่ำที่สุดเช่นกันคือ 45 ± 3.4 ชอร์ดี และ 1.9 กิโลนิวตัน [26]



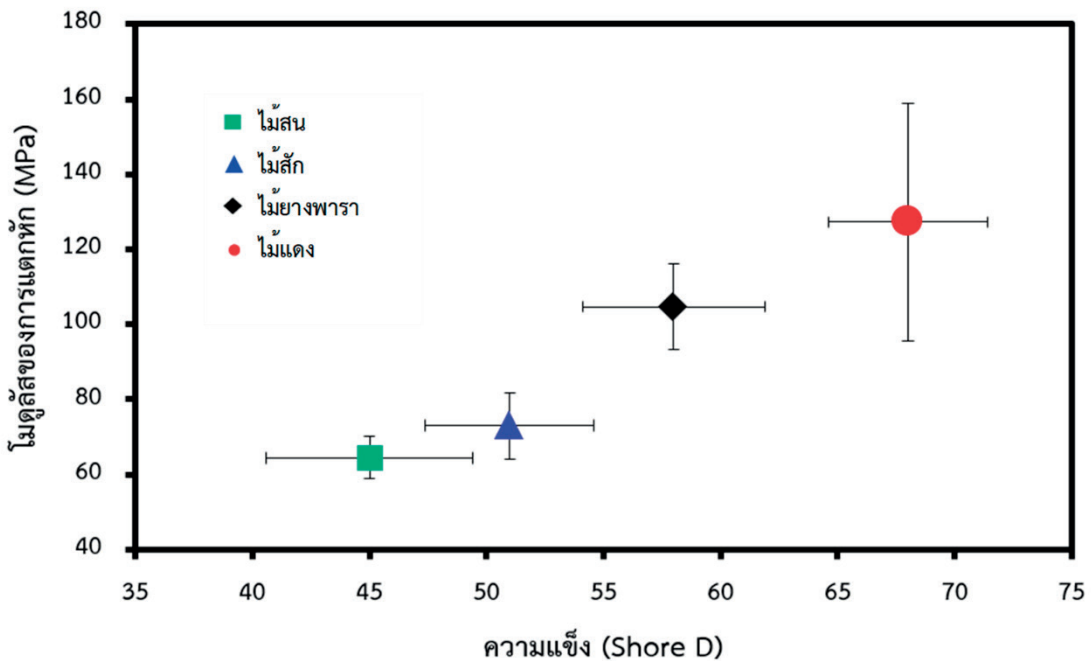
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของการแตกหักและความหนาแน่นของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและความหนาแน่นของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของความหนาแน่น ความแข็ง และค่าโมดูลัสของการแตกหักของ ไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา [18, 19, 25–28]

| ชนิดไม้ | ความหนาแน่น (g/cm ³) | ความแข็ง (ชอร์ดี) | ความแข็งแรงกาอ้างอิง (kN) | ค่าโมดูลัสของการแตกหัก (MPa) | ค่าโมดูลัสของการแตกหักอ้างอิง (MPa) |
|------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| ไม้สน | 0.51 ± 0.02 | 45 ± 3.4 | 1.9 ^[26] | 64.4 ± 5.6 | 58.6 ^[18] |
| ไม้ยางพารา | 0.76 ± 0.06 | 58 ± 3.9 | 4.8 ^[25] | 104.7 ± 11.5 | 103.0 ^[19] |
| ไม้สัก | 0.79 ± 0.06 | 51 ± 3.6 | 5.2 ^[25] | 73.1 ± 8.8 | 97.1 ^[27] |
| ไม้แดง | 1.05 ± 0.02 | 68 ± 4.4 | 7.65 ^[25] | 127.2 ± 31.7 | 134.8 ^[28] |



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสของการแตกหักและความแข็งของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สักและไม้แดง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม้ที่มีความหนาแน่น โดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่สูงที่สุดจะมีความหนาแน่น ความแข็งและค่าโมดูลัสของการแตกหักสูงสุด ซึ่งค่าโมดูลัสของการแตกหักจะสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็ง ดังนั้นแล้วโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้แต่ละชนิดจึงมีส่วนสำคัญในการกำหนดสมบัติเชิงกลของไม้ชนิดนั้นๆ เนื่องจากโครงสร้างเซลล์ระดับจุลภาค (Cellular microstructure) ของไม้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 บริเวณ ได้แก่ ไม้ต้นฤดู (Early wood) และไม้ปลายฤดู (Late wood) ดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) โดยโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้เนื้ออ่อนในบริเวณไม้ต้นฤดู จะประกอบด้วยเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตที่มีขนาดโดยเฉลี่ย 10 ถึง 40 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5 (ข) [12, 22, 29] แต่โครงสร้างระดับจุลภาคของไม้เนื้อแข็ง ในบริเวณไม้ต้นฤดูจะประกอบไปด้วยเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตและเวสเซล ดังแสดงในรูปที่ 5 (ค) โดยขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตจะใกล้เคียงกับในไม้เนื้ออ่อน แต่ขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่มากกว่า 40 ไมโครเมตร [30] สังเกตได้ว่าเนื้อไม้ในบริเวณปลายฤดูซึ่งเกิดขึ้นในช่วงฤดูแล้งของไม้ทั้งสองประเภทจะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของท่อลำเลียง

อย่างหนาแน่นและคล้ายคลึงกัน ซึ่งเป็นบริเวณที่เนื้อไม้มีความหนาแน่นและความแข็งสูง [24] แต่การเกิดขึ้นของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลของไม้เนื้อแข็งในบริเวณไม้ต้นฤดูช่วงฤดูฝน จะทำให้เซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรคิตในบริเวณโดยรอบเกิดการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยลดลงซึ่งเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลให้ไม้เนื้อแข็งมีสมบัติเชิงกลโดยเฉลี่ยที่สูงกว่าไม้เนื้ออ่อน [31] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าค่าความแข็งและค่าโมดูลัสของการแตกหักของไม้สักที่มีอายุมากจะมีค่ามากกว่าไม้สักสายพันธ์เดียวกันที่มีอายุน้อย เนื่องจากมีปริมาณและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลที่มากกว่า [22] อย่างไรก็ตามการจัดเรียงตัวของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลในไม้เนื้อแข็งจะมีความแตกต่างกัน โดยไม้อย่างพارانันจะกระจายตัวเป็นท่อเดี่ยว ซึ่งแตกต่างกับไม้สักและไม้แดงที่เซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม แม้ว่าไม้อย่างพาราจะมีความหนาแน่นโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลต่อพื้นที่ คือ 6 ± 1 ท่อต่อตารางมิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าในกรณีของไม้สักและไม้แดง คือ 10 ± 2 และ 15 ± 4 ท่อต่อตารางมิลลิเมตร แต่ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์ท่อลำเลียงแบบเวสเซลที่มี

ขนาดใหญ่ที่สุด คือ 94.1 ± 24 ไมโครเมตร ส่งผลให้เซลล์ทอลำเลียงแบบเทรคิตมีการเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ซึ่งอาจจะส่งผลให้ไม้ยางพาราามีค่าความแข็งที่สูงกว่าไม้สักซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์ทอลำเลียงแบบเวสเซลที่มีขนาดที่เล็กกว่า คือ 75.5 ไมโครเมตร ส่วนไม้สนที่มีโครงสร้างประกอบด้วยเซลล์ทอลำเลียงแบบเทรคิตแต่เพียงอย่างเดียวนั้น แม้ว่าจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเซลล์ทอลำเลียงแบบเทรคิตที่ใหญ่ที่สุด คือ 25.4 ไมโครเมตร แต่ความหนาแน่นของไม้สนมีค่าน้อยจึงมีค่าความแข็งและค่าโมดูลัสของการแตกหักน้อยที่สุดด้วยเมื่อเทียบกับไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดงซึ่งมี

ความหนาแน่นที่สูงกว่า เป็นที่เข้าใจได้ว่าการจัดเรียงตัวของเซลล์ทอลำเลียงของไม้นั้นนอกจากจะถูกควบคุมด้วยพันธุกรรมของไม้แต่ละชนิดเองแล้ว ยังจะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศอีกด้วย [11, 32 - 33] ดังนั้นสมบัติเชิงกลของไม้ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้จึงมีความแตกต่างกันตามไปด้วย [12, 22] เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มของค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress, σ_y) จากการลดลงของขนาดของเกรน (Grain, d) ในวัสดุที่มีหลายผลึก ยกตัวอย่างเช่น โลหะ โลหะผสม และ เซรามิก ซึ่งอธิบายได้ด้วย Hall-Petch relationship [34] ดังสมการที่ 1

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

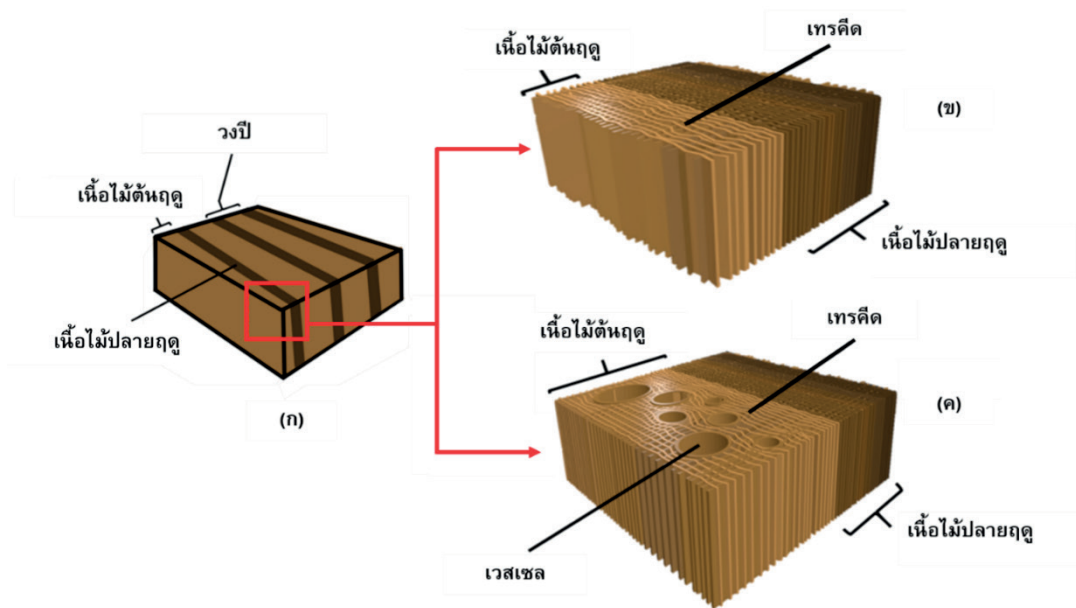
โดยที่ σ_0 และ k_y จะเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุซึ่งได้จากการทดลองและการประมาณค่าจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 1 ซึ่งการที่เกรนมีขนาดเล็ก (Grain refinement) จะส่งผลให้ปริมาณของขอบเกรนต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุมีค่าสูงขึ้น สามารถเปรียบเทียบได้กับไม้ที่อยู่ในประกอบด้วยเซลล์ทอลำเลียงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก โดยความหนาแน่นของเซลล์ทอลำเลียงต่อปริมาตรที่สูงนี้จะส่งผลให้ไม้มีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปและมีค่าความเค้นจุดครากที่สูงกว่าไม้ที่มีความหนาแน่นของเซลล์ทอลำเลียงต่อ

ปริมาตรที่ต่ำ [35-37] เนื่องจากสมบัติเชิงกลของไม้มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความหนาแน่นของไม้ ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ทอลำเลียงของไม้ก็ควรจะสัมพันธ์กับสมบัติเชิงกลของไม้ และมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ Hall-Petch relationship ในการอธิบายสมบัติเชิงกลของไม้เนื้ออ่อนได้ รวมถึงไม้ชนิดอื่นๆ ที่มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนของเซลล์แบบแบบสองทาง และในกรณีนี้ค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress, $\sigma_{y'}$) อาจจะสัมพันธ์กับขนาดของเกรน (d_1, d_2) ดังสมการที่ 2

$$\sigma_{y'} = \sigma_{0'} + \frac{k_{y1'}}{\sqrt{d_1}} + \frac{k_{y2'}}{\sqrt{d_2}} \quad (2)$$

โดยที่ $\sigma_{0'}$, $k_{y1'}$ และ $k_{y2'}$ จะเป็นค่าคงที่ซึ่งได้จากการทดลองและการประมาณค่าจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2 จากการตีความดังกล่าวนี้ นอกจากจะทำให้ความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของไม้ชัดเจนมากขึ้นแล้ว จะยังส่งผลให้มุมมองต่อการใช้งานไม้เปิดกว้างมากยิ่งขึ้น โดยอาจจะไม่ได้เป็นเพียงการใช้งานไม้ตามสภาพโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้ที่ได้จากธรรมชาติ แต่อาจจะรวมถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคของไม้เนื้ออ่อนให้มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงหรือเหนือกว่าไม้เนื้อแข็งมากได้ด้วย จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสของการแตกหักและ

ความแข็งของไม้ ดังแสดงในรูปที่ 4 นั้นทำให้พอที่จะอนุมานได้ว่าสมบัติเชิงกลของไม้นั้นสัมพันธ์กับความหนาแน่นของไม้ และเนื่องจากไม้มีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันในกรณีของไม้เนื้อแข็งปานกลาง คือ ไม้ยางพาราและไม้สัก และไม้เนื้อแข็ง คือ ไม้แดง ทำให้พอจะอนุมานต่อไปได้ว่าหากสามารถเพิ่มความหนาแน่นของไม้ยางพารา โดยการใช้กระบวนการทางความร้อนและเชิงกลได้แล้ว [38] ไม้ยางพาราก็อาจจะมีความแข็งแรงได้เทียบเท่าหรือดีกว่าไม้แดง นอกเหนือจากนั้นอาจจะยังสามารถควบคุมลักษณะเส้นลายและสีสนของเนื้อไม้เพื่อสุนทรียภาพของการใช้ที่หลากหลายได้อีกด้วย



รูปที่ 5 ลักษณะทั่วไปของไม้ซึ่งมีการเรียงสลับกันระหว่างเนื้อไม้ต้นฤดูและเนื้อไม้ปลายฤดู (ข) ไม้เนื้ออ่อนซึ่งมีแต่เซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรตีดและ (ค) ไม้เนื้อแข็งซึ่งมีทั้งเซลล์ท่อลำเลียงแบบเทรตีดและเวสเซล [24]

3. สรุปผลการทดลอง

จากความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างระดับจุลภาคและสมบัติเชิงกลของไม้สน ไม้ยางพารา ไม้สัก และไม้แดง แสดงให้เห็นว่าลักษณะการจัดเรียงตัวของเซลล์ท่อลำเลียงของไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าโมดูลัสของการแตกหักและความแข็งแรงของไม้ โดยลักษณะการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ท่อลำเลียงของไม้และความหนาแน่นจะสัมพันธ์กับชนิดของไม้ ซึ่งไม้ที่มีความหนาแน่นสูงก็จะมีค่าโมดูลัสของการแตกหักและความแข็งแรงของไม้สูงตามไปด้วย ซึ่งแม้ว่าจะสอดคล้องกับการจัดประเภทของไม้ตามมาตรฐาน วสท 1002-16 ของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยใน พ.ศ. 2517 ข้อกำหนดเกี่ยวกับไม้ที่ใช้ในการก่อสร้างของกรมป่าไม้ กส 0702/6679 ใน พ.ศ. 2517 และ มาตรฐานกรมโยธาธิการและผังเมืองสำหรับไม้แปรรูปสำหรับงานก่อสร้างเป็นมาตรฐานงานไม้ มยพ. 1104-52 ใน พ.ศ. 2552 แต่ก็แสดงให้เห็นว่าหากในอนาคต การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของไม้สามารถทำได้ด้วยกระบวนการทางความร้อนและเชิงกลแล้ว ชนิดของพันธุ์ไม้อาจจะไม่ได้เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการกำหนดสมบัติเชิงกลของไม้

4. กิตติกรรมประกาศ

สุทัศน์ รัตนพันธ์ ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับการสอนวิชาวัสดุวิศวกรรม (MEN 111 Engineering Materials) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยมาร่วมถึงขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งโครงการทุนจ้างงานที่สนับสนุนทุนการศึกษาของนักศึกษา ขอขอบคุณนางสาวเมธิตา อ่อนศรี จากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สำหรับรูปจำลองไม้ ท้ายสุดขอขอบคุณบริษัท บำรุงไทยเคหะภัณฑ์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อชิ้นงานไม้ในการทดลอง

5. เอกสารอ้างอิง

1. Royal Forest Department, 2017, Forestry Statistic Data 2017, [Online], Available: <http://forestinfo.forest.go.th/Content/file/stat2560/Binder1.pdf>. (In Thai)
2. Royal Forest Department, 2018, Forestry Statistic Data 2018 [Online], Available: <http://forestinfo>.

- forest.go.th/Content/file/stat2561/Binder1.pdf. (In Thai)
3. The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage (EIT), 1974, E.I.T. Standard 1002-16, Pow Voon Printing Limited Partnership. (In Thai)
 4. Forest Research and Development Office, 2005, The Thai Hardwoods [Online], Available: <http://forprod.forest.go.th/forprod/techtransfer/document/คลังความรู้/4.%20การใช้ประโยชน์ไม้และผลิตผลจากป่า/อุตสาหกรรมไม้/3.การตรวจพิสูจน์/1.ไม้เนื้อแข็งของประเทศไทย.pdf> (In Thai).
 5. Department of Public Works and Town & Country Planning, 2009, DPT 1104: Wood Standard, Department of Public Works and Town & Country Planning. (In Thai)
 6. Department of Public Works and Town & Country Planning, 2008, DPT 1224: Wood Testing Standard, Department of Public Works and Town & Country Planning. (In Thai)
 7. ASTM, 2009, ASTM D143-09: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
 8. Sanio, C., 1863, "Vergleichende Untersuchungen über die Zusammensetzung des Holzkörpers," *Bot Zeit*, 21, pp. 357.
 9. Ansell, M.P., 2015, Wood Composites, Woodhead Publishing, pp. 3-26.
 10. Vassão, D.G., Kim, W.K., Davin, L.B. and Lewis, N.G., 2010, Comprehensive Natural Products II, Oxford, Elsevier, pp. 815–928.
 11. Anwar, Z., Gulfraz, M. and Irshad, M., 2014, "Agro-Industrial Lignocellulosic Biomass a Key to Unlock The Future Bio-Energy: A Brief Review," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7 (2), pp. 163–173.
 12. Hori, R., Müller, M., Watanabe, U., Lichtenegger, H.C., Fratzl, P. and Sugiyama, J., 2002, "The Importance of Seasonal Differences in The Cellulose Microfibril Angle in Softwoods in Determining Acoustic Properties," *Journal of Materials Science*, 37 (20), pp. 4279–4284.
 13. Chamnankit, K., Laemsak, N. and Hanvongjirawat, W., 2019, "Investigation of Properties and Dimensional Stability of Thinned Teak (*Tectona grandis*)," *Thai Journal of Forestry (Thailand)*, 38 (2), pp. 166–81.
 14. Hanvongjirawat, W., 2016, "Physical and Mechanical Properties of Eucalyptus urophylla Clone K58," *Thai Journal of Forestry (Thailand)*, 35 (3), pp. 128–35.
 15. Phumichai, T., Sungsing, K., Riyapan, J. and Phumichai, C., 2015, "Chemical and Mechanical Properties in *Hevea brasiliensis*," *Thai Agricultural Research Journal*, 33, pp. 144–58.
 16. Le Moigne, N., Van Den Oever, M. and Budtova, T., 2011, "A Statistical Analysis of Fibre Size and Shape Distribution after Compounding in Composites Reinforced by Natural Fibres," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (10), pp. 1542-1550.
 17. Salleo, S., Gullo, M.L. and Siracusano, L., 1984, "Distribution of Vessel Ends in Stems of Some Diffuse-and Ring-porous Trees: The Nodal Regions as 'Safety Zones' of The Water Conducting System," *Annals of Botany*, 54 (4), pp. 543-552.
 18. Mederski, P., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Giefing, D., Sulima-Olejniczak, E., Rosinska, M. and Agnieszka, L., 2015, "Density and Mechanical Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Wood from a Seedling Seed Orchard," *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 58 (195), pp. 117-124.
 19. Riyaphan, J., Phumichai, T., Neimsuwan, T., Witayakran, S., Sungsing, K., Kaveeta, R. and Phumichai, C., 2015, "Variability in Chemical and Mechanical

Properties of Pará Rubber (*Hevea brasiliensis*) Trees,” *Scienceasia*, 41 (4), pp. 251-258.

20. Rujinirun, C., Phinyocheep, P., Prachyabrued, W. and Laemsak, N., 2005, “Chemical Treatment of Wood for Musical Instruments. Part I: Acoustically Important Properties of Wood for The Ranad (Thai Traditional Xylophone),” *Wood Science and Technology*, 39 (1), pp. 77-85.

21. Ishida, A., Harayama, H., Yazaki, K., Ladpala, P., Sasrisang, A., Kaewpakasit, K., Panuthai, S., Staporn, D., Maeda, T., Gamo, M., Diloksumpun, S., Puangchit, L. and Ishizuka, M., 2010, “Seasonal Variations of Gas Exchange and Water Relations in Deciduous and Evergreen Trees in Monsoonal Dry Forests of Thailand,” *Tree Physiology*, 30 (8), pp. 935-945.

22. Rizanti, D.E., Darmawan, W., George, B., Merlin, A., Dumarcay, S., Chapuis, H., Gerardin, C., Gelhay, E., Raharivelomanana, P., Kartika, S.R., Syafii, W., Mohamed, R. and Gerardin, P., 2018, “Comparison of Teak Wood Properties According to Forest Management: Short Versus Long Rotation,” *Annals of Forest Science*, 75 (39), pp. 1-12.

23. Déjardin, A., Laurans, F., Arnaud, D., Breton, C., Pilate, G. and Leplé, J. C., 2010, “Wood Formation in Angiosperms,” *Comptes Rendus Biologies*, 333 (4), pp. 325-334.

24. Cuny, H.E., Rathgeber, C.B.K., Frank, D., Fonti, P. and Fournier, M., 2014 “Kinetics of Tracheid Development Explain Conifer Tree-Ring Structure,” *New Phytologist*, 203 (4), pp. 1231-1241.

25. Jamil, A.W.M., 2016, Janka Hardness Rating of Malaysian Timbers, *Timber Technology Bulletin*, 58, pp. 1-8.

26. Green, D.W., Beigel, M. and Nelson, W., 2006, Janka Hardness using Nonstandard Specimen, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Product Laboratory, pp. 1-10.

27. Green, D.W., Winandy, J.E. and Kretschmann, D.E., 1999, *Mechanical Properties of Wood: Wood Handbook: Wood Engineering Material*, Madison, Forest Production Laboratory, General Technical Report FPL, pp. 41-45.

28. Josue, J., 2004, “Some Wood Properties of *Xylia xylocarpa* Planted in Sabah,” *Materials Science*, 1, pp. 1-15.

29. Borchert, R. and Pockman, W.T., 2005, “Water Storage Capacitance and Xylem Tension in Isolated Branches of Temperate and Tropical Trees,” *Tree Physiology*, 25 (4), pp. 457-466.

30. Naji, H.R., Sahri, M.H., Nobuchi, T. and Bakar, E.S., 2013, “Radial Variation of Wood Cell Features under Different Stocking Densities Management of Two New Clones of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*),” *Journal of Wood Science*, 59 (6), pp. 460-468.

31. Hossain, M.B. and Awal, A.S.M., 2012, “Mechanical Properties and Durability of Some Selected Timber Species,” *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 24 (1), pp. 67-84.

32. Bhat, K.M. and Priya, P.B., 2004, “Influence of Provenance Variation on Wood Properties of Teak from The Western Ghat Region in India,” *International Association of Wood Anatomists*, 25 (3), pp. 273-282.

33. Liew, W.Y.H., Yeo, K.B. and Ismail, M.A., 2011, “Fracture Behaviour of Tropical Hardwood Under Tensile Load,” *International Journal on Advanced Science, Engineering, and Information Technology*, 1 (5), pp. 560-563.

34. Hayes, J.S., Keyte, R. and Prangnell, P.B., 2000, “Effect of Grain Size on Tensile Behaviour of A Sub-micron Grained Al-3 wt-% Mg Alloy Produced by Severe Deformation,” *Materials Science and Technology*, 16 (11), pp. 1259-1263.

35. Cheng, G.M., Jian, W.W., Xu, W.Z., Yuan, H., Millet, P.C. and Zhu, Y.T., 2013, “Grain Size Effect on

- Deformation Mechanisms of Nanocrystalline BCC Metals," *Materials Research Letters*, 1 (1), pp. 26–31.
36. Molotnikov, A., Lapovok, R., Davies, C.H.J., Cao, W. and Estrin, Y., 2008, "Size Effect on The Tensile Strength of Fine-Grained Copper," *Scripta Materialia*, 59 (11), pp. 1182–1185.
37. Miyoshi, Y., Kojiro, K. and Furuta, Y., 2018, "Effects of Density and Anatomical Feature on Mechanical Properties of Various Wood Species in Lateral Tension," *Journal of Wood Science*, 64 (5), pp. 509-514.
38. Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., Li, Y., Kuang, Y., Li, Y., Quispe, N., Yao, Y., Gong, A., Leiste, U.H., Bruck, H.A., Zhu, J.Y., Vellore, A., Li, H., Minus, M.L., Jia, Z., Martini, A. and Li, T., 2018, "Processing Bulk Natural Wood into A High-Performance Structural Material," *Nature*, 554 (7691), pp. 224–228.