วารสารวิจัยนิเวศวิทยาป่าไม้เมืองไทย 9(1): 1- 18 (2568)

นิพนธ์ต้นฉบับ

การใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในการประมาณปริมาตรไม้สักที่เป็นสินค้าได้: กรณีศึกษาสวนป่าแม่จาง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

วัชรินทร์ สังข์สิงห์[1], ลัดดาวรรณ เหรียญตระกูล[1*], ชาคริต ณ ตะกั่วทุ่ง[1], จิรวัฒน์ ยิ่งดี[1] และสิทธิชัย สงบุตร[1]

รับต้นฉบับ: 17 มกราคม 2568 ฉบับแก้ไข: 26 มีนาคม 2568 รับลงพิมพ์: 29 มีนาคม 2568

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: ไม้สัก (*Tectona grandis*) ถือเป็นหนึ่งในไม้เศรษฐกิจที่มีคุณค่ามากของประเทศไทย มีคุณสมบัติที่โดดเด่น ทั้งด้านความทนทาน เนื้อไม้สวยงาม และต้านทานต่อโรคและแมลง ไม้สักจึงเป็นที่นิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ ความสามารถในการประเมินปริมาตรไม้สักที่เป็นสินค้าได้อย่างแม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการจัดการป่าไม้และอุตสาหกรรมไม้ เนื่องจากช่วยให้สามารถคาดการณ์มูลค่าทางเศรษฐกิจได้อย่างถูกต้องและลดการสูญเสียทรัพยากรที่เกิดจากการใช้วิธีการล้มไม้แบบดั้งเดิม ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตรวจแสงและวัดระยะมาใช้ในการเก็บข้อมูลทรัพยากรป่าไม้ซึ่งมีความถูกต้องสูง เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner: TLS) ถือเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการทำแบบจำลองสามมิติในพื้นที่ขนาดเล็ก ให้ความละเอียดสูง และไม่ทำลายต้นไม้ให้เกิดความเสียหาย เพราะเก็บข้อมูลโดยไม่ต้องสัมผัสวัตถุ การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ในการสร้างแบบจำลองสามมิติต้นไม้เพื่อนำมาคำนวณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยเปรียบเทียบกับวิธีการล้มไม้แบบวิธีดั้งเดิมที่แม่นยำที่สุด นอกจากนี้ยังสร้างสมการและตารางเพื่อประเมินปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ สำหรับสนับสนุนการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืนและการประเมินมูลค่าไม้สักในอุตสาหกรรม

วิธีการ: วางแปลงตัวอย่างเก็บข้อมูลภาคสนามโดยใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ ขนาด 40 x 40 เมตร จำนวน 12 แปลง ในพื้นที่สวนป่าแม่จาง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยแบ่งแปลงตัวอย่างเป็น 2 ช่วงอายุ คือ แปลงอายุ 18 ปี (แปลงปี 2549) และแปลงอายุ 39 ปี (แปลงปี 2528) ช่วงอายุละ 6 แปลง จากนั้นรวบรวมข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน รุ่น Faro Focus S150 เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติของต้นไม้แต่ละต้นในแปลงตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ด้วยวิธี Stem Curve และ Quantitative Structure Models (QSM) ผ่านซอฟต์แวร์ 3D Forest เพื่อสร้างเป็นสมการและตารางประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สัก ทำการทดสอบความแม่นยำของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ โดยโค่นล้มต้นไม้ตัวอย่างบางส่วนเพื่อนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของไม้ และคำนวณปริมาตรไม้โดยใช้สูตร Huber's formula และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบความแตกต่างระหว่าง

ปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักแต่ละวิธี (t-test) และทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดกำลังสอง (RMSE)

ผลการศึกษา: พบว่าแบบจำลองสามมิติของไม้สักที่สร้างขึ้นจากข้อมูลที่เก็บรวบรวมด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินคำนวณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้โดยวิธี Stem Curve และ QSM ในซอฟต์แวร์ 3D Forest มีความใกล้เคียงกับค่าปริมาตรที่ได้จากการล้มไม้ อย่างไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าความคลาดเคลื่อนจากปริมาตรที่ได้จากการล้มไม้อยู่ที่ 0.02 และ 0.03 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ สมการประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สักที่สร้างขึ้น สามารถพัฒนาสมการที่เหมาะสมได้เป็น 2 รูปแบบ โดยรูปแบบแรกใช้ตัวแปรเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกอย่างเดียว สมการคือ $V = 0.0001DBH^{2.5478}$ ($R^2 = 0.966$) ส่วนรูปแบบที่สองใช้ตัวแปรสองตัว คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงที่เป็นสินค้าได้ สมการคือ $V = 0.0002DBH^{1.8795}H_M^{0.6235}$ ($R^2 = 0.988$) เมื่อทดสอบสมการด้วยข้อมูลไม้สักจากการล้มไม้ พบว่าค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) ของทั้งสองสมการอยู่ที่ 17.81% และ 11.01% ตามลำดับ อยู่ในเกณฑ์ความถูกต้องสูง เมื่อนำสมการที่เหมาะสมสร้างเป็นตารางปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของสักช่วยให้สามารถประมาณปริมาตรไม้ได้ง่ายขึ้นซึ่งไม่จำเป็นต้องล้มต้นไม้ โดยใช้ตัวแปรสองค่าคือค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงที่เป็นสินค้าได้ในช่วงต่าง ๆ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในพื้นที่ศึกษาหรือพื้นที่ที่มีลักษณะใกล้เคียง

สรุป: การประมาณปริมาตรไม้สักที่เป็นสินค้าได้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถใช้แทนวิธีการล้มไม้เพื่อคำนวณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบบจำลองสามมิติของไม้สักที่สร้างขึ้นด้วยข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน สามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ด้วยวิธี Stem Curve และ QSM ในซอฟต์แวร์ 3D Forest ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าปริมาตรที่ได้จากการล้มไม้ และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการเก็บข้อมูลปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้อย่างแม่นยำโดยไม่ทำลายต้นไม้ มีส่วนช่วยสนับสนุนการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืน ลดการสูญเสียทรัพยากร และเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของไม้ได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้, ระบบตรวจจับแสงและวัดระยะ, เส้นโค้งแสดงความโตของลำต้นตามระดับความสูง, สวนป่าสัก

---

[1] ภาควิชาวิศวกรรมป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

[*] **ผู้รับผิดชอบบทความ**: E-mail: fforlwr@ku.ac.th

https://doi.org/10.34044/tferj.2025.9.1.6085

วารสารวิจัยนิเวศวิทยาป่าไม้เมืองไทย 9(1): 1- 18 (2568)

ORIGINAL ARTICLE

Utilizing Terrestrial Laser Scanning for Estimating Commercial Teak Volume: A Case Study of Mae Chang Forest Plantation, Mae Mo District, Lampang Province

Watcharin Sangsing[1], Laddawan Rianthakool[1*], Chakrit Na Takuathung[1], Jirawat Yingdee[1], and Sitthichai Songbut[1]

Received: 17 January 2025 Revised: 26 March 2025 Accepted: 29 March 2025

ABSTRACT

Background and Objectives: Teak (*Tectona grandis*) is one of Thailand's most valuable economic tree species, prized for its exceptional qualities such as durability, aesthetic appeal, and resistance to pests and diseases. Its popularity spans both domestic and international markets, making accurate estimation of merchantable teak volume essential for forest management and the timber industry. Precise volume estimation facilitates accurate economic valuation and minimizes resource losses associated with traditional destructive tree-felling methods. Recent advancements in technology, light detection and ranging or LiDAR, have provided opportunities to enhance the accuracy and efficiency of forest resource data collection. Among these tools, the Terrestrial Laser Scanner (TLS) stands out for its ability to generate high-resolution three-dimensional (3D) models of individual trees and forest stands in a non-destructive method. Unlike traditional methods, TLS enables data collection without damaging trees, offering a sustainable and efficient alternative for forestry applications. This study aimed to develop a methodology for utilizing TLS to construct 3D models of teak trees to estimate merchantable wood volume. The results were compared with the traditional felling method, which is considered the most accurate but destructive. In addition, the study attempts to establish predictive equations and volume tables for estimating merchantable teak volume. These outputs aimed to support sustainable forest management practices, reduce resource wastes, and facilitate the economic valuations of teak for the timber industry.

Methods: The study was conducted in the Mae Chang forest plantation, located in Mae Mo district, Lampang province, Thailand. The stratified random sampling was employed to establish 12 sample plots, each sizing 40 m × 40 m. The plots were divided into two age groups based on plantation year: 18 years old (planted in 2006) and 39 years old (planted in 1985), with six plots in each group. Data collection involved using a Faro Focus S150 TLS to scan individual trees in each plot. The TLS data were processed to create detailed 3D tree models for further analysis. Merchantable timber volume was calculated using two methods: the stem curve method and quantitative structure models (QSM), both implemented through the 3D forest software. The TLS-derived volume estimates

were validated by felling selected sample trees. The diameters and merchantable lengths of these felled trees were measured, and their volumes were calculated using Huber's formula. Statistical analysis was performed to compare TLS-derived volumes with traditional felling-based volumes using paired t-tests. The accuracy of TLS-derived estimates was evaluated using root mean square error (RMSE). Additionally, predictive equations for merchantable volume estimation were developed using regression analysis. Two types of equations were created: one using diameter at breast height (DBH) as the sole variable and the other incorporating both DBH and merchantable height (H_M). A volume table was constructed based on these equations, enabling non-destructive volume estimation for teak trees of varying DBH and H_M ranges.

Results: The 3D models generated using TLS provided merchantable volume estimates that closely aligned with volumes derived from felled trees. Statistical analysis revealed no significant differences between TLS-derived volumes and traditional felling-based volumes ($p > 0.05$). The RMSE values for TLS-derived estimates were 0.02 and 0.03 cubic meters when using the stem curve and QSM methods, respectively, indicating high accuracy. Two predictive equations for merchantable volume estimation were developed. The first equation utilized DBH as a single predictor variable and demonstrated a coefficient of determination (R^2) of 0.966. The second equation incorporated both DBH and H_M, achieving a higher R^2 value of 0.988. Validation of these equations using data from felled trees showed mean absolute percentage errors (MAPE) of 17.81% and 11.01%, respectively, confirming their suitability for practical applications. The most accurate equation was subsequently used to construct a merchantable volume table, which estimating based on DBH and H_M ranges without requiring tree felling. This table provides a practical tool for forest managers and timber industry stakeholders to assess teak volume efficiently and sustainably.

Conclusion: The results of this study demonstrate that TLS is a reliable and effective tool for non-destructive estimation of merchantable teak volume. The 3D models generated using TLS data enable precise volume estimation through methods such as stem curve and QSM, producing results that are statistically comparable to traditional destructive felling methods. The acceptable error margins and high accuracy of TLS-derived estimates highlight its potential as a sustainable alternative to conventional volume estimation techniques. By minimizing the need for destructive sampling, TLS-based methods contribute to sustainable forest management practices, preserving valuable tree resources while maintaining economic productivity. Furthermore, the development of predictive equations and merchantable volume tables offers practical solutions for forest managers and timber industry professionals, streamlining the assessment of merchantable volume and economic valuation. Overall, this study underscores the importance of integrating advanced technologies such as TLS into forestry practices. By

improving the accuracy and sustainability of resource assessments, these innovations can support long-term forest conservation and enhance the economic potential of Thailand's teak plantations.

Keywords: LiDAR, merchantable volume, stem curve, Teak plantation

---

[1] Department of Forest Engineering, Faculty of Forestry, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

[*] **Corresponding author**. E-mail: fforlwr@ku.ac.th

https://doi.org/10.34044/tferj.2025.9.1.6085

คำนำ

ไม้สัก (*Tectona grandis*) เป็นชนิดไม้ป่าเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเนื้อไม้มีคุณภาพดี สวยงาม ทนทานต่อโรคและแมลง จึงนิยมนำมาปลูกสร้างเป็นสวนป่าไม้สัก โดยการปลูกสวนป่าสักในประเทศไทย ส่วนมากดำเนินการโดยหน่วยงานภาครัฐ คือ กรมป่าไม้ และองค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ มีวัตถุประสงค์เพื่อปลูกทดแทนพื้นที่ป่าสัมปทานและฟื้นฟูสภาพป่าที่ถูกทำลาย นอกจากนี้องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ยังมีวัตถุประสงค์ของการปลูกสร้างสวนป่าสักเพื่อเป็นแหล่งวัตถุดิบไม้ในภาคอุตสาหกรรมและเพื่อผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ (Royal Forest Department, 2013) ซึ่งในปัจจุบันไม้สักมีผู้สนใจนำไปปลูกกันมากในทุกภูมิภาคของประเทศ โดยก่อนการทำไม้จะมีการประเมินปริมาตรไม้ที่จะทำเป็นสินค้า เพื่อคำนวณมูลค่าไม้ที่จะทำการขาย การประเมินปริมาตรไม้ในส่วนที่ทำเป็นสินค้าได้ จึงมีความสำคัญต่อเจ้าของสวนป่า เพราะจะทำให้สามารถประมาณผลตอบแทนทางการเงินได้อย่างถูกต้องและค่อนข้างแม่นยำ โดยการประเมินปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ในปัจจุบันยังใช้วิธีการตัดล้มต้นไม้เพื่อคำนวณปริมาตรไม้ที่ถูกต้องที่สุดหรือสร้างเป็นสมการในการประเมินปริมาตรไม้ (Buranachan, 2022; Himmapan, 2024) ซึ่งวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องตัดล้มต้นไม้ตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ส่งผลให้ต้นไม้ที่ตัดล้มแล้วนั้นมีราคาในการซื้อขายลดลงหรือไม่สามารถทำการซื้อขายได้ การประเมินปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้โดยที่ไม่ต้องทำการตัดล้มต้นไม้นั้น จึงเป็นแนวทางที่มีประโยชน์สำหรับเจ้าของสวนป่า

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีตรวจจับแสงและวัดระยะหรือไลดาร์ (Light Detection and Ranging: LiDAR) มาใช้ในการรวบรวมข้อมูลทรัพยากรป่าไม้ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ซึ่งหนึ่งในเครื่องมือที่ใช้ระบบนี้ก็คือเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner: TLS) เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพในการทำแบบจำลองสามมิติในพื้นที่ขนาดเล็ก ให้ความละเอียดสูง และไม่ทำลายต้นไม้ให้เกิดความเสียหาย เป็นการเก็บข้อมูลโดยไม่สัมผัสวัตถุ (Hackenberg *et al.*, 2015; Bornand *et al.*, 2022) เหมาะสำหรับใช้สร้างแบบจำลองของต้นไม้ (Rianthakool *et al*., 2024) ซึ่งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถรวบรวมข้อมูลที่มีความละเอียดสูงเพื่ออธิบายลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ในระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ระดับกิ่งก้านไปจนถึงระดับเรือนยอด (Liang *et al*., 2016) เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินถูกนำมาใช้ในการรวบรวมคุณสมบัติพื้นฐานของต้นไม้ที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูง เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at breast height: DBH) ความสูงของต้นไม้ (Krooks *et al*., 2014; Liu *et al*., 2018) ทั้งนี้ยังสามารถนำแบบจำลองต้นไม้สามมิติมาใช้สำหรับการประมาณค่าปริมาตรไม้หรือมวลชีวภาพได้อีกด้วย (An & Froese, 2022) การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เครื่อง

สแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินมาใช้ในการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้เพื่อทดสอบความถูกต้องในการประมาณค่า และสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ ในพื้นที่สวนป่าแม่จาง องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ จังหวัดลำปาง เนื่องจากเป็นสวนป่าที่มีแปลงปลูกไม้สักที่มีการจัดการอย่างเป็นระบบและยั่งยืนตามนโยบายขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (Forest Industry Organization, 2021)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน Faro Focus รุ่น S150 มีคุณสมบัติดังแสดงใน Table 1

Table 1 Faro S150 specifications

Specifications	Faro S150
Laser class	Laser class 1
Range	0.6-150 m
Range finder	Phase shift measurement
Field of view	360° × 300°
Range accuracy	±1 mm
3D Position accuracy	2 mm @10m
Scanning speed	976 KPts/s
Beam divergence	0.3 mrad
Weight	4.2 kg

2. เป้าอ้างอิงแบบทรงกลม (Spheres) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร และเทปวัดขนาดความโต

3. เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมซอฟต์แวร์ Faro Scene 6 และ 3D Forest

พื้นที่ศึกษา

ทำการศึกษาในพื้นที่สวนป่าแม่จาง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ลักษณะพื้นที่เป็นที่ราบเชิงเขา สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลาง 300 - 425 เมตร มีความลาดชันพื้นที่ 15 - 30 เปอร์เซ็นต์ (Figure 1) มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 90.8 มิลลิเมตรต่อปี และมีอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนสูงสุดและต่ำสุด 33.20 และ 23.70 °C ตามลำดับ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. วางแปลงตัวอย่างสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนามด้วยเทคนิคการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified random sampling) โดยใช้ชั้นอายุของไม้สักเป็นเกณฑ์ในการจำแนกชั้นภูมิ การสำรวจใช้แปลงตัวอย่างรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 40 x 40 เมตร จำนวน 12 แปลง โดยแบ่งแปลงตัวอย่างออกเป็น 2 ชั้นอายุ ได้แก่ แปลงที่มีอายุ 18 ปี จำนวน 6 แปลง และแปลงที่มีอายุ 39 ปี จำนวน 6 แปลง เพื่อให้ครอบคลุมทุกขนาดความโตของไม้สัก

2. รวบรวมข้อมูลภาคสนามด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ดังนี้

2.1 สำรวจพื้นที่ปฏิบัติงานเพื่อออกแบบและกำหนดตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินพร้อมกับตำแหน่งการวางเป้าอ้างอิง (Reference targets) พิจารณาจากปัจจัยพื้นฐาน คือ

สภาพพื้นที่ สภาพอากาศ ปริมาณแสง รายละเอียดและตำแหน่งของต้นไม้ที่ต้องการในแปลงตัวอย่าง โดยให้มีจุดตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินน้อยที่สุดและสามารถเก็บต้นไม้ในแปลงตัวอย่างได้ครบทุกต้น (Figure 2)

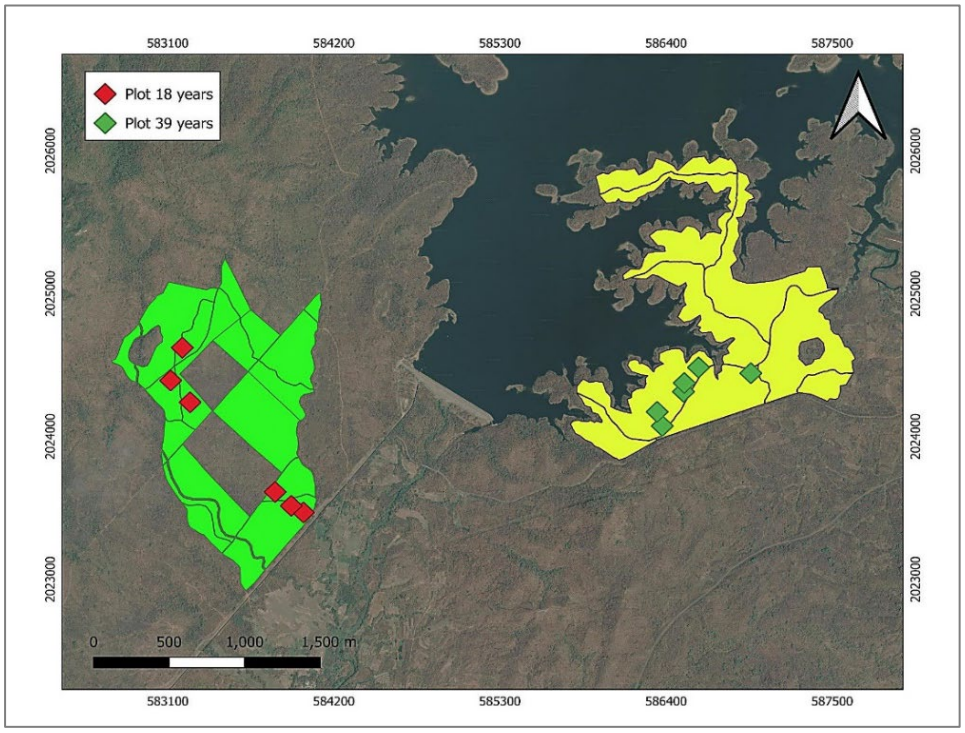

Figure 1 Study site at Mae Chang forest plantation, Mae Mo district, Lampang province.

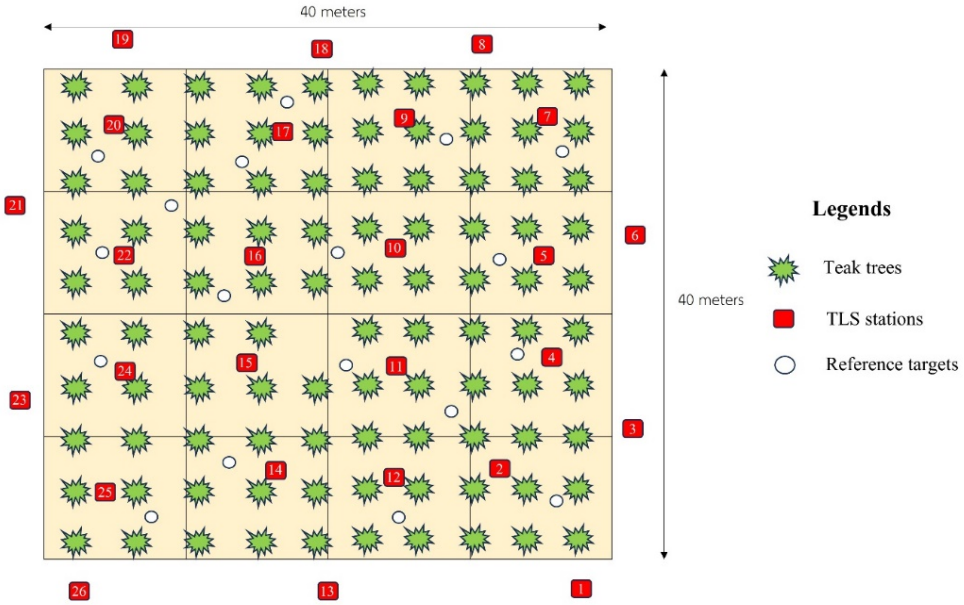

Figure 2 Data collection plan

2.2 เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินและเป้าอ้างอิงทรงกลมตามที่วางแผนไว้ด้วยวิธีการสแกนแบบวงรอบเปิด (Open traverse strategies) (FARO Technologies Inc, 2019) มีการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินจำนวน 26 ครั้งต่อแปลงตัวอย่าง โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ดังนี้ ค่าความละเอียด (Resolution) เท่ากับ 1/4 ค่าคุณภาพ (Quality) เท่ากับ 3x และเปิดการสแกนภาพสี (Scan with color: open) ตั้งค่าการรับแสงเป็นแบบ Horizon weighted metering และเปิดใช้งานโหมดการสแกนแบบรวดเร็ว (Speed mode: open) ใช้เวลาเฉลี่ย 6 นาทีต่อการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน 1 ครั้ง จะได้ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติ (Point cloud) ที่มีความละเอียด 6.1 มิลลิเมตร ที่ระยะ 10 เมตร จากตำแหน่งตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

2.3 เก็บข้อมูลด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินจนครบทั้ง 12 แปลงตัวอย่าง

3. รวบรวมข้อมูลต้นไม้ตัวอย่างสำหรับทดสอบความถูกต้อง โดยวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นสัก ในแปลงตัวอย่างที่มีขนาดตั้งแต่ 10 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นขนาดต่ำสุดที่มีการซื้อขายในปัจจุบัน (Forest Industry Organizations, 2019) จากนั้นแบ่งอันตรภาคชั้นต้นสักในแปลงตัวอย่างเป็น 5 ชั้น กระจายตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และสุ่มเลือกต้นสักในแต่ละชั้น จำนวนชั้นละ 6 ต้น (รวม 30 ต้น) เพื่อใช้ในการสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Table 2)

Table 2 Number of trees and sample trees used for equation construction in each diameter class.

No.	Diameter (cm)	Number of trees		Sample trees for constructing merchantable volume equations
		Stand 1985	Stand 2006	
1	10.010 - 14.428	77	138	6
2	14.428 - 18.846	101	95	6
3	18.846 - 23.264	70	62	6
4	23.264 - 27.682	20	14	6
5	27.682 - 32.100	10	2	6
Total		278	311	30

จากนั้นสุ่มล้มต้นสักนอกเหนือจากต้นที่ใช้ในการสร้างสมการภายในแปลงตัวอย่าง เพื่อใช้ทดสอบความถูกต้องการประมาณปริมาตรไม้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน จำนวน 24 ต้น โดยตัดโค่นต้นสักตัวอย่างให้ใกล้ระดับชิดดินมากที่สุด และวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต้นที่ระดับชิดดิน

และทุก ๆ 2 เมตรจนถึงปลายท่อนที่มีความโตเท่ากับ 10 เซนติเมตร คำนวณเป็นปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ (Merchantable volume) โดยใช้สูตรคำนวณปริมาตรไม้ท่อนของ Huber's formula (Husch *et al*.,1982) ดังสมการที่ 1

$$V = B_{1/2} \times L \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรไม้ (ลูกบาศก์เมตร)

$B_{1/2}$ คือ พื้นที่หน้าตัด ณ จุดกึ่งกลางของไม้ท่อน (ตารางเมตร)

L คือ ความยาวของไม้ท่อน (เมตร)

การประมวลผลข้อมูล

1. ประมวลผลข้อมูลจุดพิกัดสามมิติด้วยซอฟต์แวร์ Faro Scene ที่ได้จากการตั้งเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในแต่ละครั้งรวบรวมให้เป็นจุดข้อมูลพิกัดสามมิติเชิงเดี่ยว (Single point cloud) โดยใช้เป้าอ้างอิงในการจับคู่ข้อมูลจุดพิกัดสามมิติ (Registration) และสร้างออกมาเป็นแบบจำลองพื้นที่แปลงตัวอย่าง จากนั้นกำหนดขอบเขตข้อมูลของไม้สักแต่ละต้น บันทึกข้อมูลแบบจำลองของไม้สักเป็นรายต้น จากนั้นทำการส่งออกข้อมูลไปประมวลผลต่อในซอฟต์แวร์ 3D Forest โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลแสดงดัง Figure 3

2. ประมวลผลแบบจำลองไม้สักรายต้นด้วยซอฟต์แวร์ 3D Forest เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ความสูงที่เป็นสินค้าได้ และหาปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้คำสั่ง Stem curve และ QSM (Quantitative structure models) โดยวิธี Stem curve จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นในระดับความสูงต่าง ๆ (Figure 4A) (Trochta *et al*., 2017) กำหนดจำนวนการคำนวณซ้ำในการประเมินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแบบ Randomized Hough Transformation (RHT) จำนวน 200 ครั้ง และกำหนดความสูงในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทุก ๆ 2 เมตร จากนั้นนำค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนไม้แต่ละท่อนมาคำนวณด้วยสูตรปริมาตรไม้ท่อน Huber's formula และรวมปริมาตรของทุกท่อนเข้าด้วยกัน โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดที่ 10 เซนติเมตร จะได้เป็นปริมาตรไม้ส่วนที่ทำเป็นสินค้าได้ ส่วนวิธี QSM จะสร้างแบบจำลองต้นไม้ในรูปของทรงกระบอก (Cylindrical model) (Figure 4B) (Petrov *et al.*, 2020) โดยกำหนดจำนวนรอบการประมวลผลสำหรับการประเมินทรงกระบอก 150 ครั้ง กำหนดขนาดของทรงกระบอกสูง เท่ากับ 20 เซนติเมตร และกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดที่จะสร้างทรงกระบอก เท่ากับ 10 เซนติเมตร

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ทดสอบความถูกต้องของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน ในการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติในการทดสอบความแตกต่างของปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้แต่ละวิธี (t-test)

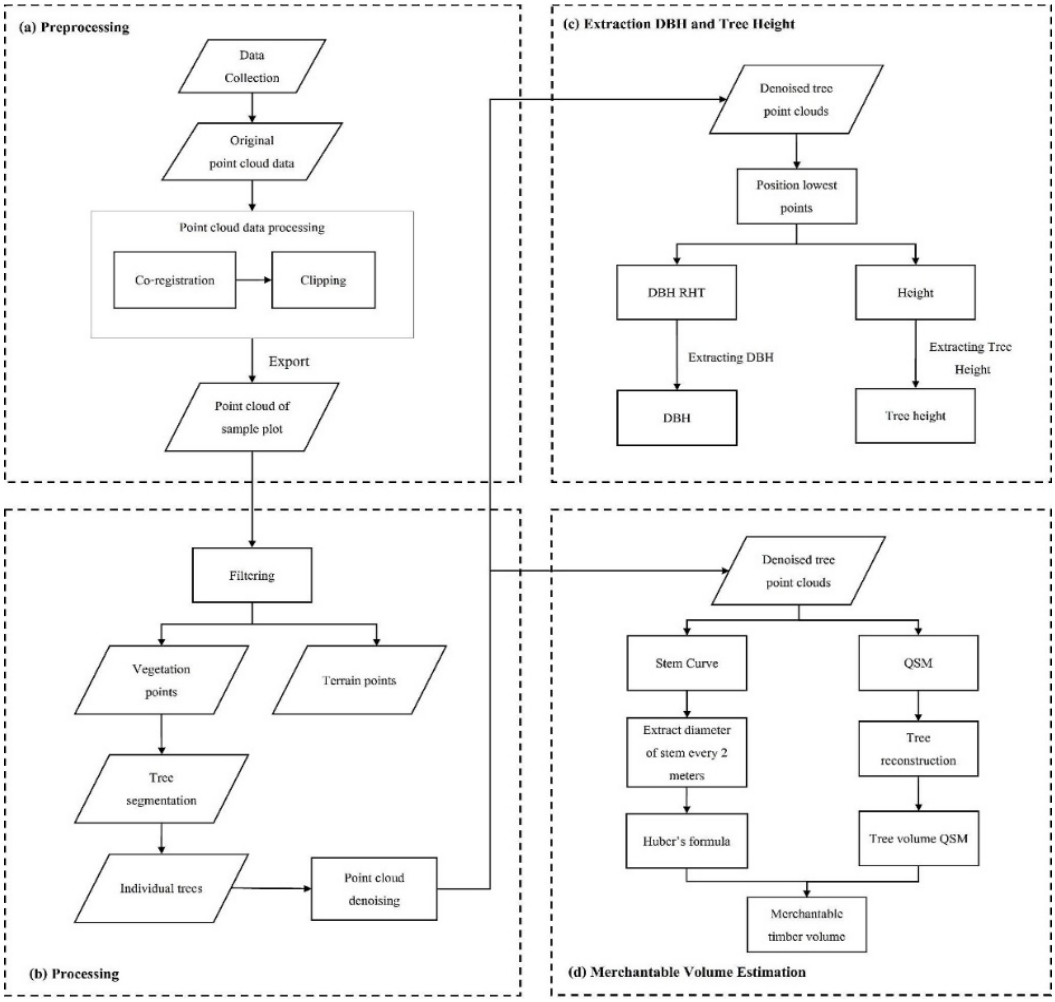

Figure 3 Flowchart detailing the methods in data processing. (a) Preprocessing (b) Processing (c) Extraction DBH and tree height (d) Merchantable volume estimation.

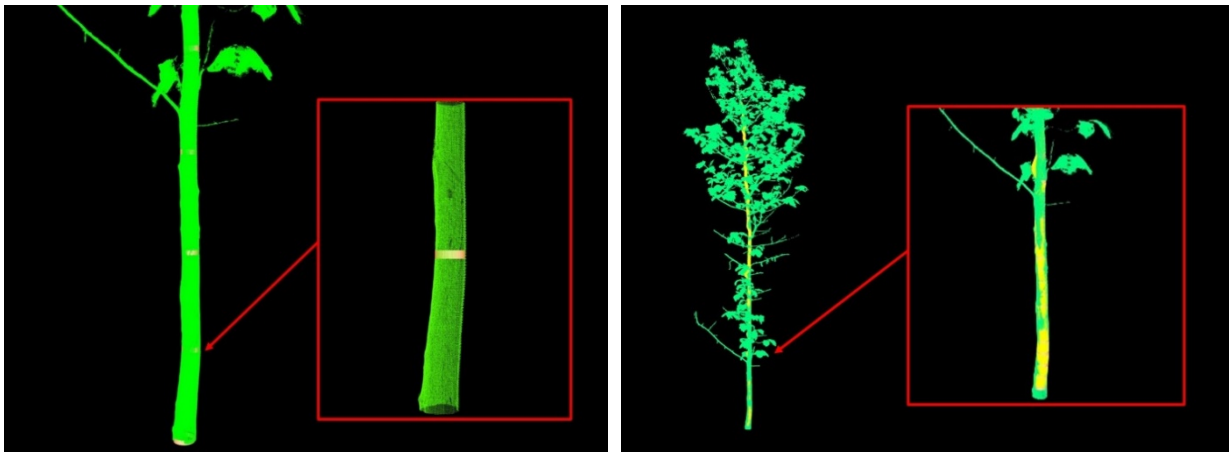

Figure 4 (A) Stem Curve method ; (B) QSM method

และทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนด้วย Root mean square error (RMSE) โดยใช้ข้อมูลปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ของต้นสักที่ทำการล้มไม้จำนวน 24 ต้นในการเปรียบเทียบกับการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ด้วยวิธี Stem curve และวิธี QSM

2. สร้างสมการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ ด้วยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูงที่เป็นสินค้าได้ กับปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ โดยใช้แบบจำลองสามมิติของต้นสักในแปลงตัวอย่างที่สร้างด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินนอกเหนือจากต้นที่ทำการล้มไม้ จำนวน 30 ต้น มาสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้

3. ทดสอบสมการที่สร้างขึ้น เมื่อได้สมการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จากนั้นนำข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ของไม้สักที่ทำการล้มไม้มาแทนค่าในสมการที่เลือกมา เพื่อหาปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้ จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า MAPE (Mean absolute percentage error) เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์จากสมการที่สร้างขึ้น โดยใช้ปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จากการวัดด้วยวิธีการล้มไม้มาใช้ในการทดสอบ โดยค่า MAPE ของสมการสามารถหาได้จากสมการที่ 2 (Lewis, 1982)

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{Y_t - y_t}{Y_t} \right| \times 100}{n} \quad (2)$$

เมื่อ Y_t คือ ค่าปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จากการล้มไม้

y_t คือ ค่าปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จากสมการที่สร้างขึ้นด้วย TLS

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

4. สร้างตารางปริมาตรไม้ โดยนำสมการที่มีความถูกต้องสูงที่สุดมาสร้างตารางปริมาตรไม้ในรูปแบบ Standard volume table โดยใช้ความสัมพันธ์ 2 ตัวแปร ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้

ผลและวิจารณ์

1. การทดสอบความถูกต้องของเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินในการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้

จากการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ทั้ง 3 แบบ คือ 1) การล้มไม้และวัดด้วยเทปวัดความโตคำนวณปริมาตรไม้ด้วย Huber's formula ($V_{reference}$) 2) วิธี Stem Curve ($V_{Stem\ Curve}$) และ3) วิธี QSM(V_{QSM}) ทดสอบความแตกต่างของปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ด้วย t-test และทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนด้วย Root Mean Square Error พบว่าปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จากการประมาณด้วยวิธี Stem Curve และ QSM มีค่าไม่แตกต่างจากการประมาณปริมาตรไม้ด้วยวิธีการล้มไม้ ($p>0.05$) แสดงดัง Table 3

Table 3 Results of t-test comparing different merchantable volume measured; the significance level α=0.05.

	Mean	Variance	N	df	t	P
Merchantable volume between reference volume and volume estimated via the Stem Curve method						
$V_{reference}$	0.2976	0.0419	24	23	1.5740	0.1291
$V_{Stem\ Curve}$	0.2915	0.0383	24	23		
Merchantable volume between reference volume and volume estimated via the QSM method						
$V_{reference}$	0.2976	0.0419	24	23	1.8364	0.0793
V_{QSM}	0.2868	0.0384	24	23		

โดยวิธี Stem curve และ QSM มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.02 และ 0.03 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (Figure 5) สอดคล้องกับการศึกษาของ Panagiotidis and Abdollahnejad (2021) ในการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างการประมาณปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้โดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินด้วยวิธี RANSAC (Random sample consensus) และปริมาตรไม้อ้างอิง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ 0.02 – 0.03 ลูกบาศก์เมตร

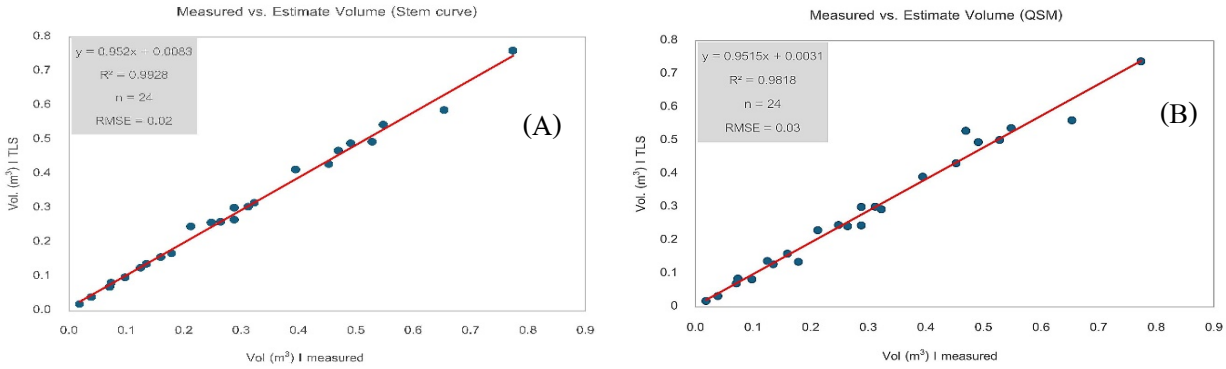

Figure 5 Comparison of merchantable volume for each method: reference volume and the stem curve method (A); reference volume and the QSM method (B).

2. การสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน

จากการวิเคราะห์การถดถอยโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ และปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ สามารถสร้างสมการประมาณปริมาตรไม้สักที่เป็นสินค้าได้จำนวน 6 สมการ (Table 3) แสดงในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ดัง Figure 6 ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) และความคลาด

เคลื่อนในการประมาณ (SE) ของแต่ละสมการ โดยแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

รูปแบบที่หนึ่ง สมการปริมาตรไม้มาตรฐาน (Standard volume table) เป็นสมการที่มีตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปร สมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมากที่สุด คือ สมการที่ 5 $V = 0.0002DBH^{1.8795}H_M^{0.6235}$ มี R^2 เท่ากับ 0.988 หมายความว่า ปริมาตรไม้สักที่เป็นสินค้าได้นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ร้อยละ 98.8 และอีกร้อยละ 1.2 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ และมีค่า SE เท่ากับ 0.086 ซึ่งมากที่สุด สมการนี้จึงมีความถูกต้องที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Buranachan (2022) ในการสร้างสมการประมาณไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้โดยมีตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับปริมาตรไม้ที่ทำเป็นสินค้าได้มากกว่าหนึ่งตัวแปร คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูง โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.904

Table 3 Merchantable volume equations for estimating the volume of teak trees in the Mae Chang forest plantation

No.	Equation	F	SE	R^2
1	$V = - 0.0366 + 0.0007DBH^2$	632.6	0.035	0.958
2	$V = 0.0001DBH^{2.5478}$	789.5	0.141	0.966
3	$V = - 0.1777 + 0.0143DBH + 0.0003DBH^2$	335.7	0.034	0.961
4	$V = 0.0559 + 0.00004DBH^2H_M$	462.6	0.041	0.943
5	$V = 0.0002DBH^{1.8795}H_M^{0.6235}$	1085.3	0.086	0.988
6	$V = - 0.0873 + 0.0005DBH^2 + 0.0097H_M + 0.000002DBH^2H_M$	365.3	0.027	0.977

Remarks: V = merchantable volume, in cubic meters. H_M = merchantable height, in meters.
DBH = diameter at 130 centimeters above the ground level, in centimeters.

รูปแบบที่สอง คือ ปริมาตรไม้ท้องถิ่น (Local volume table) เป็นสมการประมาณปริมาตรไม้ที่จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเพียงตัวแปรเดียว โดยสมการที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมากที่สุด คือ สมการที่ 2 $V = 0.0001DBH^{2.5478}$ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.966 หมายความว่า ปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้จะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกร้อยละ 96.6 และอีกร้อยละ 3.4 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ และมีค่า SE เท่ากับ 0.141 สมการนี้จึงมีความถูกต้องที่สุด อีกทั้งสมการนี้จะสะดวกต่อการเก็บรวบรวมข้อมูล ทั้งนี้สองสมการข้างต้นจะมีความต่างกันในส่วนของตัวแปรในการรวบรวมข้อมูล ในสมการที่ 5 จะต้องเก็บข้อมูลทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ แต่ในส่วนของสมการที่ 2 จะใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเพียงอย่างเดียว ซึ่งสะดวกในการเก็บข้อมูลมากกว่า แต่มีโอกาสที่จะประมาณปริมาตรไม้คลาดเคลื่อนสูงกว่าเช่นเดียวกัน

ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ด้วยว่าจะเลือกใช้สมการใดเพื่อนำไปประมาณปริมาณไม้

3. การทดสอบสมการที่สร้างขึ้น

เมื่อนำสมการที่ 2 และ 5 มาทดสอบค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) พบว่าค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์ทั้งสองสมการมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 17.81 และ 11.01 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับการพยากรณ์มีความถูกต้องสูง (MAPE < 10-20%) (Lewis, 1982)

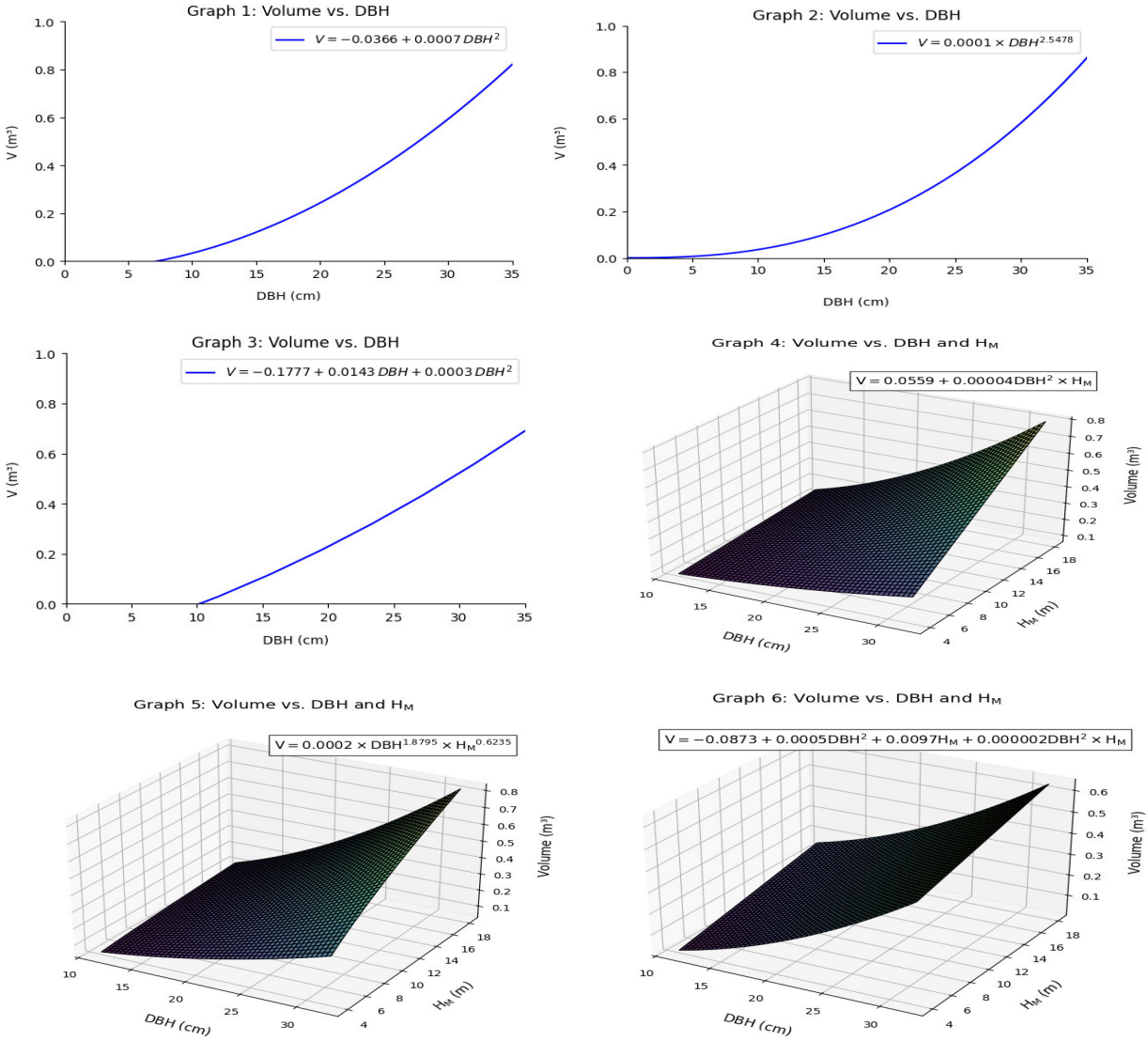

Figure 6 Relationship between DBH, merchantable height and merchantable volume from equations 1- 6

4. ตารางปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สัก

ผลการคำนวณปริมาตรไม้สักที่ทำเป็นสินค้าได้ในพื้นที่สวนป่าแม่จาง ตามรูปแบบสมการที่ 5 โดยจำแนกตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสูงที่ทำเป็นสินค้าได้ แสดงดัง Table 4

Table 4 Merchantable volume table of *Tectona grandis* at Mae Chang forest plantation, Mae Mo district, Lampang province (in cubic meters).

DBH	Merchantable Height (m)								
(cm)	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18
8-10	0.023	0.036	0.046	0.055	0.064	0.071	0.079	0.085	0.092
10-12	0.033	0.051	0.065	0.078	0.090	0.101	0.111	0.120	0.129
12-14	0.044	0.068	0.087	0.104	0.120	0.134	0.148	0.161	0.173
14-16	0.056	0.087	0.112	0.134	0.154	0.173	0.190	0.207	0.222
16-18	0.070	0.109	0.140	0.167	0.192	0.215	0.237	0.258	0.277
18-20	0.086	0.132	0.170	0.204	0.234	0.263	0.289	0.314	0.338
20-22	0.103	0.158	0.204	0.244	0.280	0.314	0.346	0.376	0.404
22-24	0.121	0.186	0.240	0.287	0.330	0.370	0.407	0.442	0.476
24-26	0.141	0.217	0.279	0.334	0.384	0.430	0.473	0.514	0.554
26-28	0.162	0.249	0.321	0.384	0.441	0.494	0.544	0.591	0.636
28-30	0.184	0.284	0.365	0.437	0.502	0.563	0.619	0.673	0.724
30-32	0.208	0.320	0.412	0.493	0.567	0.635	0.699	0.760	0.818

จาก Table 4 สามารถใช้ประมาณปริมาตรไม้ได้โดยไม่ต้องโค่นต้นไม้ โดยเริ่มจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและความสูงที่เป็นสินค้าได้ของต้นไม้เทียบให้ตรงแถวและคอลัมน์ในตารางจากนั้นจึงอ่านค่าปริมาตร โดยตารางดังกล่าวกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกขั้นต่ำที่ 10 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นขนาดเริ่มต้นที่มีการซื้อขายกัน นอกจากนี้ในการใช้ตารางประมาณปริมาตรไม้ที่สร้างขึ้นควรหลีกเลี่ยงการนำไปประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สักนอกพื้นที่ศึกษาหรือมีลักษณะพื้นที่แตกต่างจากพื้นที่ศึกษามาก เพราะอาจทำให้ปริมาตรที่ประมาณได้คลาดเคลื่อน จากการศึกษาของ Himmapan (2024) ในการสร้างตารางปริมาตรส่วนที่เป็นสินค้าได้ของไม้สัก โดยเก็บข้อมูลไม้สักอายุระหว่าง 9-44 ปีจากสวนป่าทั่วประเทศไทย จำนวนตัวอย่าง 196 ต้น ทำการล้มไม้และคำนวณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้โดยใช้สมการ Smalian's formula สร้างเป็นสมการและตารางประมาณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ของไม้สัก เมื่อเปรียบเทียบกับตารางปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ที่สร้างโดยใช้เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน พบว่าค่าประมาณปริมาตรไม้มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน คือ เมื่อต้นไม้มีขนาดเล็กถึงขนาดกลางค่าประมาณจะใกล้เคียงกับค่าปริมาตรอ้างอิง (ค่าที่ได้จากการล้มไม้) และเมื่อต้นไม้มีขนาดใหญ่ ความแตกต่างระหว่างค่าประมาณกับปริมาตรอ้างอิงจะเพิ่มมากขึ้น

สรุป

การประมาณปริมาตรไม้สักทำเป็นสินค้าได้ด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถใช้แทนวิธีการล้มไม้เพื่อคำนวณปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการศึกษาพบว่า แบบจำลองสามมิติของไม้สักที่สร้างขึ้นด้วยข้อมูลจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินสามารถนำมาวิเคราะห์ปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้ด้วยวิธี Stem curve และ QSM ในซอฟต์แวร์ 3D Forest ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าปริมาตรที่ได้จากการล้มไม้ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ผลการวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินเป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการเก็บข้อมูลปริมาตรไม้ที่เป็นสินค้าได้อย่างแม่นยำโดยไม่ทำลายต้นไม้ นอกจากนี้ยังช่วยสนับสนุนการจัดการป่าไม้อย่างยั่งยืน ลดการสูญเสียทรัพยากร และเพิ่มประสิทธิภาพในการประเมินมูลค่าทางเศรษฐกิจของไม้ได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการประเมินมวลชีวภาพเหนือพื้นดิน และการกักเก็บคาร์บอนของสวนป่าไม้สัก ภายใต้การสนับสนุนงบวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และขอขอบคุณสวนป่าแม่จาง องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้เขตลำปาง ที่อนุญาตให้คณะผู้วิจัยเข้าไปศึกษาวิจัยในพื้นที่ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการเข้าเก็บข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

An, Z. & R. E. Froese. 2022. Tree stem volume estimation from terrestrial LiDAR point cloud by unwrapping. **Canadian Journal of Forest Research** 53(2): 60-70. doi:10.1139/cjfr-2022-0153\

Bornand, A., N. Rehush, F. Morsdorf, E. Thurig & M. Abegg. 2023. Individual tree volume estimation with terrestrial laser scanning: Evaluating reconstructive and allometric approaches. **Agricultural and Forest Meteorology** 341: 109654. DOI:10.1016/j.agrformet.2023.109654

Buranachan, A. 2022. **Yield assessment of trees to support business collateral: a case study of teak in Kroeng Krawia Forest Plantation, Kanchanaburi Province**. pp. 596- 603. *In* Proceedings of 60th Kasetsart University Annual Conference. Prachacheun Research Network, Pathum Thani. (in Thai)

FARO Technologies Inc. 2019. **SCENE 2019 FARO Focus Laser Scanners Training Workbook**. USA: Technology Park Lake Mary.

Forest Industry Organizations. 2017. **Table of determined teak wood prices from forest plantations by the Forest Industry Organization (FIO)** . Available source: http://www.fio.co.th/fiopage/doc/price_of_teak_03. pdf, (Accessed: September 17, 2024) . (in Thai)

Forest Industry Organizations. 2019. **Mae Jang forest plantation management summary**. Available source: http://www.northfio.com/web/information/Maejang64. pdf, (Accessed: March 16, 2025). (in Thai)

Hackenberg, J., M. Wassenberg, H. Spiecker & D. Sun. 2015. Non-Destructive Method for Biomass Prediction Combining TLS Derived Tree Volume and Wood Density. **Forests** 6: 1274-1300. DOI:10.3390/f6041274

Himmapan, W. 2024. **Table of total stem volume and merchantable volume of teak trees**. Available source: https://online.anyflip.com/unoq/qzwg/mobile/index. html. (Accessed: December 2, 2024) (in Thai)

Husch, B., C. Miller & T. Beers. 1982. **Forest mensuration**. 3rd ed. John Willey and Sons, New York.

Krooks, A., S. Kaasalainen, V. Kankare, M. Joensuu, P. Raumonen & M. Kaasalainen. 2014. Predicting tree structure from tree height using terrestrial laser scanning and quantitative structure models. **Silva Fennica** 48: 1- 11. DOI:10.14214/sf.1125

Lewis, C. 1982. **Industrial and business forecasting methods**. Butterworth Scientific, London, UK.

Liang, X., V. Kankare, J. Hyyppä, Y. Wang, A. Kukko, H. Haggrén & M. Vastaranta. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing** 115: 63-77.

Liu, G., J. Wang, P. Dong, Y. Chen & Z. Liu. 2018. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) Data at Plot Level. **Forests** 9: 398. DOI:10.3390/f9070398

Panagiotidis, D. & A. Abdollahnejad. 2021. Reliable estimates of merchantable timber volume from terrestrial laser scanning. **Remote Sensing** 13(18): 3610. DOI: 10.3390/rs13183610

Petrov, M. K., J. Trochta & K. Kral. 2020. **3D Forest user guide.** The Silva Tarouca Research Institute, Pub. Res. Inst., Department of Forest Ecology.

Rianthakool, L., J. Yingdee, T. Chumsangsri, C. N. Takuathung, P. Diloksumpun, T. Lakkanasri, C. Tosophon & N. Intim. 2024. The Study of 3D Modelling of *Peltophorum pterocarpum* with terrestrial laser scanner. **Thai Science and Technology Journal** 32: 79-91. (in Thai)

Royal Forest Department. 2013. **Thai teak knowledge**. Bangkok: Ministry of Natural Resources and Environment. (In Thai)

Trochta, J., M. Krucek, T. Vrska & K. Kral. 2017. 3D Forest: An application for descriptions of three- dimensional forest structures using terrestrial LiDAR. **PLoS One** 12(5): e0176871. DOI:10.1371/journal.pone.0176871