นิพนธ์ต้นฉบับ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความโตที่มีพูพอนกับขนาดความโตที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงของตะแบกนา (*Lagerstroemia floribunda* Jack) ในภาคตะวันออกของประเทศไทย

ธรรมนูญ เต็มไชย[1*]

รับต้นฉบับ: 11 กุมภาพันธ์ 2569 ฉบับแก้ไข: 21 มีนาคม 2569 รับลงพิมพ์: 27 มีนาคม 2569

บทคัดย่อ:

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: การวัดขนาดลำต้นอย่างถูกต้องเป็นพื้นฐานสำคัญของงานวนศาสตร์ เนื่องจากเกี่ยวข้องโดยตรงกับการคำนวณพื้นที่หน้าตัด ปริมาตรไม้ ชีวมวล และการกักเก็บคาร์บอน อย่างไรก็ตาม ในป่าเขตร้อน การวัดขนาดลำต้นที่ระดับมาตรฐานมักประสบปัญหาจากการเกิดพูพอนตามลำต้น ซึ่งทำให้รูปทรงลำต้นเบี่ยงเบนจากทรงกระบอก และส่งผลให้ค่าความโตลำต้นที่วัดรวมพูพอนมีแนวโน้มสูงเกินความเป็นจริง อันนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบในการประเมินโครงสร้างป่าและบริการระบบนิเวศ ซึ่งแนวทางปฏิบัติโดยทั่วไปแนะนำให้วัดขนาดลำต้นเหนือระดับพูพอนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากรูปทรงลำต้นที่ผิดปกติ อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในอีกทิศทางหนึ่ง เนื่องจากลำต้นมีลักษณะเรียวเล็กลงตามความสูง อีกทั้งไม้หลายชนิด เช่น ตะแบกนา (*Lagerstroemia floribunda* Jack) มีพูพอนเป็นครีบแผ่ขยายต่อเนื่องเกือบตลอดแนวลำต้น ทำให้ยากต่อการกำหนดตำแหน่งวัดความโตลำต้นที่แน่นอน โดยเฉพาะในการติดตามข้อมูลซ้ำในแปลงตัวอย่างถาวร แม้ว่าปัญหาดังกล่าวจะเป็นที่รับรู้กันโดยทั่วไป แต่แนวทางการปรับแก้ค่าการวัดลำต้นที่มีพูพอนอย่างเป็นระบบและสามารถนำไปใช้ได้จริงในภาคสนามยังมีอยู่อย่างจำกัด การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความโตลำต้นที่วัดรวมพูพอนกับขนาดความโตที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงของตะแบกนา (*L. floribunda*) (2) ทดสอบความแม่นยำของสมการที่พัฒนาขึ้น และ (3) ประเมินความสามารถในการประยุกต์ใช้สมการกับไม้ชนิดอื่นที่มีลักษณะพูพอนใกล้เคียงกัน

วิธีการ: การศึกษานี้ดำเนินการในพื้นที่ป่าดิบแล้งและป่าดิบชื้นในภาคตะวันออกของประเทศไทย ซึ่งพบไม้ที่มีพูพอนเป็นจำนวนมาก โดยเลือกตะแบกนา (*L. floribunda*) เป็นชนิดไม้หลักในการศึกษา เนื่องจากมีพูพอนแบบแผ่นครีบที่พัฒนาชัดเจนและมักแผ่ขยายเป็นแนวเกือบตลอดลำต้น และเป็นชนิดที่พบได้ในหลายสังคมพืช ทำการสุ่มตัวอย่างจำนวน 50 ต้น ครอบคลุมช่วงขนาดความโตที่หลากหลาย โดยใช้การสุ่มแบบแบ่งชั้นตามช่วงขนาดเส้นรอบวงลำต้นที่ความสูงระดับอก (1.30 เมตร) ที่วัดรวมพูพอน สำหรับต้นไม้ตัวอย่างแต่ละต้น ทำการวัดขนาดเส้นรอบวงลำต้นรวมพูพอนด้วยสายวัด ที่ความสูง 1.30 เมตร จากนั้นทำการคัดลอกรูปร่างหน้าตัดลำต้นจริงที่ตำแหน่งเดียวกัน โดยทาบแถบอลูมิเนียมที่คงรูปเมื่อบิดงอตามผิวเปลือกและแนวพูพอนให้ครบหนึ่งรอบ นำรูปทรงที่ได้ไปคัดลอกลงกระดาษเพื่อสแกนและดิจิไทซ์ในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อคำนวณพื้นที่หน้าตัดจริง แล้วแปลงค่าพื้นที่หน้าตัดดังกล่าวเป็นเส้นรอบวงสมมูลของทรงกลม เพื่อแทนค่าความโตลำต้นที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง จากนั้นวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอนและเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด และประเมินประสิทธิภาพ

ของสมการจากค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์และนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังทดสอบความเหมาะสมของสมการกับไม้ชนิดอื่นที่มีพูพอน และวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนเพื่อประเมินอคติเชิงระบบตามช่วงขนาดลำต้น

ผลการศึกษา: พบว่า สมการความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (Measured buttressed GBH) และเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (Girth derived from actual basal area, GBH_pred) ของตะแบกนา (*L. floribunda*) ที่มีพูพอน เป็นไปตามสมการ GBH_pred = 3.266 + 0.874 × GBH_mb, เมื่อกำหนดให้ GBH_pred คือ เส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (cm) และ GBH_mb คือ เส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (measured buttressed girth, cm) โดยมีค่า $R^2 = 0.989$ และค่าความชันของสมการมีค่าน้อยกว่า 1 สะท้อนให้เห็นถึงการที่ค่าการวัดรวมพูพอนมีแนวโน้มสูงกว่าค่าความโตที่สอดคล้องกับรูปทรงหน้าตัดจริงของลำต้น ผลการทดสอบสมการกับชุดข้อมูลอิสระของตะแบกนา (*L. floribunda*) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างค่าที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงและค่าที่สมการทำนาย โดยค่าคลาดเคลื่อนกระจายตัวรอบศูนย์อย่างสมมาตร เมื่อประยุกต์ใช้สมการกับไม้ชนิดอื่นที่มีสัณฐานพูพอนใกล้เคียงกัน พบว่ายังคงให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำและไม่ปรากฏอคติเชิงระบบ อย่างไรก็ตาม เมื่อทดสอบกับไม้ที่มีรูปแบบพูพอนแตกต่างอย่างชัดเจน พบว่าความคลาดเคลื่อนของการทำนายเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของสัณฐานลำต้นต่อประสิทธิภาพของสมการ โดยการวิเคราะห์ค่าคลาดเคลื่อนตามช่วงขนาดความโตไม่พบแนวโน้มของอคติตามขนาดลำต้นในช่วงข้อมูลที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ในกลุ่มต้นไม้ขนาดเล็กที่มีค่าการวัดเส้นรอบวงรวมพูพอนต่ำกว่าประมาณ 26 เซนติเมตร สมการมีแนวโน้มให้ค่าความโตที่คำนวณได้สูงกว่าค่าจริงเล็กน้อย ซึ่งสะท้อนผลของค่าคงที่บวกในสมการและการที่พูพอนยังพัฒนาไม่ชัดเจนในต้นไม้ขนาดเล็ก

สรุปผล: การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอนที่ระดับอกสามารถปรับแก้ให้สอดคล้องกับความโตที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงได้อย่างเป็นระบบ ด้วยการใช้สมการถดถอยเชิงประจักษ์ วิธีการที่เสนอช่วยหลีกเลี่ยงข้อจำกัดของการวัดเหนือระดับพูพอน และเปิดโอกาสให้สามารถวัดขนาดลำต้นที่ตำแหน่งคงที่ได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการติดตามการเจริญเติบโตของต้นไม้ในแปลงตัวอย่างถาวร และผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสมการมีความเหมาะสมในการใช้งานภายในช่วงขนาดลำต้นและกลุ่มชนิดไม้ที่มีสัณฐานพูพอนใกล้เคียงกับตะแบกนา อย่างไรก็ตาม ควรใช้สมการด้วยความระมัดระวังในกรณีต้นไม้ขนาดเล็ก (GBH < 26 ซม.) และไม้ที่มีสัณฐานพูพอนแตกต่างอย่างชัดเจน โดยรวมแล้ว แนวทางที่นำเสนอสามารถช่วยลดอคติเชิงระบบจากการวัดลำต้นที่มีพูพอน และสนับสนุนการประเมินพื้นที่หน้าตัด ชีวมวล และการกักเก็บคาร์บอนในป่าเขตร้อนได้อย่างมีความถูกต้องและสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ค่าปรับแก้พูพอน, การคณิตป่าไม้, การปรับแก้เส้นรอบวง

---

[1] ศูนย์วิจัยและพัฒนานวัตกรรมอุทยานแห่งชาติ (จังหวัดเพชรบุรี) สำนักอุทยานแห่งชาติ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, จังหวัดเพชรบุรี, 76120

***ผู้รับผิดชอบบทความ**: E-mail: dhamma57@gmail.com

https://doi.org/10.34044/tferj.2026.10.1.6608

ORIGINAL ARTICLE

Relationship between Measured Buttressed Stem Girth and Girth Derived from Actual Basal Area in *Lagerstroemia floribunda* Jack in Eastern Thailand

Thammanoon Temchai[1*]

Received: 11 February 2026 Revised: 21 March 2026 Accepted: 27 March 2026

ABSTRACT

Background and Objectives: Accurate measurement of stem size is a fundamental component of forest mensuration, as it directly underpins the estimation of basal area, timber volume, aboveground biomass, and carbon stocks in forest ecosystems. In tropical forests, however, standard protocols for measuring stem girth or diameter at breast height (DBH) are frequently complicated by the presence of buttresses. These structural adaptations alter stem geometry, causing girth measurements taken at the conventional height of 1.30 m above ground to deviate from the idealized cylindrical form. Consequently, measurements that include buttresses tend to overestimate stem girth and propagate systematic bias into subsequent calculations of forest structure and ecosystem services. To avoid this issue, conventional practice recommends measuring stem size above the buttress. Nevertheless, this alternative approach introduces a different form of bias, as stem diameter typically decreases with height due to tapering. In many tropical species, such as *Lagerstroemia floribunda*, buttresses may extend continuously along much of the lower stem, making it difficult or impractical to define a consistent measurement position. These challenges are particularly critical in permanent plots, where monitored must be conducted at the same position. Despite the widespread recognition of this issue, practical and standardized methods for correcting buttressed stem measurements remain limited. Therefore, this study aimed to (1) develop a regression model relating measured buttressed girth to girth derived from the actual basal area of *L. floribunda*, (2) evaluate the accuracy of the developed model, and (3) assess its applicability to other tree species with similar buttress morphology.

Methodology: The study was conducted in lowland tropical forest areas in eastern Thailand, where buttressed tree species are common. *L. floribunda* was selected as the focal species due to its well-developed ridge-type buttresses that often extend along the lower stem. A total of 50 trees were sampled using a size-class stratified sampling design to ensure representation across a wide range of girth classes. For each tree, stem girth including buttresses was measured at 1.30 m above ground. At the same height, the actual cross-sectional shape of the stem was captured by tracing the outer bark surface, including buttress contours, using a flexible aluminum strip to conform to irregular surfaces. The traced shapes were transferred onto reference sheets, scanned, and digitized in a geographic information system (GIS). The true cross-sectional area was then calculated from the digitized polygons. Based on the calculated area, an equivalent circular girth was derived mathematically to represent the girth corresponding to the actual basal area. The relationship between measured buttressed girth (denoted as GBH_mb, cm) and girth derived from actual basal area (denoted as GBH_pred, cm) was analyzed using simple linear regression based on the least squares method. Model performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2) and the statistical significance of regression

parameters. To assess the robustness and applicability of the model, it was further validated using independent datasets of *L. floribunda* and additional buttressed species, including *Markhamia stipulata* var. *stipulata* and *Irvingia malayana*. Residual analysis was performed to evaluate systematic bias across girth classes and to examine model behavior at the lower and upper extremes of observed data.

Main Results: A strong linear relationship was observed between measured buttressed girth and girth derived from the actual basal area for *L. floribunda*, with the regression model explaining a high proportion of variance ($R^2 = 0.989$, $p < .001$). The fitted equation was: GBH_pred = 3.266 + 0.874 × GBH_mb. The regression slope of less than unity indicates that measurements buttress systematically overestimate true girth, reflecting the lateral expansion of buttress structures rather than proportional increases in cross-sectional area. Validation using independent datasets showed no significant difference between predicted and observed values, with residuals symmetrically distributed around zero, indicating the absence of systematic bias within the calibrated range. When applied to other species with similar buttress morphology, the model maintained low mean prediction errors and showed consistent performance. However, when applied to species with distinctly different buttress morphologies, prediction errors increased substantially, highlighting the influence of stem architecture on model applicability. Residual analysis across girth classes revealed no consistent trend of bias, supporting the use of a single correction model across the observed size range. Nevertheless, for smaller trees with measured buttressed girth values below approximately 26 cm, the model tended to slightly overpredict girth derived from actual basal area. This pattern reflects the influence of positive intercept of the regression equation and the limited development in smaller trees.

Conclusion: This study demonstrates that stem girth measured including buttresses at breast height can be effectively corrected to approximate true cross-sectional girth using an empirical regression approach. The proposed model provides a practical and field-applicable alternative to conventional measurement above buttresses, enabling consistent and repeatable measurements at a fixed height. This is particularly advantageous for long-term monitoring in permanent sample plots, where measurement consistency is essential. The model performs reliably within the calibrated girth range and for species with similar buttress morphology. However, caution is required when applying the model to small trees (GBH < 26 cm) or to species with different buttress forms. Overall, the approach reduces systematic measurement bias and enhances the accuracy and consistency of basal area, biomass, and carbon stock estimation in tropical forest inventories. Further research incorporating additional species and environmental conditions would help improve the general applicability of the model. This approach provides a standardized and practical solution for improving the accuracy of forest inventory and carbon stock estimation in tropical forests affected by buttressed tree forms.

Keywords: Buttress correction, forest mensuration, girth–area relationship

---

[1] National Parks Research Center (Phetchaburi), National Parks Office, Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Phetchaburi province, 76120, Thailand

***Corresponding author**: E-mail: dhamma57@gmail.com

https://doi.org/10.34044/tferj.2026.10.1.6608

บทนำ (Introduction)

พูพอน (Buttress) หมายถึง โคนต้นไม้ที่แผ่ขยายออกเป็นปีก เป็นพู หรือเป็นปม เพื่อพยุงลำต้น (Royal Institute, 2011) ทำหน้าที่ช่วยค้ำยันลำต้นให้มั่นคงและลดความเสี่ยงที่ต้นไม้จะล้ม และช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับดูดซึมสารอาหารและน้ำจากดิน (Richards, 1996) โดยทั่วไปของชนิดไม้ป่าเขตร้อน (tropical rain forest) พบต้นไม้ที่มีพูพอนมากถึงร้อยละ 32 ของต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) 10 เซนติเมตรขึ้นไป (Hu *et al*., 2013) มีรายงานว่าชนิดไม้ในวงศ์ Bombacaceae (ปัจจุบันจัดอยู่ในวงศ์ Malvaceae) ที่มีความสูง 44 เมตร ในป่าอเมซอนมีพูพอนสูงถึง 21 เมตร (Whitmore, 1998) พูพอนของไม้ขนาดใหญ่ในป่าเขตร้อนอาจพัฒนาได้สูงกว่า 9 เมตร (Nölke *et al*., 2015)

ในการสำรวจทรัพยากรป่าไม้ การวัดขนาดความโตลำต้นจะกระทำที่ระดับความสูง 1.30 เมตรเหนือพื้นดิน (breast height) และใช้เป็นตัวแปรพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณพื้นที่หน้าตัดลำต้น (basal area) รวมถึงการประเมินปริมาตรไม้ มวลชีวภาพ และการกักเก็บคาร์บอนของระบบนิเวศป่าไม้ (Brown, 1997; Chave *et al*., 2005) แต่ลำต้นของต้นไม้ในป่าธรรมชาติ มีพูพอนนูนเป็นสันตามแนวลำต้น มีผลต่อค่าความโตวัดรอบลำต้นอย่างมีนัยสำคัญ (Peters, 1996) พูพอนอาจสร้างข้อจำกัดต่อการวัดขนาดลำต้นด้วยวิธีมาตรฐาน (Nölke *et al*., 2015) ค่าความโตวัดรอบรวมพูพอน (Over-bark girth) สูงกว่าค่าที่ควรเป็นเมื่อเปรียบเทียบกับต้นไม้ที่มีรูปทรงปกติ (Ngomanda *et al*., 2012; Warner *et al*., 2017) ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณพื้นที่หน้าตัด ปริมาตรไม้ และชีวมวล ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของการประเมินคาร์บอนในระดับพื้นที่ (Henry *et al*., 2011; Picard *et al*., 2012) จึงจำเป็นต้องมีการปรับแก้ก่อนนำข้อมูลไปใช้ (Warner *et al*., 2017) ซึ่งแนวทางการสำรวจโดยทั่วไปจึงแนะนำให้วัดขนาดลำต้นเหนือระดับพูพอนเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบจากรูปทรงลำต้นที่ผิดปกติ (Watcharakitti, 1982; Kershaw *et al*., 2017) แต่การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นในระดับที่สูงกว่าพูพอนมักทำให้ค่าที่ได้มีขนาดเล็กลง เนื่องจากลำต้นมีลักษณะเรียวเล็กลงตามความสูง ส่งผลให้การประมาณชีวมวลหรือการเปลี่ยนแปลงชีวมวลมีแนวโน้มต่ำกว่าความเป็นจริง (Cushman *et al*., 2014) จากการสังเกตจากนักวิจัยด้านนี้ พบว่าหลายครั้งส่วนที่เป็นพูพอนของต้นไม้บางชนิด เช่น กลุ่มไม้ในวงศ์ตะแบก (Lythraceae) เช่น ตะแบกนา (*Lagerstroemia floribunda* Jack) (Figure 1B) และกระบก (*Irvingia malayana* Oliv. ex A.W.Benn.) ที่พบในป่าธรรมชาติ มักมีพูพอนเป็นแนวยาวตามลำต้น ซึ่งอาจสร้างความยากในการปฏิบัติงานภาคสนาม บางชนิดมีการขยายความสูงพูพอนขึ้นอีกเมื่อลำต้นมีการเจริญเติบโตขึ้น เป็นปัญหาต่อการกำหนดตำแหน่งที่แน่นอนในการติดตามขนาดความโตในแปลงตัวอย่างถาวร แต่งานที่พัฒนาสมการปรับแก้ค่าความโตลำต้นจากการวัดรวมพูพอนยังมีจำกัด โดยเฉพาะระดับเส้นรอบวง

ดังนั้น หากมีสมการสำหรับปรับแก้ค่าความโตของลำต้นที่เกิดพูพอนลักษณะดังกล่าวอาจช่วยลดความยากในการปฏิบัติงานด้านการสำรวจป่าไม้และงานนิเวศวิทยาป่าไม้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ (1) พัฒนาสมการ

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความโตลำต้นที่วัดรวมพูพอนกับขนาดความโตที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง สำหรับปรับแก้ค่าความโตลำต้นที่ได้รับผลกระทบจากพูพอนในกรณีที่จำเป็นต้องวัดขนาดลำต้นที่ระดับ 1.30 เมตร อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หรือ หากวัดสูงไปกว่านั้นแล้วจะได้ขนาดความโตที่เล็กกว่าที่ควรเป็น (2) ทดสอบความแม่นยำของสมการ และ (3) ประเมินความสามารถในการประยุกต์ใช้กับไม้ชนิดอื่นที่มีสัณฐานพูพอนใกล้เคียงกัน

อุปกรณ์และวิธีการ (Materials and Methods)

1. พื้นที่ศึกษา

ดำเนินการศึกษาในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาชะเมา–เขาวง จังหวัดระยอง และพื้นที่โครงการอนุรักษ์ป่ารอยต่อ 5 จังหวัด ภาคตะวันออก จังหวัดชลบุรี (Figure 1A) ซึ่งเป็นพื้นที่ป่าธรรมชาติในภาคตะวันออกของประเทศไทย พื้นที่ดังกล่าวประกอบด้วยสังคมพืชป่าดิบแล้งและป่าดิบชื้น ที่เป็นถิ่นอาศัยสำคัญของไม้ตะแบกนา (*Lagerstroemia floribunda*) (Figure 1B) ดำเนินการเก็บข้อมูลภาคสนามในช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567

2. วิธีการ

1) การคัดเลือกตัวอย่างและการวัดค่าความโตลำต้น (Field data collection)

ทำการสุ่มเลือกต้นตะแบกนา (*L. floribunda*) ที่ขนาดเส้นรอบวงลำต้น (GBH) ที่วัดรวมพูพอนที่ความสูง 1.30 เมตร ตั้งแต่ 15–205 เซนติเมตร แบ่งเป็น 10 อันตรภาคชั้น ชั้นละ 5 ต้น รวม 50 ต้น ทำการวัดขนาดเส้นรอบวงลำต้นรวมพูพอนที่ความสูง 1.30 เมตร และที่ตำแหน่งเดียวกันนี้ ใช้แถบอลูมิเนียมแบบแคบซึ่งดัดงอได้ ทาบตามร่องพูพอนจนรอบลำต้น นำมาคัดลอกรูปร่างหน้าตัดลำต้นลงบนกระดาษปรู๊ฟที่กำหนดค่าพิกัดไว้ทั้ง 4 มุม ด้วยระยะจริง นำภาพไปสแกนเป็นดิจิทัล แล้วนำไปตรึงขนาดด้วยโปรแกรมภูมิสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (ArcMap) โดยยึดโยงด้วยค่าพิกัดทั้ง 4 มุม แล้วทำการดิจิไทซ์ตามรูปทรงหน้าตัดของไม้ตัวอย่างแต่ละต้น จากนั้นจึงคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดจริงตามรูปทรงนั้นด้วยโปรแกรม ArcMap แล้วคำนวณหาขนาดเส้นรอบวงใหม่จากพื้นที่หน้าตัดจริงที่คำนวณได้

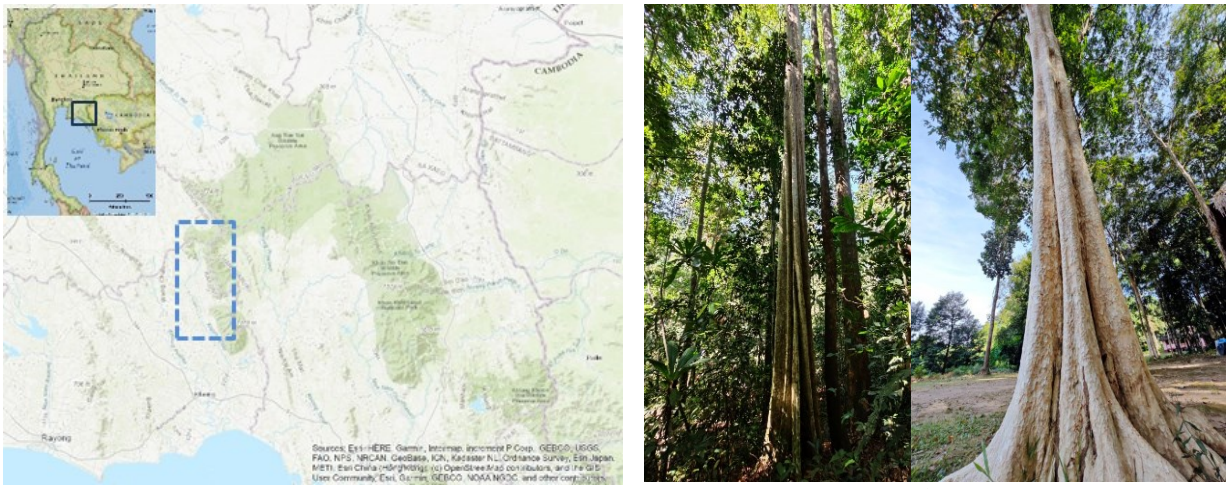
2) การสร้างรูปทรงหน้าตัดและคำนวณพื้นที่หน้าตัดจริง (Cross-sectional reconstruction)

รูปทรงหน้าตัดลำต้นที่ได้จากการคัดลอกถูกถ่ายลงบนกระดาษปรู๊ฟที่กำหนดพิกัดทั้ง 4 มุม ตามมาตราส่วนจริง จากนั้นสแกนภาพเป็นไฟล์ดิจิทัล และนำเข้าสู่โปรแกรม ArcMap เพื่อทำการกำหนดพิกัดอ้างอิง (Georeferencing) โดยใช้จุดพิกัดทั้งสี่มุมเป็นตัวควบคุม หลังจากนั้นทำการดิจิไทซ์เส้นขอบรูปทรงหน้าตัดของลำต้นแต่ละต้น และคำนวณพื้นที่หน้าตัดจริงของลำต้นด้วยเครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ในโปรแกรม ArcMap จากค่าพื้นที่หน้าตัดที่ได้ จึงคำนวณเส้นรอบวงลำต้นที่ควรเป็นตามพื้นที่หน้าตัดจริงโดยใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวงกลม

3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ (Statistical analysis)

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (Measured buttressed GBH) กับเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (Girth derived from actual basal

area) ในการศึกษานี้ กำหนดให้ GBH_mb แทนค่าขนาดเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (เซนติเมตร) และ GBH_pred แทนค่าขนาดเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (เซนติเมตร) โดยใช้การวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) ตามวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares method) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



A) B)

Figure 1 A) Study area, and B) ridge buttress of *L. floribunda*, which commonly occurs along the trunk.

4) การทดสอบสมการ (Equation validation)

สมการที่พัฒนาขึ้น นำมาทดสอบกับตัวอย่างอีกชุดของตะแบกนา (*L. floribunda*) และอีก 2 ชนิด ที่มีลักษณะพูพอนตามลำต้นใกล้เคียงกับตะแบกนา (*L. floribunda*) คือ แคหัวหมู (*Markhamia stipulata* (Wall.) Seem. var. *stipulata*) และกระบก (*I. malayana*) ที่พบได้ในพื้นที่ศึกษา โดยทำการเก็บตัวอย่างวิธีเดียวกับต้นที่ใช้สร้างสมการ ตัวอย่างไม้ที่ใช้ทดสอบสมการมีขนาดความโตที่กระจายในช่วงต่าง ๆ ชนิดละ 38, 10 และ 7 ต้น ตามลำดับ นำมาทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าขนาดเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงและค่าที่ได้จากการคาดการณ์ด้วยสมการ โดยตรวจสอบการแจกแจงของค่าความแตกต่างแบบจับคู่ (Paired differences) สำหรับแต่ละชนิดไม้โดยใช้การทดสอบ Shapiro–Wilk เพื่อประเมินสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล หากข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าว จึงใช้การทดสอบ Paired-samples t-test ในการเปรียบเทียบค่า ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $\alpha = 0.05$

ผลและวิจารณ์ (Results and Discussion)

1. ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงที่วัดรวมพูพอนและที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง

สมการความสัมพันธ์ระหว่างเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (Measured buttressed girth) และเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (Girth derived from actual basal area, GBH_pred) ของตะแบกนา (*L. floribunda*) ที่มีพูพอน เป็นไปตามสมการ

$$GBH_pred = 3.266 + 0.874 \times GBH_mb,$$

เมื่อกำหนดให้ GBH_pred คือ เส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง (cm) และ GBH_mb คือ เส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน (Measured buttressed girth, cm) โดยมีค่า $R^2 = 0.989$ แสดงว่าตัวแปรอิสระสามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามได้ถึงร้อยละ 98.9 ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นในระดับสูงมาก ค่าสัมประสิทธิ์ความชันของตัวแปรเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน 0.874 และมีนัยสำคัญทางสถิติสูง ($p < .001$) บ่งบอกว่าเมื่อเส้นรอบวงลำต้นที่วัดรวมพูพอน เพิ่มขึ้น 1 เซนติเมตร เส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริง จะเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.874 เซนติเมตร และค่าความชันที่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงถึงลักษณะทางสัณฐานของพูพอนที่ขยายออกด้านข้างมากกว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ กล่าวคือ การวัดเส้นรอบวงที่รวมส่วนยื่นของพูพอนจะเพิ่มค่าความยาวเส้นรอบวงในอัตราที่สูงกว่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดจริง ซึ่งความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีลักษณะเป็นอคติเชิงระบบ โดยสามารถอธิบายได้จากลักษณะสัณฐานของพูพอนที่เพิ่มความยาวเส้นรอบวงโดยไม่เพิ่มพื้นที่หน้าตัดอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้จึงเป็นผลลัพธ์ของการแปลงค่าจากรูปทรงไม่สม่ำเสมอสู่รูปทรงสมมูลเชิงเรขาคณิต และสมการความสัมพันธ์มีค่า intercept = 3.266 และมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.024$) ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การวัดเส้นรอบวงลำต้นที่รวมพูพอนมีแนวโน้มให้ค่าสูงกว่าความเป็นจริง สอดคล้องกับการศึกษาของ Ngomanda *et al*. (2012) และในช่วงขนาดลำต้นที่วัดเส้นรอบวงรวมพูพอนต่ำกว่าประมาณ 26 เซนติเมตร จะให้ค่าขนาดเส้นรอบวงที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง ซึ่งเป็นผลจากรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นที่มีค่าคงที่เป็นบวก และการที่ตัวอย่างในกลุ่มต้นขนาดเล็กมีอิทธิพลต่อการประมาณพารามิเตอร์ของสมการน้อยกว่ากลุ่มต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ต้นไม้ขนาดเล็กอาจยังไม่พัฒนารูปทรงพูพอนอย่างชัดเจน ทำให้การวัดรวมพูพอนไม่ได้ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในทิศทางเดียวกับต้นไม้ขนาดใหญ่ ส่วนการกระจายของข้อมูลตามกราฟ (Figure 2A) แสดงให้เห็นว่าจุดข้อมูลส่วนใหญ่เรียงตัวอยู่ใกล้เส้นถดถอย บ่งบอกถึงความเหมาะสมของการใช้สมการเชิงเส้นในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองอย่างชัดเจน

2. การทดสอบสมการระหว่างชนิด

ผลการทดสอบ Shapiro–Wilk ของค่าความแตกต่างระหว่าง GBH ที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงและค่าที่ได้จากสมการของไม้ทั้ง 3 ชนิดที่นำมาทดสอบสมการ มีการแจกแจงแบบปกติ ($p > 0.05$) โดยค่าความแตกต่างระหว่าง GBH ของตะแบกนา ที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงและค่าที่ได้จากสมการไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.543$) แสดงว่าสมการสามารถทำนายค่า GBH ของตะแบกนา ที่ใช้ทดสอบสมการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และไม่มีอคติเชิงระบบในทิศทางสูงหรือต่ำเกินจริง ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในระดับต่ำมาก (- 0.437 เซนติเมตร) เมื่อทดสอบสมการกับไม้ต่างชนิด พบว่า แคหัวหมู (*M. stipulata* var. *stipulata*) ให้ผลทำนายไม่แตกต่างจากค่าจริง ($p = 0.486$) โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำ (0.752 เซนติเมตร) และ

ทิศทางของค่าคลาดเคลื่อนกระจายตัวรอบศูนย์ แสดงว่าสมการนี้สามารถประยุกต์ใช้กับแคหัวหมู (*M. stipulata* var. *stipulata*) ที่มีลักษณะสัณฐานพูพอนเป็นแผ่นครีบต่อเนื่องคล้ายตะแบกนา (*L. floribunda*) ในขณะที่การทดสอบกับกระบก (*I. malayana*) ซึ่งมีโครงสร้างพูพอนแตกต่างจากตะแบกนา จึงให้ผลต่างออกไป โดยแม้ความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่สมการทำนายจะไม่ถึงระดับนัยสำคัญ ($p = 0.084$) แต่มีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงกว่าอีก 2 ชนิด (14.6 เซนติเมตร) และมีความแปรปรวนสูงกว่า (Table 1 และ Figure 2B) สะท้อนความจำเป็นของการพิจารณาลักษณะเชิงสัณฐานควบคู่กับการประยุกต์ใช้สมการ

Table 1 Paired comparison between observed and predicted stem girth across species.

Species	n	Buttressed stem girth range (cm)	Mean paired difference (cm)	SE of difference
L. floribunda	38	14–215	–0.44	0.71
M. stipulata var. *stipulata*	10	70–150	0.75	1.62
I. malayana	7	53–425	14.6	7.02

Note. Positive values indicate underestimation by the model.

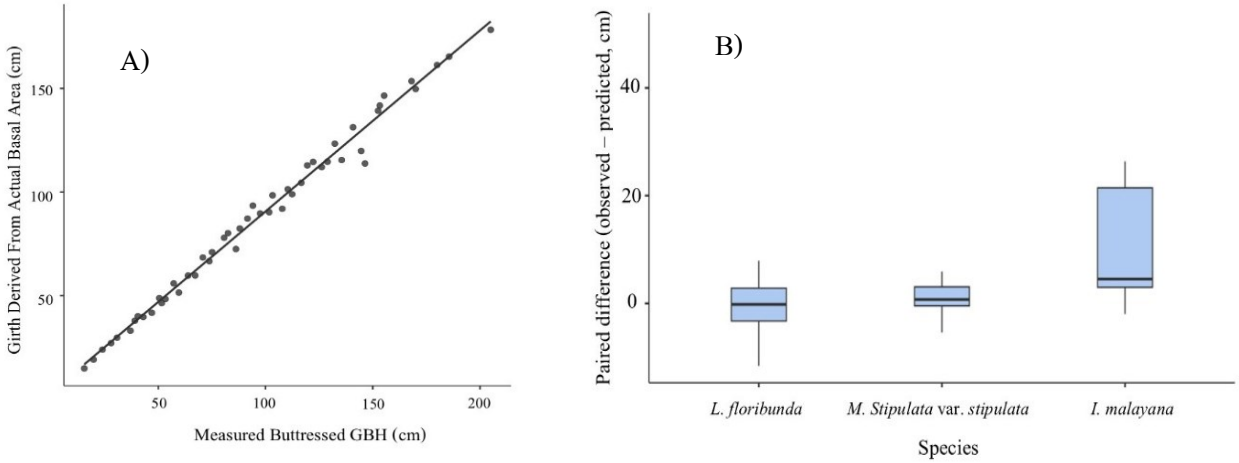


Figure 2 Relationship between measured buttressed GBH and girth derived from actual basal area in *L. floribunda* (A) and boxplots showing paired differences between observed and predicted stem girth for three tree species (B).

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า พูพอนของตะแบกนา ส่งผลให้การวัดขนาดลำต้นด้วยวิธีมาตรฐานที่ระดับความสูง 1.30 เมตร ให้ค่าความโตสูงเกินกว่าสัณฐานจริงของลำต้น โดยความคลาดเคลื่อนดังกล่าวสามารถอธิบายและปรับแก้ได้อย่างเป็นระบบด้วยสมการเชิงสถิติ ดังนั้น สมการปรับแก้ที่พัฒนาขึ้นจึงมีประสิทธิภาพสูงในการปรับแก้ขนาดลำต้นที่ได้รับอิทธิพลจากพูพอน โดยเฉพาะในกรณีต้นไม้ที่มีสัณฐานพูพอนใกล้เคียงกับตะแบกนา

โดยสามารถนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติได้ทั้งในงานสำรวจทรัพยากรป่าไม้และการติดตามการเจริญเติบโตของไม้ในแปลงตัวอย่างถาวร อย่างไรก็ตาม การนำสมการไปใช้กับไม้ชนิดอื่นควรพิจารณาความใกล้เคียงทางสัณฐานของพูพอนและควรมีการทดสอบหรือพัฒนาสมการเฉพาะชนิดเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประยุกต์ใช้งาน

ทั้งนี้ การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนแยกตามกลุ่มขนาดความโตในการทดสอบครั้งนี้ไม่พบแนวโน้มของความแตกต่างในเชิงระบบ โดยค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบศูนย์อย่างสม่ำเสมอในทุกกลุ่มขนาดต้นไม้ สนับสนุนความเหมาะสมของสมการในการใช้งานเชิงปฏิบัติได้ในทุกขนาดไม้ แต่อย่างไรก็ดี การประเมินความเหมาะสมของสมการในครั้งนี้อาศัยการวิเคราะห์รูปแบบของค่าคลาดเคลื่อนเป็นหลัก เพื่อพิจารณาว่ามีแนวโน้มของอคติตามขนาดความโตหรือไม่ ทั้งนี้ การทดสอบเชิงปริมาณเพิ่มเติมเกี่ยวกับความแตกต่างของพารามิเตอร์ระหว่างกลุ่มขนาดอาจเป็นแนวทางสำหรับการศึกษาต่อไป

สำหรับจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการพัฒนาสมการในครั้งนี้ แม้ว่าจะมีจำนวนจำกัด (n = 50) อาจดูไม่มากในเชิงตัวเลข แต่การออกแบบการสุ่มตัวอย่างให้ครอบคลุมช่วงขนาดลำต้นอย่างเป็นระบบ ภายใต้เงื่อนไขการสุ่มแบบแบ่งชั้นขนาด (Size-class stratification) เพื่อให้ครอบคลุมช่วงขนาดความโตของลำต้นอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ จึงลดความเอนเอียงจากการกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงขนาดใดขนาดหนึ่ง อีกทั้งขั้นตอนการเก็บข้อมูลซึ่งต้องอาศัยการคัดลอกรูปร่างหน้าตัดลำต้นจริงและการดิจิไทซ์อย่างละเอียด ส่งผลให้จำนวนตัวอย่างถูกจำกัดโดยข้อจำกัดเชิงภาคสนาม อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้จากการศึกษา ประกอบกับผลการทดสอบสมการกับไม้ต่างชนิด แสดงให้เห็นว่าสมการดังกล่าวสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดรวมพูพอนและค่าที่คำนวณจากพื้นที่หน้าตัดจริงได้อย่างมีเสถียรภาพภายในขอบเขตของสัณฐานพูพอนที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ การเพิ่มจำนวนตัวอย่างและการทดสอบในพื้นที่หรือสภาพแวดล้อมที่หลากหลายยิ่งขึ้นจะช่วยเพิ่มความทั่วไปของสมการในอนาคต และการนำสมการไปใช้ควรจำกัดอยู่ในช่วงขนาดลำต้นที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ใช้สร้างสมการ และควรหลีกเลี่ยงการประยุกต์ใช้กับต้นไม้ขนาดเล็กกว่า 26 เซนติเมตร เพราะการพัฒนาพูพอนของไม้ขนาดเล็กยังไม่เต็มที่

สรุป (Conclusion)

พูพอนของไม้บางชนิดที่เป็นแผ่นรูปครีบสูงตามแนวลำต้นและขยายระดับความสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเจริญเติบโตขึ้น เป็นข้อจำกัดสำคัญต่อการวัดขนาดความโตลำต้น ทำให้ยากต่อการกำหนดตำแหน่งวัดที่แน่นอน โดยเฉพาะในกรณีที่จำเป็นต้องติดตามการเจริญเติบโตซ้ำในระยะยาว การวัดขนาดลำต้นเหนือระดับพูพอนแม้จะช่วยหลีกเลี่ยงผลของรูปทรงลำต้นที่ผิดปกติ แต่มีแนวโน้มก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ เนื่องจากลำต้นเรียวเล็กลงตามความสูง ส่งผลให้ค่าความโต ชีวมวล และการกักเก็บคาร์บอนถูกประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง การศึกษานี้จึงเสนอทางเลือกโดยการวัด

เส้นรอบวงลำต้นรวมพูพอนที่ระดับมาตรฐาน (1.30 เมตร) และปรับแก้ค่าด้วยสมการความสัมพันธ์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งช่วยให้สามารถใช้ตำแหน่งวัดที่คงที่และลดอคติจากรูปทรงพูพอนได้อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ของสมการที่ได้ยังสะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างพูพอนมีผลต่อการวัดเชิงเรขาคณิตมากกว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดจริง กล่าวคือ ส่วนยื่นของพูพอนมีลักษณะเป็นแผ่นครีบที่เพิ่มความยาวเส้นรอบวงในเชิงเส้น แต่ไม่ได้เพิ่มพื้นที่หน้าตัดในสัดส่วนเดียวกัน และสนับสนุนการใช้สมการปรับแก้เชิงประจักษ์ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการวัดรวมพูพอนได้

แนวทางที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีส่วนช่วยยกระดับความเป็นมาตรฐานของการวัดลำต้นในงานสำรวจป่าไม้เขตร้อน และเป็นวิธีการเชิงปฏิบัติที่สามารถนำไปใช้เพื่อลดผลกระทบจากความไม่สม่ำเสมอของรูปทรงลำต้นในไม้ที่มีพูพอน และมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับแปลงตัวอย่างถาวร (permanent sample plots) ที่ต้องการความสม่ำเสมอของตำแหน่งวัดเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินอัตราการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลในระยะยาว อย่างไรก็ตาม สมการปรับแก้นี้เหมาะสำหรับไม้ที่มีลักษณะพูพอนใกล้เคียงกับตะแบกนา (*L. floribunda*) และไม่ควรนำไปใช้กับไม้ที่มีสัณฐานพูพอนแตกต่างอย่างชัดเจนโดยปราศจากการทดสอบเพิ่มเติม นอกจากนี้ ผลลัพธ์ดังกล่าวยังสนับสนุนแนวคิดว่าการปรับแก้ค่าความโตลำต้นในไม้ที่มีพูพอนควรพิจารณารูปทรงเรขาคณิตควบคู่กับโครงสร้างเชิงสัณฐาน เพื่อเพิ่มความแม่นยำของการประเมินเชิงนิเวศ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณนิรามัย คิดดี ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามตลอดจนการจัดการข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยเฉพาะการนำภาพหน้าตัดลำต้นเข้าสู่ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ขอขอบคุณ คุณศิริชัย คำกลั่น ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นอย่างดี ความร่วมมือและการสนับสนุนของทั้งสองท่าน (ซึ่งเป็นเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยและพัฒนานวัตกรรมอุทยานแห่งชาติ จังหวัดเพชรบุรี) ที่มีส่วนสำคัญในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง (References)

Brown, S. 1997. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer (FAO Forestry Paper No. 134)**. Food and Agriculture Organization. https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B., & Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia** 145: 87–99. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x

Cushman, K. C., Muller-Landau, H. C., Condit, R. S., & Hubbell, S. P. 2014. Improving estimates of biomass change in buttressed trees using tree taper models. **Methods in**

Ecology and Evolution 5(6), 573–582. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12184

Henry, M., Picard, N., Trotta, C., Manlay, R. J., Valentini, R., Bernoux, M., & Saint-André, L. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. **Silva Fennica** 45(3B): 477–569. https://doi.org/10.14214/sf.38

Kershaw, J. A., Ducey, M. J., Beers, T. W., & Husch, B. 2017. **Forest Mensuration** (5th ed.). John Wiley & Sons.

Ngomanda, A., Mavouroulou, Q. M., Obiang, N. L. E., Lebamba, J., Mbatchi, B., Gomat, H., Mankou, G. S., Loumeto, J., Midoko Iponga, D., Kossi, D., & Picard, N. 2012. Derivation of diameter measurements for buttressed trees: An example from Gabon. **Journal of Tropical Ecology** 28(3): 299–302. https://doi.org/10.1017/S0266467412000144

Nölke, N., Fehrmann, L., Vasile, C. R., Groeneveld, J., Kleinn, C., & Leuschner, C. 2015. On the geometry and allometry of big-buttressed trees: A challenge for forest monitoring. **iForest – Biogeosciences and Forestry** 8: 574–581. https://doi.org/10.3832/ifor1449-007

Peters, C. M. 1996. **The ecology and management of non-timber forest resources**. World Bank.

Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. 2012. **Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction**. Food and Agriculture Organization and CIRAD.

Richards, P. W. 1996. **The tropical rainforest: An ecological study** (2nd ed.). Cambridge University Press.

Royal Institute. 2011. **Dictionary of the Royal Institute B.E. 2554**. Retrieved from https://dictionary.orst.go.th (in Thai)

Warner, A., Jamroenprucksa, M., & Puangchit, L. 2017. Buttressing impact on diameter estimation in plantation teak (*Tectona grandis* L.f.) sample trees in northern Thailand. **Agriculture and Natural Resources** 51(6): 520–525. https://doi.org/10.1016/j.anres.2017.12.003

Watcharakitti, S. 1982**. Forest resource inventory**. Faculty of Forestry, Kasetsart University, Thailand. (in Thai)

Whitmore, T. C. 1998. **An introduction to tropical rain forests** (2nd ed.). Oxford University Press.

Hu, Z., Tang, Y., Deng, X., & Chen, M. 2013. Buttress trees in a 20-hectare tropical dipterocarp rainforest in Xishuangbanna, SW China. **Journal of Plant Ecology** 6: 187–192. https://doi.org/10.1093/jpe/rts018