

ความสัมพันธ์เชิงอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระดูกและเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของชนิด
พันธุ์ไม้เด่นในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Allometric relationships between sapwood thickness and diameter at breast height of
dominant tree species in Khao Yai National Park



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science

Inter-Department of Environmental Science

GRADUATE SCHOOL

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์เชิงอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระดูก และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของชนิดพันธุ์ไม้เด่นใน อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่
โดย	นายศิริพงษ์ แยมพุ่ม
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พันทนา ตอเงิน

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุธนา ฉัพพรรณรัตน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.พันทนา ตอเงิน)

..... กรรมการ
(ดร.บัวหลวง ฝ้ายเชื้อ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิสา เหล็กสูงเนิน)

ศิริพงษ์ แยมฟู่ม : ความสัมพันธ์เชิงอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของชนิดพันธุ์ไม้เด่นในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่. (Allometric relationships between sapwood thickness and diameter at breast height of dominant tree species in Khao Yai National Park) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร. พันธนา ต่อเงิน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างสมการอัลโลเมตริกระหว่างความหนากระพี้กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของพันธุ์ไม้เด่นจำนวน 14 ชนิดพันธุ์ ในป่าปฐมภูมิและป่าทุติยภูมิ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ โดยวัดความหนาของกระพี้ไม้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และใช้เทคนิควิเคราะห์การถดถอย เพื่อหารูปแบบสมการที่เหมาะสมในการสร้างสมการอัลโลเมตริก ผลการศึกษาพบว่า ชนิดพันธุ์ไม้เหล่านี้มีความหนาของกระพี้โดยเฉลี่ย 7.6 – 24.8 เซนติเมตร คิดเป็น 46.7% – 99.3% ของรัศมีของลำต้น เมื่อวิเคราะห์โดยแยกชนิดพันธุ์ พบว่า สมการยกกำลังและสมการเส้นตรงเป็นสมการอัลโลเมตริกที่เหมาะสมกับชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษาย่างมีนัยสำคัญ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ในช่วง 0.46 -0.99 มีค่า p น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.04 และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทุกชนิดพันธุ์ยกเว้น ยางเสียน (*Dipterocarpus gracilis* blume) พบว่าสามารถสร้างสมการอัลโลเมตริกเพื่อใช้กับทุกชนิดพันธุ์ได้ ($r^2 = 0.86, p < 0.0001$) โดยมีรูปแบบสมการดังนี้ $y = 0.57x^{0.91}$ นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการเพิ่มเติมโดยใช้การวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) เพื่อยืนยันความแม่นยำของสมการ โดยสมการอัลโลเมตริกของกระพี้ไม้ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะช่วยในการประเมินอัตราการคายน้ำในระดับพื้นที่ของป่าเขตร้อนในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สห สาขาวิชา) ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2564 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6280089120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD: Allometric equation Sapwood thickness diameter at breast height
dominant species

Siriphong Yaemphum : Allometric relationships between sapwood thickness and diameter at breast height of dominant tree species in Khao Yai National Park. Advisor: Assoc. Prof. PANTANA TOR-NGERN, Ph.D.

This study aimed to develop allometric equations between sapwood thickness and diameter at breast height (DBH) for 14 dominant tree species in primary forest and secondary forest in Khao Yai National Park. We applied regression analysis to the measured sapwood thickness and DBH to develop the allometric equations. Results showed that average sapwood thickness of the dominant species ranged 7.6 – 24.8 cm or 46.7% – 99.3% of basal area. Regression analysis showed that power and linear equations significantly explained the data when being analyzed separately by species ($r^2 = 0.46 - 0.99$, $p \leq 0.04$). Additionally, a single equation significantly described the relationship for all species and forest stages, except for *Dipterocarpus gracilis* blume ($r^2 = 0.86$ $p < 0.0001$), has the pattern equation $y = 0.57x^{0.91}$. Finally, examine the allometric equation using residual analysis to confirm accuracy of allometric equation. The developed allometric equations will improve the estimation of canopy transpiration in Khao Yai forest and may be used in other Thai forests with similar tree species.

Field of Study: Environmental Science

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของ รองศาสตราจารย์ ดร. พันธนา ตอเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ เกี่ยวกับ วิทยานิพนธ์ มาโดยตลอด จึงกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ได้

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วรเรณ บรอกเคลแมน รองศาสตราจารย์ ดร.วิรงค์ จันทร และ คุณ อนุตตรา ณ ถลาง ที่ให้ข้อมูลชนิดพันธุ์ไม้ที่ทำการศึกษในป่าปฐมภูมิ และป่าทุติยภูมิ บริเวณ อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ เพื่อใช้ประกอบการคัดเลือกพันธุ์ไม้ในการศึกษา ขอขอบคุณความช่วยเหลือในงานภาคสนามจาก คุณรัฐศาสตร์ สมนึก คุณรัชชานนท์ อัมพรพิทักษ์ และ คุณปรางวิสัย ขอบปี งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.; รหัสโครงการ P-18-51395) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.; รหัสโครงการ RDG6230006)

ศิริพงศ์ แยมพุ่ม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง	ง
กิตติกรรมประกาศ..... จ	จ
สารบัญ..... ฉ	ฉ
สารบัญภาพ..... ช	ช
สารบัญตาราง..... ฎ	ฎ
บทที่ 1..... 7	7
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 7	7
1.2 วัตถุประสงค์..... 11	11
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 11	11
1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย..... 11	11
บทที่ 2..... 7	7
2.1 งบดุลของน้ำในระบบนิเวศป่า (Water budget in forest ecosystem)..... 7	7
2.1.1 ประโยชน์ในการศึกษาของงบดุลน้ำในระบบนิเวศป่า..... 7	7
2.1.2 วัฏจักรน้ำกับระบบนิเวศป่า..... 8	8
2.1.3 สมการงบดุลน้ำในระบบนิเวศป่า..... 9	9
2.2 ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบหลักของงบดุลน้ำ..... 13	13
2.3 การตรวจวัดองค์ประกอบหลักของงบดุลน้ำ..... 15	15
2.3.1 การตรวจวัดปริมาณน้ำฝน..... 15	15
2.3.2 การตรวจวัดน้ำท่า..... 17	17
2.3.3 การตรวจวัดการคายระเหยในระบบนิเวศป่า..... 17	17

2.4 การวัดการคายน้ำในระบบนิเวศป่า.....	20
2.4.1 เทคนิคการวัดการคายน้ำของป่า.....	20
2.4.1.1 การไหลของน้ำในต้นไม้ (sap flow).....	20
2.5 การวัดความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness).....	22
2.5.1 การวัดความหนาของกระพี้.....	22
2.5.1.1 เทคนิคการวัดความหนาของกระพี้โดยทำการทำลายต้นไม้.....	22
2.5.1.2 เทคนิคการวัดความหนากระพี้ที่ไม่ทำลายต้นไม้.....	24
2.5.2 การสร้างสมการอัลโลเมตริก.....	28
บทที่ 3.....	38
3.1 พื้นที่ศึกษา.....	38
3.2 การคัดเลือกชนิดพันธุ์.....	40
3.3 วิธีการวัดความหนาของกระพี้ในต้นไม้.....	42
3.3.1 การเก็บตัวอย่างแกนไม้เพื่อวัดความหนาของกระพี้.....	42
3.3.2 การย้อมสีตัวอย่างแกนไม้.....	42
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	43
บทที่ 4.....	44
4.1 ข้อมูลพื้นฐานของชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา.....	44
4.2 การสร้างสมการอัลโลเมตริก.....	48
บทที่ 5.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	1
ประวัติผู้เขียน.....	18

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 ภาพแสดงลักษณะองค์ประกอบของเนื้อไม้ตัดแปลงจาก	8
ภาพที่ 1.2 แสดงปริมาณน้ำในเขื่อนลำตะคอง(ล้านลูกบาศก์เมตร) เป็นระดับน้ำรายเดือนที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ.2561 (แห้งลายทแยง) 2562 (แห้งสีดำ) และ 2563 (แห้งสีขาว) ในช่วงที่แรเงาแสดงถึงฤดูฝนโดยอยู่ในช่วงพฤษภาคม – ตุลาคม.....	10
ภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการของวัฏจักรของน้ำในระบบนิเวศป่า.....	8
ภาพที่ 2.2 อธิบายวิธีการตรวจวัดการคายระเหยในระบบนิเวศป่า โดยใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบหมุนวน (Eddy covariance technique, EC).....	19
ภาพที่ 2.3 แสดงระบบของการวัดอัตราการไหลของน้ำ (Sap flow) แบบสมบูรณ์.....	21
ภาพที่ 2.4 แสดงถึงลักษณะของตัวอย่างที่ถูกตัดโค่นลงมาจากต้นไม้ และผ่านการย้อมสี (0.1% indigo carmine) ภาพ ก แสดงถึงกระพี้ และแก่นไม้ในต้นไม้ ภาพ ข แสดงถึงตัวอย่างหลังจากการย้อมสี	23
ภาพที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะตัวอย่างที่ถูกทำในวิธี Computerized Tomography Scan;	23
ภาพที่ 2.6 ภาพแสดงตัวอย่างต่อไม้ที่ทำการวัดโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ ภาพ ก) แสดงถึงตัวอย่างในพื้นที่หน้าตัดของต่อไม้ที่ทำการศึกษา ภาพ ข) แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดต่อไม้ที่ผ่านการวิเคราะห์แล้ว	24
ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะพื้นที่ของตัวอย่างแก่นไม้ โดยแบ่งได้เป็น เปลือกไม้ (Bark) กระพี้ (Sapwood) และแก่นไม้ (Heartwood) ของชนิดพันธุ์ <i>Tectona grandis</i>	25
ภาพที่ 2.8 แสดงการวัดขนาดความหนาของกระพี้และลักษณะของตัวอย่างแก่นไม้โดยใช้สีย้อมเมทิลออเรนจ์ 0.1 %	25
ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะของตัวอย่างแก่นไม้โดยใช้เทคนิคการวัดภายใต้แสงอาทิตย์โดยตัวอย่างแก่นไม้ ทำให้เห็นถึงแก่นไม้และกระพี้ ของชนิดพันธุ์ <i>Pseudotsuga Menziesii</i>	26
ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะของตัวอย่างเมื่อทำการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอเล็กตรอน	27

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 2.11 ลักษณะภายในลำต้นของต้นไม้ โดยสามารถแบ่งตามสีอย่างชัดเจน สีน้ำเงินคือกระพี้ไม้ (Sapwood) ตำแหน่งสีเหลืองเป็นพื้นที่ที่กำลังจะเปลี่ยนเป็นแก่นไม้ส่วนสีแดงแสดงถึงพื้นที่แก่นไม้ (Heartwood).....	27
ภาพที่ 3.1 แสดงแผนที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประเทศไทย อัตราส่วน 1: 600,000 จุดสีแดงแสดงพื้นที่แปลงวิจัยมอสิงโต (Primary forest) จุดสีเหลืองแสดงถึงพื้นที่แปลงวิจัยหนองซิง (Secondaryforest).....	39
ภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนและวิธีการในการเก็บตัวอย่างเนื้อไม้เพื่อวัดความหนาของกระพี้.....	42
ภาพที่ 3.3 แสดงรูปตัวอย่างแก่นไม้ที่ทำการศึกษา	43
ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ ยางเสียน (<i>D. gracilis</i> ; ก และ ข) และ สีเสียดเทศ (<i>C. axillaris</i> ; ค และ ง).....	51
ภาพที่ 4. 2 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ เหมีอดดง (<i>S. cochinchinensis</i> ; ก และ ข) สุรามะริด (<i>C. subavenium</i> ; ค และ ง) และ หนอนขี้ควาย (<i>G.nervosa</i> ; จ และ ช)	52
ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ อินทวา (<i>M. gamblei</i> ; ก และ ข) คันทาก (<i>M. pentandra</i> ; ค และ ง) และ ทะโล้ (<i>S. wallichii</i> ; จ และ ช).....	53
ภาพที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ สะตีดั้ง (<i>S. signun</i> ; ก และ ข) <i>I. chevalieri</i> (ค และ ง) และ หัวฤเขา (<i>S. nervosum</i> ; จ และ ช) วงกลมสีดำแสดงถึงข้อมูลจากป่าปฐมภูมิ (PF) และวงกลมสีขาวแสดงถึงข้อมูลจากป่าทุติยภูมิ (SF).....	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ชม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ชม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ใน ชนิดพันธุ์ ตั้วเกลี้ยง (<i>C. cochinchinense</i> ; ก และข) เสม็ดแดง (<i>S. antisepticum</i> ; ค และ ง) และ พิกุลป่า (<i>A. integerrima</i> ; จ และ ช).....	55
ภาพที่ 4. 6 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนาของกระพี้ไม้ (ชม.) และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (ชม.) ของชนิดพันธุ์ไม้เด่นที่ทำการศึกษา ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประเทศไทย สัญลักษณ์วงกลมสีดำแสดงถึงข้อมูลของทุกชนิดพันธุ์ และวงกลมสีขาวแสดงเฉพาะ ชนิดพันธุ์ ยางเสียน (<i>D. gracilis</i>).....	56

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สรุปผลการศึกษาเกี่ยวกับสมการอัลโลเมตริกในป่า.....	33
ตารางที่ 3.1 สรุปข้อมูลพื้นที่การศึกษา.....	39
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลพื้นฐานของชนิดพันธุ์ต้นไม้ในพื้นที่การศึกษาของแปลงวิจัยมอสิงโต (Primary forest; PF) แปลงวิจัยหนองซิง (Secondary forest; SF).....	41
ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลชนิดพันธุ์ของต้นไม้ที่ทำการศึกษา ในพื้นที่ป่าปฐมภูมิ (PF) และป่าทุติยภูมิ (SF) พร้อมทั้งข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ จำนวนตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at Breast Height ; DBH) ความหนาของเปลือกไม้ (Bark thickness ; BT) ความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness ; ST) และสัดส่วนของความหนาของกระพี้ต่อรัศมีต้นไม้ (Ratio of sapwood thickness to stem radius ; SR) โดยแสดงค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	46
ตารางที่ 4.2 สรุปการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression analysis) โดยมีรูปแบบที่เหมาะสม 2 สมการได้แก่ สมการ ยกกำลัง (Power ; $y = ax^b$) และ สมการเส้นตรง (Linear ; $y = b + ax$) โดยค่า x คือเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และค่า y คือความหนาของกระพี้ไม้ ในหน่วยเซนติเมตร n คือ จำนวนของตัวอย่างของชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา, r^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, p คือค่า นัยสำคัญทางสถิติและ SEE คือ การประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของสมการถดถอย	60
ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลของชนิดพันธุ์ ยางเสียน (<i>D. gracilis</i>), พร้อมทั้งข้อมูลพื้นฐานได้แก่ ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at Breast Height ; DBH) ความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness ; ST) และสัดส่วนของความหนาของกระพี้ต่อรัศมีต้นไม้ (Ratio of sapwood thickness to stem radius ; SR) โดยแสดงค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

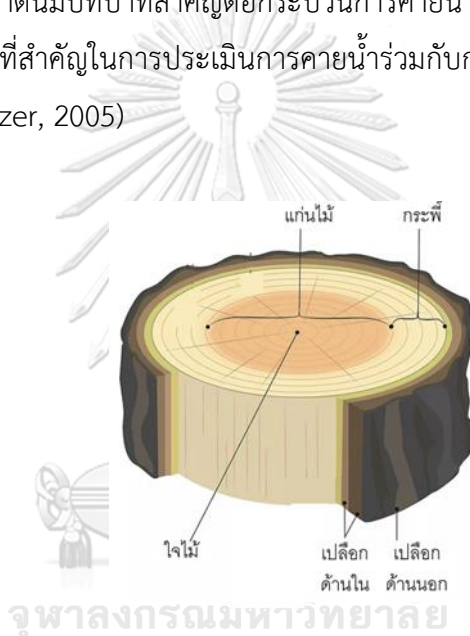
ทรัพยากรน้ำ เป็นแหล่งอุปโภคและบริโภคหลักของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ โดยมีแหล่งกำเนิดที่สำคัญมาจากป่าไม้ โดยป่าไม้มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดความชื้นในบรรยากาศ และก่อให้เกิดฝนผ่านกระบวนการคายระเหยน้ำ นอกจากนี้ป่าไม้ยังช่วยดูดซึมน้ำฝนในดินผ่านรากของพืช ทำให้ป่าชุ่มชื้น และก่อให้เกิดแหล่งน้ำที่สามารถนำไปใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ (พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุติกุล, 2552) แต่เนื่องด้วยผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันต่อระบบนิเวศป่า เช่น ภาวะแล้งที่ยาวนานและถี่ขึ้น ทำให้เกิดการล้มตายของต้นไม้ในป่าไม้หลายพื้นที่ แม้แต่ในป่าเขตร้อนที่เคยมีป่าไม้อันอุดมสมบูรณ์ เช่นในแถบลุ่มแม่น้ำแอมะซอน ก็ได้รับผลกระทบนี้ (Nepstad et al., 2007) ผลกระทบดังกล่าวอาจส่งผลให้ปริมาณน้ำที่ป่าไม้จะสามารถส่งต่อให้ระบบนิเวศปลายทางน้ำลดลงได้ หากพิจารณาถึงวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle) ในพื้นที่ที่ปกคลุมไปด้วยป่าไม้ จะมีองค์ประกอบหลักได้แก่ หยาดน้ำฟ้า (Precipitation; P) น้ำจากการคายระเหย (Evapotranspiration; ET) และน้ำท่า (Runoff; R) โดยแสดงความสัมพันธ์เชิงสมการระหว่างองค์ประกอบดังกล่าวตามหลักการสมดุลน้ำ (Water balance) รายปีได้ดังนี้ (Hasenmueller and Criss, 2013)

$$P = ET + R \quad (1.1)$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า หากปริมาณน้ำฝนหรือการคายระเหยเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น ภาวะแล้ง (Dai, Zhao and Chen, 2018) จะส่งผลให้ปริมาณน้ำท่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยน้ำท่าจะมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ ซึ่งจะใช้ประโยชน์ในการอุปโภค บริโภค การใช้ในการเกษตรและอุตสาหกรรม โดยหากปริมาณน้ำท่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอาจจะส่งผลกระทบต่อกิจกรรมเหล่านี้ได้ ในการศึกษาจะให้ความสำคัญกับการคายระเหยเป็นหลัก เนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับสังคมพืช โดยเฉพาะต้นไม้ในระบบนิเวศป่า โดยทั่วไปแล้ว การคายระเหย ประกอบด้วย 3 กระบวนการรวมกัน ได้แก่ การคายน้ำของต้นไม้ (Transpiration) การระเหยของน้ำบนใบไม้ในเรือนยอด (Canopy interception) และการระเหยของน้ำในดินหรือชั้นของเศษใบและกิ่งไม้ทับถมบนพื้นดินในป่า (Evaporation from soil and litter layer) จากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ศึกษาข้อมูลการประเมินองค์ประกอบของการคายระเหยของระบบนิเวศป่าทั่วโลก พบว่าการคายน้ำคิดเป็นสัดส่วนมากถึง 90% ของการคายระเหย (Jasechko et al., 2013) จึงอาจกล่าวได้ว่า หากเราสามารถตรวจวัดและติดตามอัตราการคายน้ำของระบบนิเวศป่าได้ ก็จะสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำท่าซึ่งนับเป็นแหล่งต้นน้ำของระบบนิเวศ

ปลายน้ำ จากความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการ (1.1) ได้ เนื่องจากการตรวจวัดปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่องตามสถานีตรวจวัดข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลพื้นฐานอยู่แล้ว ดังนั้น ความท้าทายหลักคือการประเมินอัตราการคายน้ำของระบบนิเวศป่า ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลที่ไม่ได้มีการตรวจวัดกันอย่างแพร่หลาย

ในปัจจุบัน หนึ่งในวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินการคายน้ำในระบบนิเวศป่า คือ การคำนวณอัตราการคายน้ำของเรือนยอดจากผลคูณระหว่างอัตราการไหลของน้ำ (Sap flow) และความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) โดยความหนาของกระพี้ คือส่วนที่ยังมีชีวิตของเนื้อไม้ มีการเจริญเติบโตอยู่ระหว่างเปลือกชั้นในและแก่นไม้ ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำภายในลำต้น ดังภาพที่ 1.1 ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำภายในลำต้นมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการคายน้ำของต้นไม้และของป่า ด้วยเหตุนี้กระพี้จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการประเมินการคายน้ำร่วมกับการวัดอัตราการไหลของน้ำในลำต้น (Gartner and Meinzer, 2005)



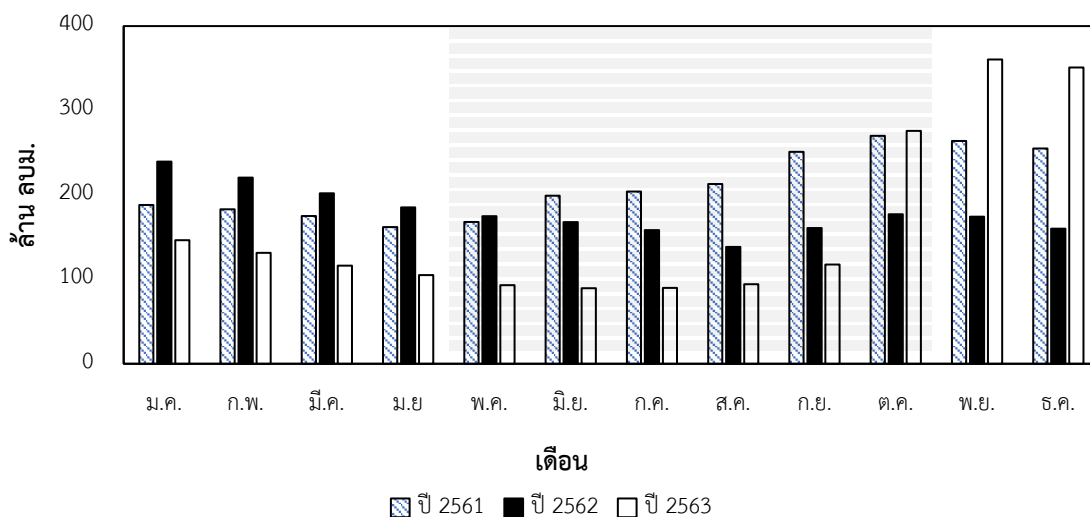
ภาพที่ 1.1 ภาพแสดงลักษณะองค์ประกอบของเนื้อไม้ตัดแปลงจาก (Gartner and Meinzer, 2005)

โดยการประเมินการคายน้ำที่ได้จากวิธีนี้จะให้ค่าที่แสดงถึงปริมาณน้ำที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยของความหนาของกระพี้ที่สัมพันธ์กับอุปกรณ์ตรวจวัดต่อเวลา (GRANIER, 1985; Oishi, Oren, and Stoy, 2008) ดังนั้น หากต้องการคำนวณอัตราการไหลของน้ำของทั้งต้น จำเป็นต้องมีข้อมูลความหนาของกระพี้ทั้งหมดของต้นไม้แต่ละต้น โดยอัตราการไหลของน้ำของต้นไม้ที่คำนวณได้จากข้อมูลสองชุดนี้ จะมีค่าใกล้เคียงกับอัตราการคายน้ำของต้นไม้ในช่วงเวลาหนึ่งวัน (Bosch, Marshall, and Teskey, 2014) หากจะประเมินอัตราการคายน้ำของต้นไม้ทั้งหมดในระบบนิเวศป่า จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทุกต้น เพื่อจะได้นำไปใช้ในการคำนวณดังกล่าวได้ อย่างไรก็ตาม การประเมิน

ความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทุกต้นเป็นเรื่องยาก ซึ่งต้องอาศัยวิธีการดังนี้ ได้แก่ การตัดไม้โดยตรงเพื่อทำการศึกษา การใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ (Increment borer) และ การใช้อุปกรณ์ Electrical Resistivity Tomography (ERT) เป็นต้น โดยหากทำในต้นไม้ทั้งหมดในป่าจะมีค่าใช้จ่ายสูง และรบกวนต้นไม้ รวมถึงอาจต้องทำการโค่นต้นไม้ทั้งหมดป่า ซึ่งไม่เป็นที่นิยมทำ ดังนั้นวิธีที่นิยมใช้ในการประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทางอ้อมคือ การสร้างสมการเชิงอัลโลเมตริกซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระพี้กับพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างของต้นไม้ โดยเฉพาะเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (diameter at breast height; DBH) และความสูง (Mitra et al., 2020) โดยสร้างสมการดังกล่าวจากข้อมูลที่วัดได้จากต้นไม้เพียงบางส่วนที่ถูกนำมาศึกษาบนพื้นฐานการสุ่มเลือกทางสถิติ นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสมการเชิงอัลโลเมตริกที่ใช้ในการคำนวณความหนาของกระพี้ในต้นไม้ นั้น มีความแตกต่างกันตามชนิดพันธุ์ของต้นไม้ และ สภาพแวดล้อม (ศศิธร พ่วงปาน, 2555) นอกจากนี้งานวิจัยส่วนใหญ่ทำการศึกษาในพื้นที่เขตอบอุ่นและเขตร้อน ซึ่งมีพันธุ์ไม้สน (coniferous species) เป็นพันธุ์ไม้หลัก (Sellin, 1994; Galván et al., 2012) จึงเกิดข้อจำกัดในการประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้ในป่าเขตร้อน เนื่องจากยังขาดสมการเชิงอัลโลเมตริกที่จำเพาะเจาะจงสำหรับชนิดพันธุ์ต้นไม้ในป่าเขตร้อน

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาสมการเชิงอัลโลเมตริกสำหรับใช้คำนวณความหนาของกระพี้ในต้นไม้ เพื่อนำไปใช้ประเมินอัตราการคายน้ำของระบบนิเวศป่าเขตร้อน โดยใช้พื้นที่ศึกษาเป็นแปลงมอสิงโต ซึ่งเป็นแปลงถาวรในบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ และเป็นส่วนหนึ่งของ ForestGeo Network อันเป็นองค์รณานาชาติและเป็นเครือข่ายแปลงวิจัยด้านป่าไม้และติดตามสภาพแวดล้อมของโลก (Brockelman, Nathalang, and Maxwell, 2017) จึงมีความเหมาะสมในด้านการทำการศึกษาในพื้นที่ อีกทั้งอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ เป็นแหล่งรวมความหลากหลายทางชีวภาพของทั้งพืชพรรณ และสัตว์ป่า โดยพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นป่าดิบเขา (Tangprasertsri, 2005) อีกทั้งเป็นแหล่งต้นน้ำที่สำคัญ ของแม่น้ำลำตะคอง ซึ่งเป็นแม่น้ำสายหลักของจังหวัดนครราชสีมา มีการใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ตลอดทั้งปีเช่น การปลูกข้าว ปลูกพืชผล และพืชไร่ โดยเฉพาะข้าวและข้าวโพด ที่มีการปลูกเป็นจำนวนมากในพื้นที่ และมีการใช้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ ได้แก่ การสร้างกระแสไฟฟ้าจากเขื่อนแม่น้ำลำตะคอง อุตสาหกรรมการแปรรูปทางการเกษตร การประมงน้ำจืด เป็นต้น รวมถึงมีการใช้ประโยชน์จากแม่น้ำลำตะคองในการใช้อุปโภคบริโภคของชุมชนในพื้นที่ โดยมีปริมาณน้ำที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ดังภาพที่ 1.2

ปริมาณน้ำในเขื่อนลำตะคอง



ภาพที่ 1. 2 แสดงปริมาณน้ำในเขื่อนลำตะคอง(ล้านลูกบาศก์เมตร) เป็นระดับน้ำรายเดือนที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ.2561 (แห่งลายทแยง) 2562 (แห่งสีดำ) และ 2563 (แห่งสีขาว) ในช่วงที่แรงาแสดงถึงฤดูฝนโดยอยู่ในช่วงพฤษภาคม – ตุลาคม (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ, 2563)

จากข้อมูลปริมาณน้ำจากกราฟข้างต้นจะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำมีการเปลี่ยนแปลงทุกปี โดยเฉพาะปี 2563 ที่มีความแปรปรวนของปริมาณน้ำมากที่สุด โดยในช่วงเดือนมกราคม จนถึงเดือนกันยายน มีปริมาณน้ำในเขื่อนน้อยกว่าปี 2561 และปี 2562 ซึ่งเป็นผลจากภัยแล้ง (สมาคมนักอุทกวิทยาไทย, 2563) ส่งผลให้มีปริมาณน้ำไม่พอใช้ในขณะนี้ แต่ในเดือนตุลาคม – ธันวาคม ของปี 2563 มีปริมาณน้ำในเขื่อนเพิ่มมากขึ้นกว่าปีที่ผ่านมาและเกิดปัญหาด้านอุทกภัย ซึ่งสร้างความเสียหายเป็นวงกว้างในพื้นที่ชุมชนระบบนิเวศปลายน้ำ (GISTDA, 2020) ความแปรปรวนเหล่านี้ส่วนหนึ่งอาจมีผลมาจากความแปรปรวนจากการคายน้ำของต้นไม้ในพื้นที่ที่ส่งผลต่อการคายระเหย และปริมาณน้ำท่า อนึ่ง การคายน้ำของต้นไม้จะแตกต่างกันตามชนิด อายุของต้นไม้ และสภาพแวดล้อมที่ต้นไม้เติบโตอยู่ ดังนั้น หากต้องการประเมินปริมาณน้ำท่าจากป่าจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับการคายน้ำของป่าในพื้นที่ของอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ซึ่งมีความหลากหลายทั้งในด้านโครงสร้างเรือนยอดของป่า และชนิดพันธุ์ของต้นไม้ โดยการสร้างสมการเชิงอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ โดยสมการเชิงอัลโลเมตริกนี้มีคุณค่าในการปรับระดับของการวัดการคายน้ำจากระดับต้นเป็นระดับพื้นที่ และใช้ประเมินร่วมกับข้อมูลการวัดการไหลของน้ำในลำต้น โดยชนิดพันธุ์ต้นไม้ที่ทำการศึกษา จะคัดเลือกจากชนิดพันธุ์ไม้เด่น 14 ชนิดในแปลงศึกษา เพื่อใช้เป็นตัวแทน

ของชนิดพันธุ์ต้นไม้ทั้งหมดในพื้นที่ ประโยชน์ที่คาดว่าจะรับจากการศึกษาครั้งนี้คือ ค่าของความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทั้งป่าจากสมการเชิงอัลโลเมตริกที่เหมาะสม และสามารถนำไปใช้ประเมินการคายน้ำในระบบนิเวศป่าในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ได้อย่างแม่นยำขึ้น รวมทั้งเป็นต้นแบบสำหรับการศึกษาคายน้ำในพื้นที่ที่เป็นระบบนิเวศป่าที่มีการประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้เฉพาะพื้นที่สำหรับป่าไม้แห่งอื่นในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสร้างสมการเชิงอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของชนิดพันธุ์ไม้เด่นในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1) ศึกษาพื้นที่ป่าในเขตอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประกอบด้วยระบบนิเวศป่า 2 ชนิด คือ ป่าปฐมภูมิ (Primary forest) และ ป่าทุติยภูมิ (Secondary forest) และศึกษาชนิดพันธุ์เด่นในพื้นที่ศึกษา จำนวน 14 ชนิดพันธุ์ โดยคัดเลือกชนิดพันธุ์จากความถี่สัมพัทธ์ของพื้นที่หน้าตัด (Relative basal area) และทำการสุ่มเลือกต้นไม้ให้ครอบคลุมขนาดทั้งหมดของการกระจายตัวของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกในชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา

1.3.2) การพัฒนาสมการอัลโลเมตริกในการประเมินความหนาของกระพี้จะทำโดยการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) โดยใช้ฟังก์ชันยกกำลัง (Power function) และฟังก์ชันรูปแบบอื่นที่เหมาะสมกับข้อมูล โดยมีตัวแปรศึกษา คือ ความหนาของกระพี้ในต้นไม้ (ตัวแปรตาม) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (ตัวแปรอิสระ)

1.3.3) พัฒนาสมการอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ให้มีความเหมาะสมต่อพื้นที่ศึกษาและชนิดพันธุ์ เพื่อนำไปใช้ร่วมกับข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในต้นไม้ (Sap flow) ในการคำนวณการคายน้ำในระดับพื้นที่ป่าแต่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการสร้างสมการอัลโลเมตริกเป็นหลัก เพื่อเป็นฐานในการต่อยอดการประเมินการคายน้ำในระดับป่าต่อไป

1.4 ประโยชน์ของงานวิจัย

1.4.1) สามารถนำสมการอัลโลเมตริกที่สร้างขึ้นไปใช้ในการประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทั้งป่าเพื่อใช้ร่วมกับข้อมูลอัตราการไหลของน้ำในลำต้น เพื่อใช้คำนวณการคายน้ำของพื้นที่ป่าไม้ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่

1.4.2) งานวิจัยนี้เป็นการสร้างฐานข้อมูลของความหนาของกระทู้ในต้นไม้ในป่าธรรมชาติในประเทศไทย ซึ่งเป็นหนึ่งในข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะและการตอบสนองของต้นไม้ในป่าต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม



บทที่ 2

บททวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งบดุลของน้ำในระบบนิเวศป่า (Water budget in forest ecosystem)

งบดุลน้ำ (Water budget) หรือสมดุลน้ำ (Water balance) คือการคำนวณปริมาณน้ำสุทธิที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบนิเวศ โดยการศึกษาของงบดุลน้ำนี้ สามารถใช้ประเมินผลกระทบจากความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมหรือกิจกรรมของมนุษย์ที่มีต่อแหล่งน้ำในระบบนิเวศ (Healy et al., 2007) นอกจากนี้ การศึกษาเปรียบเทียบงบดุลน้ำในพื้นที่ที่แตกต่างกัน จะช่วยให้ระบุผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลักษณะดิน ชนิดพันธุ์พืช และลักษณะการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ ที่อาจมีผลต่อวัฏจักรของน้ำได้ (Evans, 1996) โดยหนึ่งในพื้นที่ที่สำคัญต่อการประเมินงบดุลน้ำคือ ระบบนิเวศป่า ซึ่งระบบนิเวศป่าเป็นแหล่งกำเนิดต้นน้ำลำธาร รวมถึงเป็นพื้นที่ที่มีการคายระเหยน้ำคืนสู่บรรยากาศมาก โดยในการประเมินงบดุลน้ำในระบบนิเวศป่านี้ ต้องมีความเข้าใจเรื่องกระบวนการต่าง ๆ ของวัฏจักรน้ำในระบบนิเวศป่า รวมถึงวิธีการตรวจวัดและประเมินปริมาณน้ำขององค์ประกอบต่าง ๆ ในวัฏจักรนี้ อีกด้วย (Calder et al., 2008)

2.1.1 ประโยชน์ในการศึกษาของงบดุลน้ำในระบบนิเวศป่า

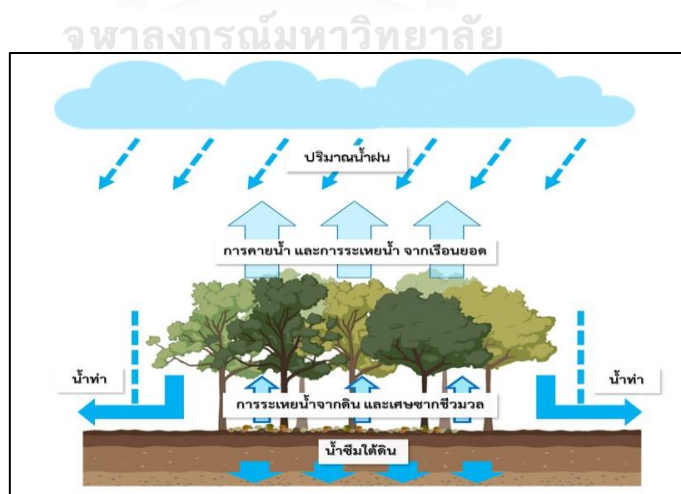
Batchelor et al. (2016) ได้กล่าวไว้ว่า การศึกษาของงบดุลน้ำสามารถช่วยในการจัดทำบัญชีน้ำ (Water Accounting) ซึ่งมีประโยชน์ในด้านการอธิบายการใช้น้ำ และผลผลิตที่ได้จากน้ำ ภายในพื้นที่ที่พิจารณา แสดงให้เห็นถึงสถานการณ์ปัจจุบันในพื้นที่ และสามารถคาดการณ์เกี่ยวกับสถานการณ์ของแหล่งน้ำในอนาคตได้ ทำให้มีการบริหารจัดการและจัดการทรัพยากรน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงกิจกรรมการใช้น้ำในด้านต่าง ๆ และเพื่อให้ทราบถึงแนวทางที่สามารถปรับปรุงในการใช้น้ำในแต่ละกลุ่มกิจกรรมต่าง ๆ ให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ทราบถึงผลผลิตที่ได้จากน้ำในภาพรวม ทั้งนี้ การจัดทำบัญชีน้ำจะพิจารณาจำแนกกิจกรรมการใช้น้ำต่าง ๆ โดยผนวกแนวความคิดทางด้านเศรษฐศาสตร์และทางการจัดการน้ำ เช่น สิทธิการใช้น้ำ ชนิดของผลประโยชน์จากการใช้น้ำ

นอกจากนี้ การศึกษาของงบดุลน้ำในระบบนิเวศป่า ยังช่วยในการเตือนภัยน้ำแล้งและน้ำท่วม โดยใช้ข้อมูลสถิติจากอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน และข้อมูลการคายระเหยของน้ำในพื้นที่ เพื่อนำมาคำนวณปริมาณน้ำท่า และหากมีการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน อาจนำข้อมูลระยะยาวมาศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำท่า อันเป็นผลการคำนวณจากงบดุลน้ำ กับปัจจัยทางภูมิอากาศ

อื่น ๆ เพื่อใช้คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของน้ำท่าในอนาคต อันจะช่วยในการประเมินและวางแผนการจัดการแหล่งน้ำ อันมีป่าไม้เป็นแหล่งต้นน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Van Loon, 2015)

2.1.2 วัฏจักรน้ำกับระบบนิเวศป่า

Batchelor et al. (2016) ได้กล่าวไว้ว่า วัฏจักรของน้ำ เป็นกระบวนการหมุนเวียนของน้ำในพื้นที่หนึ่ง เช่น ระบบนิเวศป่า โดยเริ่มตั้งแต่น้ำฝนตกจากชั้นบรรยากาศลงสู่พื้นโลก และไหลไปยังแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น แม่น้ำ ทะเล มหาสมุทร เป็นต้น นอกจากนี้ ปริมาณน้ำฝนที่ตกมาบางส่วนจะระเหยกลับขึ้นไปสู่ชั้นบรรยากาศในรูปแบบของไอน้ำ และก่อให้เกิดเมฆฝนตกลงมาอีกครั้ง โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาเฉพาะวัฏจักรของน้ำที่เกี่ยวข้องกับระบบนิเวศป่า ป่าไม่มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมวัฏจักรของน้ำให้มีการหมุนเวียนในระบบนิเวศได้ดี โดยหากพิจารณาระบบนิเวศป่าแห่งหนึ่ง จะมีองค์ประกอบหลักของวัฏจักรน้ำ ดังนี้ หยาดน้ำฟ้า (Precipitation) ได้แก่ น้ำฝน (Rainfall) หรือ หิมะ (Snow) เมื่อหยาดน้ำฟ้าเข้าสู่ระบบนิเวศป่า ปริมาณของหยาดน้ำฟ้าส่วนหนึ่งจะผ่านเข้าสู่ต้นไม้และพืชพรรณ รวมถึงส่วนอื่น ๆ ของระบบนิเวศป่า เช่น ดิน ชั้นของใบไม้และซากอินทรีย์ที่ทับถมบนพื้นดิน และส่งกลับคืนสู่บรรยากาศในรูปแบบของไอน้ำ ผ่านกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การคายน้ำ (Transpiration) อันเป็นกระบวนการปล่อยไอน้ำออกจากพืชพรรณผ่านปากใบ การระเหยของน้ำจากน้ำพืชยึด (Interception) หรือจากพื้นดินและชั้นทับถมของซากอินทรีย์ (Soil and litter evaporation) และท้ายที่สุด ปริมาณหยาดน้ำฟ้าที่เหลือจะไหลออกจากระบบนิเวศ โดยอาจไหลลงสู่แหล่งน้ำ (Runoff) หรือซึมลงใต้ดิน (Infiltration) ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการของวัฏจักรของน้ำในระบบนิเวศป่า

2.1.3 สมการสมดุลน้ำในระบบนิเวศป่า

ในการศึกษาสมดุลน้ำในระบบนิเวศป่า จะพิจารณาปริมาณการเปลี่ยนแปลงรายปีของ กระบวนการต่าง ๆ ในวัฏจักรน้ำ ดังนี้ ปริมาณหยาดน้ำฟ้า (Precipitation) น้ำจากการคายระเหย (Evapotranspiration) และน้ำท่า (Runoff) โดยปริมาณน้ำทั้งหมดในระบบนิเวศจะขึ้นอยู่กับอิทธิพล จากหลายปัจจัย อาทิ ประชากรของต้นไม้ โครงสร้างของต้นไม้ รวมไปถึงลักษณะของเรือนยอด นอกจากนี้ยังสมดุลน้ำยังมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของต้นไม้อีกด้วย (Gilmour, 2014) ในการ ประเมินสมดุลน้ำจะอาศัยสมการการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) อย่างง่ายดังสมการที่ 2.1 ดังนี้

$$\text{ปริมาณน้ำเข้า} - \text{ปริมาณน้ำออก} + \text{ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของน้ำที่กักเก็บ} = 0 \quad (2.1)$$

จากสมการข้างต้นสามารถประยุกต์ให้เข้ากับสมดุลของน้ำในระบบนิเวศป่าได้ดังสมการที่

2.2

$$P - (Et + R) + \Delta S = 0 \quad (2.2)$$

โดย

- P = น้ำจากหยาดน้ำฟ้า (Precipitation)
- Et = น้ำจากการคายระเหย (Evapotranspiration)
- R = น้ำจากน้ำท่า (Runoff)
- ΔS = ปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ใต้ดินที่เปลี่ยนแปลง (Storage Change)

โดยทั่วไปแล้ว การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำที่กักเก็บไว้ใต้ดินจะน้อยมากเมื่อเทียบกับ องค์ประกอบอื่น (Palmroth et al., 2010) ดังนั้น ในการคำนวณสมดุลของน้ำในระบบนิเวศป่าจึงมัก ใช้สมการอย่างง่ายดังสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$P - (Et + R) = 0 \quad (2.3)$$

หากจะนำสมการสมดุลของน้ำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าเพื่อการบริหารจัดการน้ำ อันมีป่าไม้เป็นแหล่งต้นน้ำ สามารถใช้จัดรูปสมการ (2.3) ใหม่ดังสมการที่ 2.4

$$R = P - Et \quad (2.4)$$

โดยจะอธิบายองค์ประกอบของสมการที่ (2.4) ดังนี้

2.1.3.1 หยาดน้ำฟ้า (Precipitation) เป็นกระบวนการที่น้ำจากบรรยากาศตกลงสู่พื้นดินในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ฝน หิมะ ลูกเห็บ เป็นต้น แต่ในประเทศไทยจะเป็นในรูปแบบของน้ำฝน เนื่องจากอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้น (วิชัย บุญลือ, 2552) และ ป่าไม้มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดความชื้นในบรรยากาศ และก่อให้เกิดฝน ผ่านกระบวนการคายระเหยน้ำ จากการคายน้ำของพืชพรรณในป่า และการระเหยของเศษซากชีวมวล พื้นดิน รวมถึงแหล่งน้ำในระบบนิเวศป่า โดยหากทำการเฉลี่ยแล้วการคายระเหยในพื้นที่ป่าจะมีส่วนอย่างน้อย 40 % ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมดในระบบนิเวศ ตัวอย่างเช่น ป่าแอมะซอนในทวีปอเมริกาใต้ ปริมาณน้ำฝน 50 - 80 % ได้รับมาจากการคายน้ำเพียงกระบวนการเดียว และป่าไม้ยังมีส่วนช่วยในการดูดซับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าพื้นดิน ทำให้ต้นไม้ในพื้นที่มีการคายน้ำมากขึ้นส่งผลต่อความชื้นในบรรยากาศและก่อตัวกลายเป็นฝน หากมีการสูญเสียพื้นที่ป่าไปจะมีผลโดยตรงทำให้น้ำฝนมีปริมาณลดลงมากถึง 30 % และปริมาณความชื้นในพื้นที่ที่ขึ้นสู่บรรยากาศจะน้อยลง (Ellison et al., 2017)

2.1.3.2 น้ำท่า (Runoff) เป็นกระบวนการที่กระจายน้ำและปล่อยน้ำออกสู่ระบบ โดยน้ำท่า คือ ปริมาณน้ำในลำธารหรือแม่น้ำที่เกิดจากน้ำฝน ผ่านกระบวนการเก็บกัก ณ จุดต่าง ๆ ภายในระบบนิเวศ แล้วระบายลงสู่พื้นที่ตอนล่าง (วิชา นิยม, 2535) โดยน้ำทານี้ อาจกระจายไปสู่แหล่งต่าง ๆ นอกกระบบนิเวศ อาทิ

- น้ำไหลหน้าดิน (Surface runoff) เกิดจากฝนที่ตกหนัก จนกระทั่งน้ำฝนที่ตกลงมาไม่สามารถซึมผ่านผิวดินได้ทัน ประกอบกับมีความลาดเอียง ทำให้น้ำในส่วนนี้ไหลลงสู่แม่น้ำ โดยปริมาณน้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมากที่สุดปริมาณน้ำท่า

- น้ำซึมผ่านชั้นดิน (Lateral flow) เป็นน้ำที่ซึมอยู่ในดินเหนือชั้นหินเกิดจากน้ำฝนหรือน้ำบนผิวดินดูดซับไว้ เมื่อดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำแล้วก็จะซึมลงไปดินจนถึงชั้นของหิน ซึ่งชั้นหินเหล่านี้จะกั้นน้ำส่วนใหญ่ไม่ให้ซึมผ่านไปได้อีก ในกรณีที่มีพื้นที่ลาดเอียงน้ำอาจไหลลงสู่ลำธารก็ได้

ปริมาณน้ำในส่วนนี้มีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับน้ำไหลหน้าดิน และการซึมผ่านชั้นดินต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับความชื้น

- น้ำใต้ดิน (Ground water) เกิดจากน้ำฝนที่ตกลงมาแล้วซึมลงดินไปถึงระดับใต้ดิน (Water table) แล้วรวมกับน้ำใต้ดินซึ่งเป็นแหล่งน้ำที่สำคัญจะปล่อยน้ำออกสู่ลำธารอย่างช้า ๆ ตลอดเวลา น้ำส่วนนี้จะเป็น้ำที่มีคุณภาพดีทางกายภาพ และถือเป็นทรัพยากรแหล่งน้ำบริสุทธิ์ที่สำคัญแหล่งหนึ่งสำหรับมนุษย์

โดยทั่วไปแล้วป่าไม้ กับกระบวนการน้ำท่า จะมีความสัมพันธ์ในเรื่องลักษณะการไหลของน้ำท่า โดยลักษณะของน้ำท่าในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ กันของรอบปี ป่าไม้จะทำให้หน้าดินที่ส่งน้ำไปให้น้ำท่าในลำธารตลอดทั้งปี ทั้งนี้ถ้าป่าชนิดใดที่มีความสมบูรณ์สูง อาทิ ป่าดิบเขา และป่าดิบชื้น น้ำฝนที่ตกลงมาเป็นจำนวนมากในช่วงต้นของฤดูฝนจะถูกเก็บกักเอาไว้ในชั้นดินเป็นส่วนใหญ่ โดยมีบางส่วนที่ถูกต้นไม้ดึงกลับขึ้นไปใช้ในการเจริญเติบโตและการคายน้ำ และปล่อยให้หน้าดินที่หลีกเลี่ยงการดูดยึดของดิน และการใช้น้ำของต้นไม้ ระบายให้กับลำธารในลักษณะที่ค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตามเมื่อฤดูแล้งเริ่มขึ้น ระดับของน้ำท่าในลำธารลดลง ความแตกต่างของระดับน้ำท่าในลำธารกับระดับน้ำในชั้นดิน จะเป็นตัวผลักดันให้น้ำในดินระบายให้กับลำธารอย่างต่อเนื่อง

2.1.3.3 การคายระเหย (Evapotranspiration) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอ ซึ่งการคายระเหยมีบทบาทต่ออุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดินเป็นอย่างมาก เนื่องจากปริมาณไอน้ำเหล่านี้มีส่วนให้เกิดการเปลี่ยนผันของอุณหภูมิจากร้อนให้กลายเป็นเย็นเพราะกระบวนการคายระเหยเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนเพื่อทำให้น้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ (Prueger et al., 1997) นอกจากนี้ ยังพบว่าน้ำส่วนใหญ่ในระบบนิเวศบนบกสูญเสียน้ำไปกับการคายระเหย โดยพื้นที่ที่มีความแห้งแล้งไม่มีสิ่งปกคลุมพื้นดิน เมื่อฝนตกลงมา 100 % น้ำอาจระเหยกลายเป็นไอ 95% (Huxman et al., 2005) ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้จะมีการคายระเหยไปตั้งแต่ 40-95% ของปริมาณน้ำฝนทั้งหมด กระบวนการเหล่านี้ทำให้ปริมาณการคายระเหยในพื้นที่ระบบนิเวศป่ามีช่วงการคายระเหยที่กว้าง (Carswell et al., 2002) โดยการคายระเหยของน้ำจากระบบนิเวศป่าสามารถแยกได้เป็น 2 กระบวนการ ดังนี้

- **การระเหยน้ำ (Evaporation)** เป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพจากของเหลวกลายเป็นไอ น้ำ กลับเข้าสู่บรรยากาศ โดยน้ำได้รับพลังงานความร้อนที่ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำบริเวณผิวน้ำลดลงจนเกิดการหลุดลอยสู่บรรยากาศ และมีปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อิทธิพลของการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิของอากาศ ความดัน

ไอน้ำ ความเร็วลม และความดันบรรยากาศ (Brutsaert, 2013) ในระบบนิเวศป่า มีการระเหยน้ำจากพื้นผิวดิน (Soil evaporation) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความชื้นในดิน เนื้อดินและความสามารถในการอุ้มน้ำไว้ เป็นต้น ดินที่มีการไหลซึมของความชื้นสูงจะระเหยได้มาก ในทางตรงกันข้ามดินที่มีเนื้อหยาบมีการไหลซึมได้ช้ากว่าจะมีการระเหยจากผิวดินได้น้อย (Chen and Hu, 2004) นอกจากนี้ การระเหยน้ำในระบบนิเวศป่า อาจรวมถึงการระเหยน้ำจากเศษซากชีวมวลที่ทับถมกันบนพื้นดินในป่า โดยชีวมวลเหล่านี้คือ เศษใบไม้ กิ่งไม้ หรือซากพืช ซากสัตว์ (Litter evaporation) ในพื้นที่ ซึ่งจะทำหน้าที่สกัดกั้นน้ำฝนและดูดซับน้ำฝนไว้บางส่วนก่อนถึงพื้นผิวดิน (Schaap and Bouten, 1997) รวมถึงปริมาณน้ำฝน ซึ่งเกาะอยู่ตามใบ หรือ ลำต้นของพืช โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า น้ำพืชยึด (Interception) โดยมวลน้ำเหล่านี้จะระเหยไปสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำทั้งหมด (Klaassen, Bosveld, and De Water, 1998) จะเห็นได้ว่าในระบบนิเวศป่ามีการระเหยจากหลายแหล่ง แต่แหล่งความชื้นเหล่านี้จะระเหยไปอย่างช้า ๆ และมีการระเหยไม่มาก เพราะแสงแดดไม่สามารถส่องลงมาถึงได้เพียงพอเนื่องจากมีใบไม้บัง และมีเรือนยอดหลายชั้น และในพื้นที่ระบบนิเวศป่ามีอากาศหม่นเย็นชื้น เต็มไปด้วยความชื้นจากภาวะเหล่านี้ทำให้ระบบนิเวศป่าสูญเสียน้ำในรูปแบบของการคายน้ำของพืชมากกว่า (Benyon and Doody, 2015)

- **การคายน้ำของพืช (Transpiration)** เป็นกระบวนการที่พืชดูดน้ำจากดิน ผ่านลำต้นจนถึงใบ และปล่อยน้ำในรูปของไอน้ำออกทางปากใบไปสู่บรรยากาศ หากดินมีความชื้นอยู่มาก อัตราการดูดน้ำของพืชจะขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำ ในทางตรงกันข้ามหากดินไม่มีความชื้น หรือความชื้นน้อยอัตราการคายน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่พืชดูดได้จากดิน (Pallardy, 2008) นอกจากนี้ การคายน้ำยังสัมพันธ์กับบรรยากาศโดยรอบ หากอากาศแห้งหรือมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมากเท่าใด พืชยังมีการคายน้ำมากขึ้นเท่านั้น (Federer, 1979) โดยในระบบนิเวศป่านั้น การคายน้ำมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยคิดประมาณมากถึง 90% ของการสูญเสียน้ำจากกระบวนการคายระเหย เนื่องจากมีความหลากหลายของพืชพรรณ และเรือนยอดได้รับแสงโดยตรงจากดวงอาทิตย์ รวมถึงในพื้นที่ป่ามีความชื้นดินมาก ทำให้พืชสามารถนำมาใช้ได้ทันที (Wei et al., 2017) และการคายน้ำจะช่วยเพิ่มความชื้นในบรรยากาศก่อให้เกิดฝนตก ในพื้นที่ ป่าแอมะซอน ปริมาณน้ำฝน 40 - 80 % เกิดจากสูญเสียน้ำจากกระบวนการคายน้ำเพียงกระบวนการเดียว (Batchelor et al., 2016) ด้วยเหตุนี้การคายน้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินการคายระเหยในระบบนิเวศป่า

2.2 ปัจจัยทางสภาพภูมิอากาศที่มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบหลักของงบบดูลน้ำ

2.2.1 ภาวะโลกร้อน (Global Warming) หมายถึง การที่อุณหภูมิในโลกเพิ่มขึ้นสูง ไม่ว่าจะ เป็นบริเวณพื้นผิวโลก หรืออุณหภูมิในมหาสมุทร ซึ่งเป็นผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือน กระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน เป็นต้น โดยการเพิ่มสูงของก๊าซเรือนกระจกมีส่วนมา จากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ หรือจากธรรมชาติเอง ผลกระทบหลักของการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือน กระจกในชั้นบรรยากาศ คือการกักเก็บรังสีของดวงอาทิตย์ที่ควรสะท้อนกลับออกไปในปริมาณที่ เหมาะสม ส่งผลให้อุณหภูมิโลกค่อย ๆ สูงขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อบริเวณ แถบขั้วโลก ที่มีน้ำแข็งปกคลุมเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดการละลายของน้ำแข็งและทำให้ ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น ตลอดจนส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบของวัฏจักรน้ำอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็นการ ระเหยของน้ำ ปริมาณน้ำท่า ปริมาณน้ำฝน ให้มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งในท้ายที่สุดจะส่งผล กระทบในภาพรวมของสมดุลน้ำที่มีอยู่ในโลก (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561)

2.2.2 ปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา (El Niño and La Niña) โดยปรากฏการณ์นี้เป็น ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างการหมุนเวียนของกระแสอากาศ และกระแสน้ำ ในมหาสมุทรทั้งบนพื้นผิวของมหาสมุทรและใต้มหาสมุทร ที่เกิดขึ้นบริเวณตอนใต้ ด้วยเหตุนี้จึงมีชื่อ เรียกอย่างเป็นทางการว่าปรากฏการณ์เอนโซ (El Niño Southern Oscillation, ENSO) ซึ่งหมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกตอนใต้ ปรากฏการณ์เอลนีโญเป็นปรากฏการณ์ที่ กระแสลมสินค้าตะวันออกอ่อนกำลังและเปลี่ยนทิศทางโดยพัดจากมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันตก (Western Pacific) แถบฝั่งทวีปเอเชียไปยังมหาสมุทรแปซิฟิกตะวันออก (Eastern Pacific) แถบ ชายฝั่งทวีปอเมริกาใต้ ส่งผลให้พัดกระแสน้ำอุ่นไปแทนที่กระแสน้ำเย็นทำให้บริเวณชายฝั่งทวีป อเมริกาใต้โดยเฉพาะอย่างยิ่งแถบประเทศเปรู และเอกวาดอร์ ซึ่งเป็นแหล่งที่ระบบนิเวศใต้ท้องทะเล มีความอุดมสมบูรณ์สูงถูกทำลายจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ตลอดจนเกิดฝนตกหนัก และแผ่นดินถล่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้ ในขณะที่ประเทศในแถบมหาสมุทรแปซิฟิก ตะวันตกอย่างประเทศไทยได้รับผลกระทบจากเหตุการณ์ภัยแล้งอย่างรุนแรง ฝนตกน้อยอัน เนื่องมาจากปริมาณการระเหยของน้ำลดลง ซึ่งเป็นผลจากกระแสน้ำอุ่นถูกพัดพาไปยังฝั่งมหาสมุทร แปซิฟิกตะวันออก มีรายงานว่าปรากฏการณ์เอลนีโญเกิดขึ้นเกือบทุก 3-7 ปี และอาจจะเกิดติดต่อกัน หลายเดือนซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศและเศรษฐกิจทั่วโลก กล่าวได้ว่าปรากฏการณ์เอลนีโญ จะทำให้เกิดฝนตกหนักทางตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้และเกิดความแห้งแล้งในแถบทวีปเอเชีย ตะวันออกเฉียงใต้ ในทางกลับกันปรากฏการณ์ลานีญาจะทำให้เกิดความแห้งแล้งทางตอนเหนือของ

ทวีปอเมริกาใต้ เกิดฝนตกหนักและอุทกภัยในแถบทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อย่างไรก็ตาม ทั้งเอลนีโญและลานีญาเป็นความผันผวนของกระแสอากาศโลกบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือมหาสมุทรแปซิฟิก (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2561)

2.2.3 ลมมรสุม (Monsoon) คือลมประจำฤดู เป็นลมแนทิสและสม้าเสมอ ซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะท้องถิ่นหนึ่ง ๆ เป็นบริเวณกว้างและเป็นลมที่พัดเป็นระยะเวลาแน่นอนตลอดฤดูของทุกสาเหตุใหญ่ ๆ เกิดจากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นดินและพื้นน้ำ ในฤดูหนาวอุณหภูมิของพื้นดินเย็นกว่าอุณหภูมิของน้ำในมหาสมุทร อากาศเหนือพื้นน้ำจึงมีอุณหภูมิสูงกว่าและลอยตัวขึ้นสู่เบื้องบน อากาศเหนือทวีปซึ่งเย็นกว่าไหลไปแทนที่ ทำให้เกิดเป็นลมพัดออกจากทวีป พอถึงฤดูร้อนอุณหภูมิของดินภาคพื้นทวีปร้อนกว่าน้ำในมหาสมุทร เป็นเหตุให้เกิดลมพัดในทิศตรงข้าม ลมมรสุมที่มีกำลังแรงที่สุด ได้แก่ ลมมรสุมที่เกิดในบริเวณภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย สำหรับประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุม 2 ชนิด คือ

- ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้ จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนชุกทั่วไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเลและเทือกเขา ด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น

- ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือหลังจากหมดอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้แล้ว ประมาณกลางเดือนตุลาคมจะมีมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดปกคลุมประเทศไทยจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ มรสุมนี้มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงบนซีกโลกเหนือแถบประเทศมองโกเลียและจีน จึงพัดพาเอามวลอากาศเย็นและแห้งจากแหล่งกำเนิดเข้ามาปกคลุมประเทศไทยทำให้ท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็น และแห้งแล้งทั่วไปโดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้จะมีฝนชุกโดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออกเนื่องจากมรสุมนี้นำความชื้นจากอ่าวไทยเข้ามาปกคลุม การเริ่มต้นและสิ้นสุดมรสุมทั้งสองชนิดอาจผันแปรไปจากปกติได้ในแต่ละปี (บุศราศิริธนะ, 2562)

2.2.4 พายุหมุนเขตร้อน (Tropical Storm) หมายถึง พายุหมุนที่เกิดขึ้นเหนือทะเลหรือมหาสมุทรในเขตร้อนซึ่งอยู่ระหว่าง ละติจูดที่ 30 องศาเหนือถึง 30 องศาใต้ ในทางอุตุนิยมวิทยาได้ใช้อัตราเร็วลมสูงสุดใกล้ศูนย์กลางพายุเพื่อแบ่งประเภทพายุหมุนเขตร้อนซึ่งเกิดเหนือทะเลหรือมหาสมุทรในเขตร้อน พายุหมุนเขตร้อนเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่ปกคลุมพื้นที่กว้างนับร้อย

กิโลเมตร จึงก่อให้เกิดผลกระทบเป็นบริเวณกว้าง โดยเฉพาะในอาณาบริเวณที่ศูนย์กลางพายุเคลื่อนผ่านจะได้รับผลกระทบมากที่สุด ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากพายุแปรผันตามความรุนแรงของพายุ เมื่อพายุมีกำลังแรงในขั้นดีเปรสชันความเสียหายส่วนใหญ่จะเกิดขึ้น โดยเฉพาะฝนที่ตกหนักและอุทกภัยที่เกิดขึ้นตามมา เมื่อพายุมีกำลังแรงขึ้นเป็นพายุโซนร้อนหรือไต้ฝุ่น สำหรับพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นพายุดีเปรสชัน เนื่องจากพายุอ่อนกำลังลงก่อนถึงประเทศไทย ส่วนที่มีกำลังแรงขนาดพายุโซนร้อนหรือไต้ฝุ่นมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยน้อย ผลกระทบเนื่องจากพายุมีทั้งประโยชน์และโทษ พายุที่อ่อนกำลังลงเป็นดีเปรสชัน มีประโยชน์ในแง่ที่ก่อให้เกิดฝนตกปริมาณมากซึ่งช่วยคลี่คลายสภาวะความแห้งแล้ง และสามารถกักเก็บน้ำไว้ตามแหล่งกักเก็บน้ำต่าง ๆ เพื่อใช้ในช่วงที่มีฝนน้อย ในส่วนที่เป็นโทษของพายุดีเปรสชันคืออุทกภัยซึ่งมักเกิดขึ้นหลังจากที่มีฝนตกหนักต่อเนื่อง (ฤทัย เพลงวัฒนา, 2554)

2.3 การตรวจวัดองค์ประกอบหลักของงบบดน้ำ

2.3.1 การตรวจวัดปริมาณน้ำฝน

การตรวจวัดปริมาณน้ำฝนเป็นการกำหนดปริมาณน้ำฝนในช่วงเวลาหนึ่ง จะแสดงผลในหน่วยของความลึกของน้ำฝนที่ตกลงบนพื้นที่ โดยถือว่าปริมาณน้ำฝนแผ่กระจายและมีความลึกสม่ำเสมอ ครอบคลุมทั้งพื้นที่โดยใช้สถานีตรวจวัดที่กระจายกัน ตามลักษณะของพื้นที่ (ยูวเรศ เวชกามา, 2545) ประเทศไทยมีสถานีวัดน้ำฝนครอบคลุมในแต่ละจังหวัด ในการวัดปริมาณน้ำฝนจะนิยมใช้เครื่องมือดังนี้

- เครื่องมือการวัดน้ำฝนแบบธรรมดา หรือแบบมาตรฐาน โดยทั่วไปจะประกอบด้วยกระบอกเก็บน้ำฝนซึ่งทำด้วยอะคริลิก หรือแก้ว มีหลายขนาดความจุที่แตกต่างกัน และมีหน่วยเป็นนิ้วและเซนติเมตร หรือมิลลิเมตร แสดงชัดเจน อุปกรณ์ควรจะถูกวางเหนือพื้นดิน สามารถเข้าถึงได้ง่าย และไม่มีสิ่งกีดขวางวางอยู่บนเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบแอนะล็อก ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการวัดค่าปริมาณน้ำฝน บางรุ่นถูกผลิตเพื่อการตกแต่งพื้นที่ภายนอกอาคาร และบางรุ่นอาจจะมีระดับบอกปริมาณน้ำขนาดใหญ่เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านจากระยะไกล โดยเครื่องมือนี้แต่ละประเทศอาจมีมาตรฐานที่ต่างกันออกไป แต่มีหลักการเดียวกันคือใช้สำหรับการวัดความลึกของฝนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (กิจการ พรหมมา, 2555)

- เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบถ้วยกระดก เครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดก (Tipping Bucket Gauge) มีลักษณะประกอบด้วยที่รองรับน้ำฝน (Receiver) กรวยรับน้ำฝน (Funnel) ถ้วยกระดก (Tipping Bucket) ถังเก็บน้ำ (Reservoir) และกระบอกตวงวัดน้ำ (Measuring Tube)

หลักการการทำงานของเครื่องวัดน้ำฝนแบบถ้วยกระดกจะปล่อยให้น้ำฝนที่ตกลงมาผ่านที่รับน้ำฝนแล้วไหลลงผ่านกรวยลงสู่ถ้วยกระดกที่มี 2 ข้าง เมื่อน้ำฝนไหลลงถ้วยกระดกข้างหนึ่งจนเต็มก็จะตวงน้ำฝนได้ 0.25 มิลลิเมตร หรือตวงได้ปริมาณตามที่กำหนดในเครื่องวัดน้ำฝนของแต่ละบริษัท ในขณะที่นั้นจะทำให้เกิดสภาพไม่สมดุลเป็นผลให้ถ้วยกระดกข้างนี้เทน้ำลงสู่กระบอกตวง ขณะเดียวกันถ้วยกระดกอีกข้างก็จะขึ้นมารับน้ำฝนแทนเป็นระบบวงจรเช่นนี้เรื่อยไป ซึ่งการที่ถ้วยกระดกแต่ละครั้งจะครบวงจรไฟฟ้า ทำให้ปลายปากกาเคลื่อนที่และบันทึกลงบนกระดาษกราฟที่พันอยู่รอบทรงกระบอกที่หมุนตามเข็มนาฬิกา (ณัฐวุฒิ นาคอ่อน, 2546)

- เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบชั่งน้ำหนัก มีลักษณะประกอบด้วยที่รองรับน้ำฝน (Receiver) ถังครอบด้านนอก (Outer Case) กรวยรับน้ำฝน (Funnel) ถังชั่งน้ำหนัก (Bucket) เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weighing Mechanism) ปากกา (Pen arm) และทรงกระบอกหมุนพร้อมกราฟ (Revolving Drum With Chart) หลักการทำงานของเครื่องวัดน้ำฝนแบบชั่งน้ำหนัก คือเมื่อน้ำฝนตกลงมาผ่านที่รองรับน้ำฝน และกรวยรับน้ำ ฝนจะลงสู่ถังชั่งน้ำหนัก และสะสมปริมาณมากขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นซึ่งจะกดจานเครื่องชั่งน้ำหนัก ที่เชื่อมโยงกับระบบกลไกสปริง ซึ่งต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล ปริมาณน้ำฝน โดยที่ปลายปากกาจะบันทึกข้อมูล ลงบนกระดาษกราฟที่พันอยู่รอบทรงกระบอกที่หมุนตามเข็มนาฬิกา (กิจการ พรหมมา, 2555)

- เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบลูกลอย มีลักษณะประกอบด้วยที่รองรับน้ำฝน (Receiver) กรวยรับน้ำฝน (Funnel) ถังน้ำฝน (Chamber) ลูกลอย (Float) ท่อกาลักน้ำ (Siphon) ปากกา และทรงกระบอกหมุนพร้อมกราฟ มีหลักการการทำงานคือ เมื่อน้ำฝนตกผ่านที่รองรับน้ำฝนและกรวยรับน้ำฝนลงสู่ถังรับน้ำฝน น้ำในถังรับน้ำฝนจะสูงขึ้น ทำให้ลูกลอยที่มีก้านต่อกับปากกาที่จะบันทึกผลลงกราฟที่พันอยู่รอบทรงกระบอกที่หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ตั้งไว้ลอยขึ้น เมื่อระดับน้ำสูงถึงส่วนบนสุดของท่อกาลักน้ำ น้ำจะไหลออกจากถังน้ำฝนผ่านท่อกาลักน้ำ ระดับน้ำในถังน้ำฝนจะลดลง ลูกลอยลอยลง ปลายปากกาจะลดระดับลงจนถึงจุดที่ระบบท่อกาลักน้ำหยุดทำงานระดับน้ำในถังน้ำฝนจะสูงขึ้นอีกเป็นวงจรเช่นนี้ต่อไป ทำให้สามารถวัดปริมาณฝนสะสมตามเวลาได้ตามต้องการ (นิตยา หวังวงศ์ วิโรจน์, 2551)

- เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบไซฟอน เป็นเครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบมาตรฐานที่ทำงานมีประสิทธิภาพดีซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาได้นำมาใช้และเป็นเครื่องมือวัดน้ำฝนแบบอัตโนมัติที่สามารถวัดปริมาณน้ำฝนได้ตลอดเวลาโดยมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกสูงประมาณ 1.2 เมตร มีหลอดแก้วคอห่านหรือท่อไซฟอน เมื่อรองรับน้ำฝนได้ 10 มิลลิเมตรแล้วจะถ่ายน้ำฝนทิ้งทางหลอดแก้วคอห่านโดย

ลักษณะของไชฟอนจะดูดน้ำให้ไหลออกจากถังลูกลอยเมื่อฝนตกลงมาจนเต็มถึงจะทำให้อากาศดันน้ำออกมาทางท่อด้านล่าง และเมื่อน้ำไหลลงออกจากถังลูกลอยหมดอากาศก็จะไหลเข้ามาแทนที่ทำให้เครื่องไชฟอนหยุดทำงานโดยทันที (นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์, 2551)

2.3.2 การตรวจวัดน้ำท่า

ในการตรวจวัดน้ำท่า จำเป็นที่จะต้องวัดข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลระดับน้ำ ความเร็วกระแส น้ำ อัตราการไหลของน้ำทั้งจากการตรวจวัดโดยตรงและวิธีการคำนวณ รวมถึงปริมาณของน้ำ ซึ่งมีรายละเอียดสรุปไว้ ดังนี้

- การวัดน้ำท่าโดยใช้หุ่นลอย เป็นวิธีการวัดน้ำท่าอย่างง่ายและประหยัดวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นการประมาณหรือวัดน้ำท่าแบบไม่ต่อเนื่อง ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือลำน้ำต้องมีลักษณะที่ค่อนข้างตรง มีหน้าตัดลำน้ำสม่ำเสมอ ไม่มีพืชน้ำหรือโขดหินขวางทางน้ำ ด้วยวิธีการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายไม่สูงมาก จึงเหมาะสมกับการวัดปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ต้นน้ำทั่วไป (สมชาย อ่อนอาษา และคณะ, 2555)

- วัดได้โดยตรงจากไม้วัดระดับความสูงของน้ำท่าในลำธาร (Staff gauge) เป็นการประเมินค่าน้ำท่าที่ไหลในลำธารจากพื้นที่ต้นน้ำที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของร่องน้ำที่ถูกตัดแปลงให้มีรูปร่างคงที่ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลำน้ำย่อยที่เกิดขึ้นจากพื้นที่ต้นน้ำแต่ละแห่งมีอยู่เป็นจำนวนมาก ส่งผลทำให้ความถูกต้องในการประเมินค่าน้ำท่าในลำธาร จะต้องใช้งบประมาณในการติดตั้งเครื่องมือเก็บวัดข้อมูล และกำลังคนในการเก็บวัดข้อมูลจำนวนมาก (ส่วนวิจัยต้นน้ำสำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ, 2554)

- การคำนวณปริมาณของน้ำท่า จากสมการสมดุลน้ำ (Water budget) โดยใช้ข้อมูลจากปริมาณน้ำฝน และการคายระเหยในพื้นที่มาประเมินปริมาณน้ำ โดยเฉพาะระบบนิเวศป่าที่ต้องมีการตรวจวัดปริมาณคายระเหยจากพื้นที่ และปริมาณน้ำฝนอย่างต่อเนื่อง (Wolock and McCabe, 1999)

2.3.3 การตรวจวัดการคายระเหยในระบบนิเวศป่า

ในปัจจุบัน มีวิธีการตรวจวัดการคายระเหยหลากหลายวิธี ในที่นี้ จะยกตัวอย่างบางวิธีที่นิยมใช้ ดังนี้ วิธีแรกคือ การตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ lysimeter ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเป็นถังขนาดใหญ่ฝังอยู่ในดินมีความแม่นยำมากในการวัดอัตราการคายระเหยน้ำ โดย lysimeter จะต้องมียุทธศาสตร์ใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด กล่าวคือ ต้องมีขนาดใหญ่และเพื่อขจัดปัญหาเรื่องผลกระทบจากการเจริญเติบโตของราก คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่อยู่ภายใน lysimeter ต้อง

ใกล้เคียงกับดินที่อยู่ภายนอกให้มากที่สุด และจำนวนต้นพืชใน lysimeter ต้องมีความหนาแน่นเท่ากับพื้นที่รอบ ๆ ส่วนการหาปริมาณการคายระเหยนั้น จะใช้หลักในวิธีคำนวณงบดุลน้ำ วิธีการนี้เหมาะสมกับพื้นที่ที่ปกคลุมโดยพืชขนาดเล็ก และไม่เหมาะกับการศึกษาการคายระเหยของน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อน และชนิดพันธุ์ของต้นไม้มีลักษณะเป็นต้นไม้ใหญ่ระบบรากลึกและซับซ้อนกว่าในสภาพที่ใช้ในสามารถศึกษาโดยใช้ lysimeter ได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้การสร้างอุปกรณ์ lysimeter นี้ จะต้องใช้ต้นทุนสูง และเคลื่อนย้ายลำบาก แต่ก็ยังเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากมีความใกล้เคียงสภาพจริงของระบบศึกษา และค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดได้นั้นมักนิยมใช้การสอบเทียบกับวิธีการ และแนวทางในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธีอื่น ๆ (สำเนา แก้วสระแสน และคณะ, 2560)

ต่อมา นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์ (2551) ได้กล่าวถึงเทคนิคการวัดการคายระเหยน้ำจาก ความชื้นในดิน วิธีนี้เหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอตลอดความลึก และระดับน้ำใต้ดินอยู่ต่ำกว่าผิวดินมาก วิธีการวัดทำโดยการหาความชื้นในดินก่อนและหลังการให้น้ำพืชทุกครั้ง และอาจต้องทำการวัดเพิ่มในช่วงเวลาที่ไม่ได้ให้น้ำพืชด้วย โดยปกติจะต้องมีการวัดจำนวนความชื้นของดินตัวอย่างเป็นจำนวนมากจึงจะได้ค่าละเอียดและถูกต้อง ค่าการคายระเหยสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.5)

$$ET = [\sum (\theta_1 - \theta_2)_i \Delta S_i + P + W_d] / \Delta t \quad (2.5)$$

โดยที่ ET คือ การคายระเหยในช่วงเวลา Δt

$(\theta_1 - \theta_2)_i$ คือ ผลต่างของจำนวนความชื้นในดินระหว่างการวัดครั้งแรกและครั้งที่ขึ้นดิน i

ΔS_i คือ ความหนาแน่นของชั้นดิน

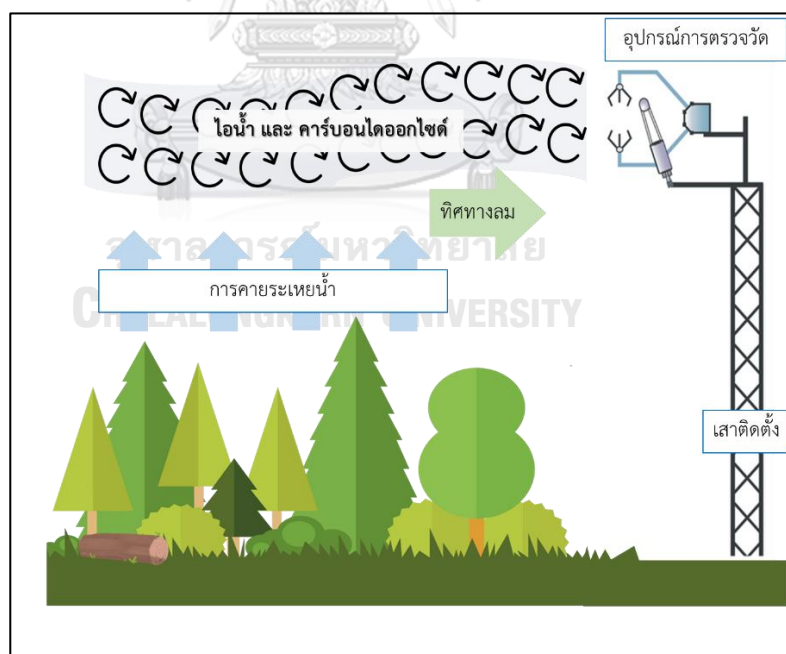
P คือ ปริมาณน้ำฝนที่เข้ามาในดิน

W_d คือ จำนวนความชื้นที่ซึมเลยเขตรากออกไป

Δt คือ ช่วงเวลาระหว่างการเก็บตัวอย่างดินสองครั้ง

การประเมินการคายระเหยน้ำโดยอาศัยการใช้เครื่องมือ Lysimeter และวิธีวัดความชื้นในดิน นั้นส่วนใหญ่จะใช้ประเมินในพื้นที่แปลงวิจัยหรือพื้นที่ศึกษาขนาดเล็กเท่านั้น ไม่ครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่

หากประเมินการคายระเหยในพื้นที่ระบบนิเวศป่ามีวิธีที่นิยมใช้คือ เทคนิคความแปรปรวนร่วมแบบหมุนวน (Eddy covariance technique, EC) โดยเทคนิคนี้เป็นการตรวจวัดด้านอุตุนิยมวิทยาในระดับจุลภูมิอากาศที่ดีที่สุดในปัจจุบัน โดยนิยมใช้ในการวัดการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานระหว่างชั้นบรรยากาศและเรือนยอดของป่าโดยตรง ในการศึกษาขั้นต้น จะติดตั้งเครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณไอน้ำไว้ในระบบเปิด รวมถึงติดตั้งเครื่องวัดความเร็วลม และทิศทางการลมแบบ 3 มิติ บนเสาที่มีความสูงเหนือทรงพุ่มหรือเรือนยอดของพืชในพื้นที่ที่ทำการศึกษ ด้วยเหตุนี้ วิธีนี้จึงสามารถใช้วัดอัตราการแลกเปลี่ยนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณไอน้ำครอบคลุมทั่วพื้นที่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ วิธีนี้ยังใช้เครื่องมือที่มีการตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสิ่งที่ทำการศึกษา มีความถูกต้องแม่นยำสูง และทนทานต่อความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังมีการตรวจวัดตลอดเวลา ทำให้สามารถวัดการคายระเหยในระบบนิเวศป่าได้อย่างต่อเนื่องและยังทำให้ทราบถึงความอ่อนไหวของระบบนิเวศป่าต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมและการเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศได้ (พูนพิภพ เกษมทรัพย์ และคณะ, 2559)



ภาพที่ 2.2 อธิบายวิธีการตรวจวัดการคายระเหยในระบบนิเวศป่า โดยใช้เทคนิคการตรวจวัดแบบหมุนวน (Eddy covariance technique, EC)

นอกจากนี้ ยังสามารถประเมินการคายระเหยในพื้นที่ป่าทางอ้อม ผ่านการวัดการคายน้ำของป่า เนื่องจากการคายระเหยในระบบนิเวศป่าประกอบด้วย การคายน้ำของป่าเป็นส่วนมาก ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

2.4 การวัดการคายน้ำในระบบนิเวศป่า

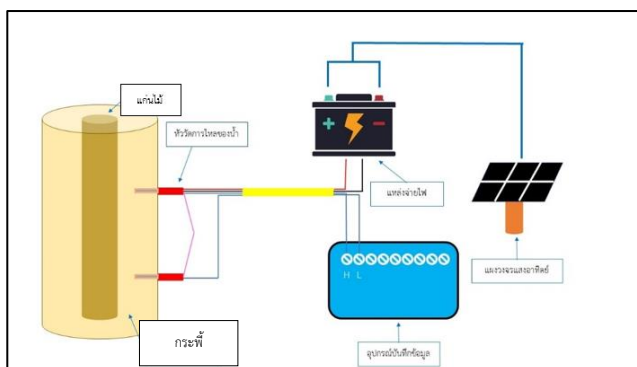
2.4.1 เทคนิคการวัดการคายน้ำของป่า

ในการวัดการคายน้ำของป่านั้น จะนิยมใช้วิธีวัดการไหลของน้ำในต้นไม้ (sap flow) กับความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) แล้วนำค่าทั้งสองมาคำนวณรวมกันด้วยวิธีการ scaling up บนพื้นฐานของสถิติ (Oishi et al., 2008; Tor-ngern et al., 2017) ส่วนนี้จะอธิบายหลักการของการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นไม้โดยสังเขป และจะเน้นรายละเอียดของความหนาของกระพี้ และการวัดค่า เนื่องจากเป็นตัวแปรศึกษาหลักของงานวิจัยนี้

2.4.1.1 การไหลของน้ำในต้นไม้ (sap flow)

การวัดการไหลของน้ำ (sap flow) เป็นการวัดอัตราการไหลของน้ำในหน่วยปริมาตรต่อเวลาในลำต้นของพืช โดยเฉพาะต้นไม้ (Tree) อัตราการไหลของน้ำจะได้รับอิทธิพลจากปัจจัยแวดล้อมหลายปัจจัย เช่น อุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ซึ่งมักใช้ค่าความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศ (Vapor pressure deficit) เป็นตัวแทนสถานะความชื้นในอากาศ ความเข้มแสงอาทิตย์ ความชื้นในดิน ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของต้นไม้ เช่น ซีพลักษณ์ การเรียงตัวของพอร์ (Pore) เป็นต้น (Granier, Loustau, and Bréda, 2000) โดยหนึ่งในวิธีที่นิยมใช้วัดการไหลของน้ำคือ การอาศัยหลักการกระจายความร้อน (Heat dissipation) ด้วยการติดตั้งหัววัดความร้อนอันประกอบด้วย Thermocouple จำนวน 2 หัววัด เข้าไปในส่วนของกระพี้ (Sapwood) ในแนวตั้งห่างกันประมาณ 10-15 เซนติเมตร หัววัดที่อยู่ด้านบน จะถูกให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องผ่านกระแสไฟฟ้าอ่อน ๆ ส่วนหัววัดที่อยู่ด้านล่างจะถูกปล่อยให้วัดอุณหภูมิของกระพี้ตามความเป็นจริง (Lu, Urban, and Zhao, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ข้อมูลอัตราการไหลของน้ำจะถูกตรวจวัดผ่านความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองหัววัดนี้ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วของการไหลของน้ำผ่านหัววัดทั้งสอง วิธีนี้สามารถใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในลำต้นที่เกี่ยวกับการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้น้ำของต้นไม้ รวมถึงสามารถใช้ในการประเมินการคายน้ำในระดับป่า เมื่อทราบความหนาของกระพี้ในต้นไม้ในป่าทั้งหมด (Tang et al., 2006) ซึ่งมีข้อจำกัด

หลายประการ และจำเป็นต้องหาวิธีประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทั้งป่า ดังวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้



ภาพที่ 2.3 แสดงระบบของการวัดอัตราการไหลของน้ำ (Sap flow) แบบสมบูรณ์ (ดัดแปลงจาก Lu et al., 2004)

เมื่อวัดค่าอัตราการไหลของน้ำได้แล้ว สามารถนำไปใช้คำนวณอัตราการคายน้ำของทั้งป่าได้ ดังสมการ (2.6) ง่ายๆ ดังนี้

$$\text{อัตราการคายน้ำของป่า} = \frac{(\text{อัตราการไหลของน้ำ} \times \text{พื้นที่ของกระพี้ในต้นไม้ทั้งป่า})}{\text{พื้นที่ป่า}} \quad (2.6)$$

โดยสมการนี้จะมีรูปแบบแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับวิธีการปรับระดับ (scaling up) ของค่าอัตราการไหลของน้ำที่วัดจากต้นไม้ และความหนาของกระพี้ในต้นไม้ที่วัดได้จากต้นไม้ที่สุ่มเลือกบนพื้นฐานทางสถิติ เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้มุ่งเน้นที่จะประเมินอัตราการคายน้ำของป่าเป็นหลัก จึงขออธิบายหลักการคร่าว ๆ ของวิธีนี้ไว้เพียงเท่านี้ เพื่อนำไปสู่หัวใจสำคัญของงานวิจัย กล่าวคือ การวัดความหนาของกระพี้ในต้นไม้ ซึ่งนับว่ายังเป็นงานวิจัยที่มีน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในป่าแถบเขตร้อน

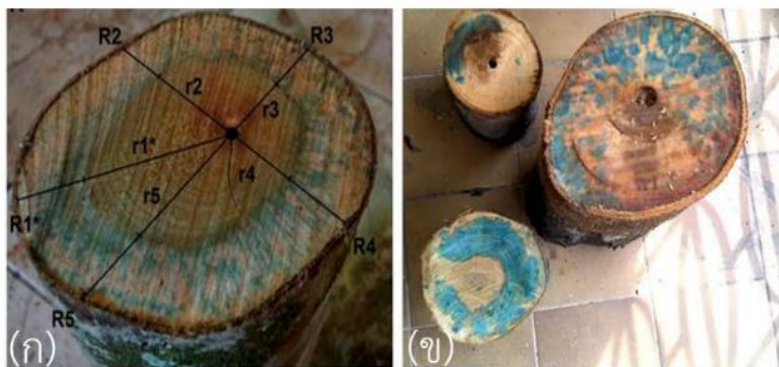
2.5 การวัดความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness)

2.5.1 การวัดความหนาของกระพี้

กระพี้ คือ ส่วนของท่อลำเลียง (Xylem) ที่ยังมีชีวิตของต้นไม้ อยู่ในส่วนกลางของเนื้อไม้ที่มีการเจริญเติบโตอยู่ระหว่างเปลือกชั้นในและแก่นไม้ ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำภายในลำต้น และมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการคายน้ำของต้นไม้และของป่า (Gartner and Meinzer, 2005) ดังภาพที่ 1.1 การใช้ข้อมูลจากความหนาของกระพี้เป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ในการ scaling up ข้อมูลที่ได้จากการวัดการไหลของน้ำจากระดับต้นไปถึงระดับป่า ความหนาของกระพี้ในต้นไม้มีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิ ลักษณะของพอร์ โดยหากเป็น ring-porous wood จะทำหน้าที่ลำเลียงน้ำได้ดีกว่าเนื่องจากมีความกว้างมากกว่าพอร์ลักษณะอื่น ๆ (Swanson 1994) และ ความกว้างของพื้นที่ลำเลียง โดยหากกระพี้ที่มีความหนามากจะมีการลำเลียงของน้ำได้ดีกว่า (Gartner and Meinzer, 2005) แม้ว่าความหนาของกระพี้จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการไหลของน้ำในต้นไม้ และมีความสำคัญในการประเมินอัตราการคายน้ำของป่าดังกล่าวไปแล้ว แต่ในหลายพื้นที่ยังคงไม่ได้รับการสำรวจอย่างเพียงพอ เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น การที่ต้องตัดต้นไม้เพื่อนำส่วนพื้นที่ตัดขวางมาทำการวัดความหนาของกระพี้ซึ่งมักจะไม่ได้รับอนุญาตให้ทำเช่นนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ป่าอนุรักษ์ อันประกอบด้วยป่าดั้งเดิมที่อายุมาก และเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนสำคัญของโลก นอกจากนี้แม้จะมีส่วนตัดขวางของลำต้นมาแล้ว การกำหนดความหนาของกระพี้ก็ถือเป็นเรื่องยากเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน ได้มีการพัฒนาเทคนิคในการกำหนดความหนาของกระพี้ได้ 2 ประเภท ได้แก่ เทคนิคการวัดความหนาของกระพี้โดยทำการทำลายต้นไม้ และเทคนิคการวัดความหนาของกระพี้ที่ไม่ทำลายต้นไม้ ดังนี้

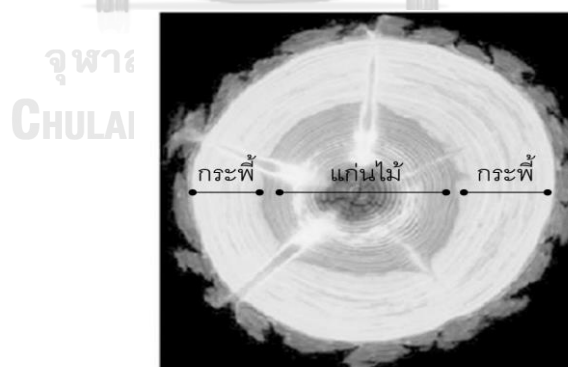
2.5.1.1 เทคนิคการวัดความหนาของกระพี้โดยทำการทำลายต้นไม้

1) การตัดโดยตรงจากท่อนไม้ โดยเทคนิคนี้จะเป็นการตัดต้นไม้ให้ได้เป็นท่อน จากนั้นนำท่อนไม้ไปแช่ในสารละลาย (0.1% indigo carmine) อย่างน้อย 4 ชั่วโมง หรือจนกว่าสีย้อมจะติดลงบนพื้นผิวของท่อนไม้ เมื่อสีย้อมติดบนผิวหน้าของท่อนไม้แล้วจะมีการวัดความหนาของกระพี้และแก่นไม้ ดังภาพที่ 2.4 (Aparecido et al., 2016) โดยวิธีนี้เหมาะกับการทำในพื้นที่ป่าปลูก ไม่เหมาะกับการทำในต้นไม้ธรรมชาติเพราะต้องทำการโค่นต้นไม้เพื่อใช้ในการศึกษา ซึ่งมีข้อจำกัดในการขออนุญาตเพื่อทำการศึกษาเช่นนี้



ภาพที่ 2.4 แสดงถึงลักษณะของตัวอย่างที่ถูกตัดโค่นลงมาจากต้นไม้ และผ่านการย้อมสี (0.1% indigo carmine) ภาพ ก แสดงถึงกระพี้ และแก่นไม้ในต้นไม้ ภาพ ข แสดงถึงตัวอย่างหลังจากการย้อมสี (Aparecido et al., 2016)

2) การใช้วิธี Computerized Tomography Scan; CT scan เป็นเทคนิคที่อาศัยการตัดต้นไม้โดยตรง และใช้เป็นแผ่นไม้หน้าตัดของลำต้น ในการวิเคราะห์ความหนากระพี้ และใช้เครื่อง CT scan ในการประเมินส่วนประกอบของไม้ โดยอาศัยความหนาแน่น และความชื้นระหว่างแก่นไม้และกระพี้ที่ต่างกันในกรณีวิเคราะห์ วิธีนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากข้อจำกัดด้านงบประมาณ และอุปกรณ์ (Lubczynski, Chavarro-Rincon, and Rossiter, 2017)

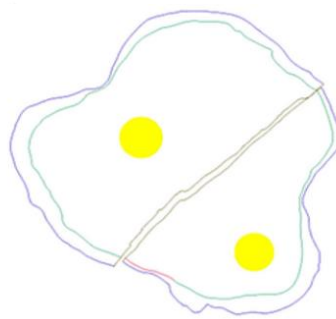


ภาพที่ 2.5 แสดงถึงลักษณะตัวอย่างที่ถูกทำในวิธี Computerized Tomography Scan; CT scan
ดัดแปลงจาก (Lubczynski, Chavarro-Rincon, and Rossiter, 2017)

3) การวัดจากภาพถ่ายต่อไม้ เทคนิคนี้เป็นการถ่ายภาพจากต่อไม้ที่มีการผูกกร่อนหรือ โดนไฟป่า โดยขั้นตอนแรกจะทำการตัดโดยใช้เลื่อยเพื่อให้พื้นที่หน้าตัดมีความเสมอกัน หลังจากนั้นจะทิ้งไว้ประมาณ 2 เดือนต่อไม้จะเปลี่ยนสีส่งผลให้สีของกระพี้ และแก่นไม้ต่างกันอย่างชัดเจน จากนั้นทำการถ่ายภาพแต่ละส่วนของต่อไม้ ตั้งกล้องที่ความสูง 1.7 เมตรเหนือพื้นดิน จากนั้นใช้แผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร วางไว้กับต่อไม้เพื่อถ่ายภาพ จากนั้นนำภาพที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ArcGIS เพื่อคำนวณความหนาของกระพี้และพื้นที่แก่นไม้ ดังภาพที่ 2.6 (Jaskierniak et al., 2015)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.6 ภาพแสดงตัวอย่างต่อไม้ที่ทำการวัดโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ ภาพ ก) แสดงถึงตัวอย่างในพื้นที่หน้าตัดของต่อไม้ที่ทำการศึกษา ภาพ ข) แสดงถึงพื้นที่หน้าตัดต่อไม้ที่ผ่านการวิเคราะห์แล้ว

(Jaskierniak et al., 2015)

2.5.1.2 เทคนิคการวัดความหนากระพี้ที่ไม่ทำลายต้นไม้

1) การวัดจากตัวอย่างแก่นไม้ โดยใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ (Increment borer)

1.1) การวัดโดยตรงจากตัวอย่างแก่นไม้ เป็นเทคนิคพื้นฐานในการตรวจวัดความหนาของกระพี้โดยเทคนิคนี้จะใช้เครื่องมือ Increment borer เจาะเข้าไปประมาณครึ่งต้นเพื่อให้ถึงแก่นไม้ และนำตัวอย่างแก่นไม้ออกมาทำการศึกษาลักษณะของความหนาของกระพี้ โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ เปลือกไม้ (Bark) กระพี้ (Sapwood) และแก่นไม้ (Heartwood) ดังภาพที่ 2.7 โดยจะตรวจสอบโดยสังเกตจากสี สีที่อ่อนกว่าจะเป็นกระพี้ และสีที่เข้มกว่าจะเป็นพื้นที่ของแก่นไม้ (Mitra et al., 2020) เทคนิคนี้นิยมใช้กับชนิดพันธุ์ที่แบ่งแยกสีแก่นไม้กับกระพี้ได้อย่างชัดเจน แต่มีข้อจำกัดในชนิดพันธุ์ที่ไม่สามารถเห็นความหนาของกระพี้ได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 2.7 แสดงลักษณะพื้นที่ของตัวอย่างแก่นไม้ โดยแบ่งได้เป็น เปลือกไม้ (Bark) กระพี้ (Sapwood) และแก่นไม้ (Heartwood) ของชนิดพันธุ์ *Tectona grandis* (G. Yang et al., 2020)

1.2) การย้อมสี เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดความหนาของกระพี้เนื่องจากมีราคาถูก และไม่ทำให้ต้นไม้เสียหายมากเกินไป ขั้นตอนแรกจะใช้เครื่องมืออุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ (Increment borer) ในการเจาะเข้าไปในลำต้นของต้นไม้ที่ทำการศึกษาที่ระยะความลึกประมาณครึ่งหนึ่งของลำต้น จากนั้น นำแก่นไม้ที่เจาะได้ มาย้อมด้วยสีย้อมอินดิเคเตอร์ โดยสีย้อมจะทำหน้าที่แยกความแตกต่างระหว่างกระพี้ (Sapwood) กับแก่นไม้ โดยในกระพี้และแก่นไม้จะมีค่า pH ที่ต่างกัน พร้อมทั้งในกระพี้มีน้ำไหลผ่านและมีแป้งสะสมอยู่มากกว่าแก่นไม้ รวมถึงในแก่นไม้มีการสะสมของแทนนิน และลิกนิน ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่ต่างกัน สีย้อมที่ใช้มีหลากหลาย ได้แก่ Methyl Orange (Burgess and Downey, 2014), Safranin (Lubczynski, Chavarro-Rincon, and Rossiter, 2017), iodine solution (Kutscha and Sachs, 1962), Red dye (Reyes-García et al., 2012) เป็นต้น จากนั้นทำการวัดความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) โดยใช้เวอร์เนียหรือไม้บรรทัด ดังแสดงในภาพที่ 2.8



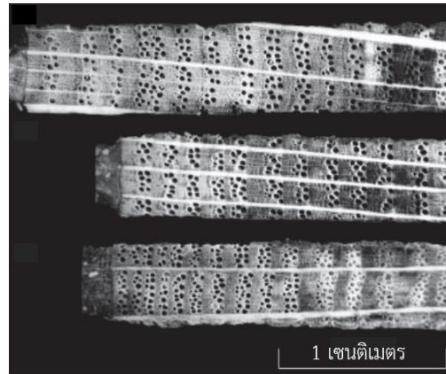
ภาพที่ 2.8 แสดงการวัดขนาดความหนาของกระพี้และลักษณะของตัวอย่างแก่นไม้โดยใช้สีย้อมเมทิลออเรนจ์ 0.1 % (Burgess and Downey, 2014)

1.3) การวัดตัวอย่างแกนไม้ภายใต้แสงอาทิตย์ หรือแสงเทียม เป็นเทคนิคที่เก็บตัวอย่างแกนไม้ให้ครอบคลุมทั้งลำต้นโดยการใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างเนื้อไม้เจาะทะลุลำต้น เพื่อดูความแตกต่างของกระพี้และแกนไม้ภายใต้แสงอาทิตย์หรือแสงเทียม ในส่วนของกระพี้จะมีความโปร่งแสงกว่าส่วนแกนไม้เนื่องจากกระพี้มีน้ำไหลผ่านและมีน้ำกักเก็บไว้ รวมถึงความพรุนกว่า (Quiñonez-Piñón and Valeo, 2018) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะของตัวอย่างแกนไม้โดยใช้เทคนิคการวัดภายใต้แสงอาทิตย์โดยตัวอย่างแกนไม้ ทำให้เห็นถึงแกนไม้และกระพี้ ของชนิดพันธุ์ *Pseudotsuga Menziesii* (Quiñonez-Piñón and Valeo, 2018)

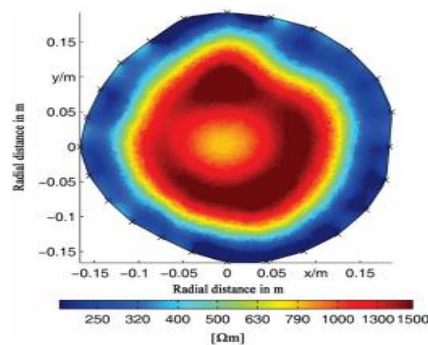
1.4) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เทคนิคนี้เป็นการวัดความหนาของกระพี้ได้แม่นยำ โดยขั้นตอนแรกต้องทำการนำแกนไม้ที่ได้จากการเจาะ โดยใช้ Increment borer มาทำการตัดแนวขวาง วางลงบนสไลด์ และย้อมสีด้วยสี safranin, methyl-blue จากนั้นนำมาตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่มีความแม่นยำสูง มาใช้แยกความแตกต่างระหว่างกระพี้ และแกนไม้ โดยกระพี้จะมีลักษณะเป็นท่อกว้าง ในขณะที่พื้นที่แกนไม้จะไม่มีท่ออยู่และเต็มไปด้วยไทลอส (Burgess and Downey, 2014) ดังแสดงในภาพที่ 2.10 โดยเทคนิคนี้ไม่ได้รับความนิยมมากนักเนื่องจากมีราคาที่สูง



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะของตัวอย่างเมื่อทำการวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอเล็กตรอน
(Burgess and Downey, 2014)

2) การใช้ Electrical Resistivity Tomography (ERT) เป็นเทคนิคที่ใช้กระแสไฟฟ้าในการตรวจสอบความหนาของกระพี้โดยอาศัยการเอกซเรย์ภายในลำต้นของต้นไม้ เป็นเทคนิคที่רבกวนต้นไม้ที่น้อยที่สุด โดยเทคนิคนี้จะติดตั้งขั้วไฟฟ้าบวกและลบเป็นคู่ให้มีระยะห่างเท่ากันรอบต้นไม้ โดยกระแสไฟฟ้าความถี่ต่ำ ($8 \frac{1}{3}$ Hz) จะถูกส่งผ่านคู่ของขั้วไฟฟ้า และทำการวัดเป็นคู่รอบต้นไม้ โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านไอออนของน้ำในเนื้อเยื่อภายในต้นไม้ และแสดงถึงความแตกต่างกันในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงในกระพี้ และความชื้นต่ำในพื้นที่ของแก่นไม้ โดยการใช้การไล่ระดับสี ใช้โปรแกรม DC2d ในการวิเคราะห์ผล (H. Wang et al., 2016) โดยวิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีราคาที่สูง และต้องใช้เครื่องมือเฉพาะในการวัด

CHU



ภาพที่ 2.11 ลักษณะภายในลำต้นของต้นไม้ โดยสามารถแบ่งตามสีอย่างชัดเจน สีน้ำเงินคือ กระพี้ไม้ (Sapwood) ตำแหน่งสีเหลืองเป็นพื้นที่ที่กำลังจะเปลี่ยนเป็นแก่นไม้ส่วน สีแดงแสดงถึงพื้นที่แก่นไม้ (Heartwood)
(H. Wang et al., 2016)

3) การวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์การวัดวงปี (Lintap) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้วัดความหนาของกระ皮ไม้ โดยใช้อุปกรณ์การวัดวงปี ซึ่งอุปกรณ์นี้จะมีความแม่นยำสูงและเป็นการวัดที่เชื่อถือได้ สามารถทำได้ทั้งในแผ่นไม้ที่ตัดโดยตรงจากลำต้น และแกนไม้ที่ได้จากอุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ โดยในการวิเคราะห์ความหนาของกระ皮และแกนไม้จะใช้ร่วมกับโปรแกรม TSAP วิธีนี้ไม่ค่อยได้รับความนิยมนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ (Y. Wang et al., 2019)

2.5.2 การสร้างสมการอัลโลเมตริก

การใช้วิธีอัลโลเมตริกมาประเมินพารามิเตอร์ของต้นไม้ นั้น มีแนวคิดหลักคือ การเจริญเติบโตของร่างกายทั้งหมดของสิ่งมีชีวิตมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตของอวัยวะใดอวัยวะหนึ่งของร่างกาย ซึ่งจะแสดงผ่านความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของร่างกายทั้งหมด และอัตราการเติบโตของอวัยวะหนึ่ง โดยมีสมการหลากหลายรูปแบบที่ถูกนำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์นี้ โดยมีการศึกษาของ Pruy, Harmon, and Gartner (2003) ที่สร้างสมการในรูปแบบการวิเคราะห์สมการเอกซ์โพเนนเชียลเพื่อคำนวณความหนาของกระ皮ที่สมการที่ 2.7 ดังนี้

$$ST = a \cdot (1 - e^{-b \cdot DBH}) \quad (2.7)$$

โดยที่ ST คือ ความหนาของกระ皮ในต้นไม้

DBH คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก

a และ b คือ ค่าคงที่ของสมการ

นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาหลายงานวิจัยที่สร้างสมการเชิงอัลโลเมตริกเพื่อวิเคราะห์ความหนาของกระ皮 โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ในรูปแบบฟังก์ชันยกกำลังในการสร้างสมการอัลโลเมตริกเพื่อคำนวณหาความหนาของกระ皮ที่โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระ皮และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกดังสมการที่ 2.8 ได้ดังนี้

$$ST = a \cdot DBH^b \quad (2.8)$$

โดยที่ ST คือ พื้นที่ของกระ皮ในต้นไม้

DBH คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก

a และ b คือ ค่าคงที่ของสมการ

จากหลักการของวิธีอัลโลเมตริก สามารถประมาณความหนาของกระพี้ ได้โดยใช้ตัวแปรอิสระเป็นขนาดของอวัยวะของต้นไม้ที่มีความสัมพันธ์กับความหนาของกระพี้ทั้งหมดของต้นไม้ โดยขนาดของอวัยวะที่ใช้เป็นตัวแปรอิสระมักเป็นค่าที่วัดได้ง่าย เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ความสูงดัชนีพื้นที่ใบ เส้นผ่านศูนย์กลางเรือนยอด เป็นต้น นำไปแทนค่าลงในสมการอัลโลเมตริก เพื่อคำนวณความหนาของกระพี้ในต้นไม้ที่ต้องการทราบค่าต่อไป โดยเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเป็นที่นิยมวัดมากกว่าเพราะวัดง่ายที่สุด และมีความสัมพันธ์กับความหนาของกระพี้สูง ขั้นตอนที่สำคัญของเทคนิคนี้ คือ การสร้างสมการอัลโลเมตริก โดยมีหลักการคือการสร้างสมการถดถอย (Regression equation) ระหว่างความหนาของกระพี้ (ตัวแปรตาม) และพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างของต้นไม้ (ตัวแปรอิสระ) จากตัวอย่างต้นไม้ที่ทราบขนาดเส้นรอบวง ซึ่งตัวอย่างต้นไม้ดังกล่าวควรมีขนาดอยู่ในช่วงที่ครอบคลุมขนาดเส้นรอบวงของต้นไม้ทั้งหมดในพื้นที่ที่เราต้องการประมาณความหนาของกระพี้ เพื่อให้สมการมีความแม่นยำสำหรับการใช้ประมาณความหนาของกระพี้ในต้นไม้ในป่านั้น ๆ มากที่สุด (ศศิธร พวงปาน, 2555)

วิธีอัลโลเมตริกนี้จะทำให้การประมาณค่าความหนาของกระพี้ในต้นไม้ในป่าทำได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น โดยเพียงแค่วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ทุกต้น แล้วคำนวณความหนาของกระพี้ในต้นไม้แต่ละต้นด้วยสมการอัลโลเมตริก จากนั้น จึงทำการรวมค่าความหนาของกระพี้ในต้นไม้ทุกต้นในพื้นที่ป่าที่ทำการศึกษาและคิดเป็นสัดส่วนต่อพื้นที่ของป่า เพื่อจะได้ความหนาของกระพี้ต่อหน่วยพื้นที่ โดยมีงานวิจัยก่อนหน้าที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างสมการอัลโลเมตริก ดังนี้

อังสุมา พิณทอง และคณะ (2559) ศึกษาการประมาณแก่นไม้ และการกักเก็บคาร์บอนของไม้พะยูนในพื้นที่ สถาบันวิจัยหมีสี จังหวัดนครราชสีมา โดยการสร้างสมการอัลโลเมตริกจากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เชิงโครงสร้าง อาทิเช่น ความสัมพันธ์ของพื้นที่ของกระพี้กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความสัมพันธ์ของแก่นไม้กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกเพื่อใช้ในการประเมินพื้นที่ของกระพี้และแก่นไม้ ที่สามารถใช้ในการคาดการณ์ปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บในต้นพะยูน (*Dalbergia cochinchinensis*) ในการเก็บตัวอย่าง จะทำการตัดต้นไม้โดยตรงเพื่อทำการวัดพื้นที่ของกระพี้และแก่นไม้ จากการศึกษาได้สมการอัลโลเมตริกดังตารางที่ 2.1

Vertessy et al. (1995) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของกระพี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ และการคายน้ำของต้นไม้ ในพื้นที่ป่ายูคาลิปตัส โดยทำการทดลองในต้นไม้ 2 ชนิดพันธุ์ คือ mountain ash (*Eucalyptus regnans*) และ silver wattle (*Acacia dealbata*) เพื่อ

ศึกษาว่าการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ของกระพี้ และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของการคายน้ำของป่าหรือไม่ อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ได้สร้างสมการอัลโลเมตริกเพื่อประเมินในระดับป่า ระหว่างพื้นที่ของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ นอกจากนี้ ยังพบว่าพื้นที่ของกระพี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล เมื่อเทียบกับพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างอื่น ๆ ในการวัดการคายน้ำ และต้นไม้ที่มีพื้นที่ของกระพี้สูงจะมีการคายน้ำที่สูงตามไปด้วย

Vertessy et al. (1997) สร้างสมการระหว่างพื้นที่ของกระพี้ กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และสมการอัลโลเมตริกระหว่างดัชนีพื้นที่ใบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ในต้น mountain ash (*Eucalyptus regnans*) ในพื้นที่ป่าที่ได้รับความเสียหายจากไฟป่า บนอุทยานแห่งชาติ Yarra Ranges ทางตะวันออกเฉียงของออสเตรเลีย โดยมีวัตถุประสงค์ในการสร้างสมการอัลโลเมตริกเพื่อใช้ประเมินร่วมกับการวัดการไหลของน้ำ (Sap flow) และเปรียบเทียบสมการอัลโลเมตริกระหว่างพื้นที่ของกระพี้และดัชนีพื้นที่ใบ ในการวัดพื้นที่ของกระพี้จะทำการตัดจากต้นไม้โดยตรงเพื่อทำการแยกความแตกต่างระหว่างกระพี้กับแก่นไม้ โดยในการทดลองพบว่าสมการอัลโลเมตริกของพื้นที่กระพี้มีส่วนช่วยในการประเมินการคายน้ำร่วมกับการวัดการไหลของน้ำ (Sapflow) ให้มีความแม่นยำ ใกล้เคียงกับสมการอัลโลเมตริกของดัชนีพื้นที่ใบ

Pruyn, Harmon, and Gartner (2003) ศึกษาการหายใจของลำต้นที่มีความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) ต่างกันของชนิดพันธุ์ต้นไม้ในพื้นที่ป่า H.J. Andrews รัฐโอเรกอน ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาสมการอัลโลเมตริกที่ใช้ในการประเมินความหนาของกระพี้เพื่อประยุกต์ใช้เพื่อปรับระดับในการศึกษาการหายใจของลำต้น โดยการสร้างสมการอัลโลเมตริกจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก โดยวิธีการวัดความหนาของกระพี้วัดได้จากตัวอย่างแก่นไม้เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างกระพี้ และแก่นไม้ จากการศึกษาพบว่าต้นไม้ที่มีขนาดระหว่าง 0 - 25 เซนติเมตร มีการเพิ่มขึ้นของกระพี้อย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อต้นไม้มีขนาดเพิ่มขึ้น

X. Wang et al. (2011) ศึกษาสมการอัลโลเมตริกของพื้นที่ของกระพี้ และ แก่นไม้ โดยทำการศึกษาในไม้พื้นเมือง 7 ชนิด ในประเทศจีน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกที่เหมาะสมต่อพื้นที่ศึกษา รวมถึงศึกษาพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างที่อาจมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของกระพี้และแก่นไม้ ในการศึกษาได้ทำการวัดพื้นที่ของกระพี้และแก่นไม้ โดยการตัดโดยตรงจากต้นไม้ จากการศึกษาพบว่าแก่นไม้มีความสัมพันธ์กับอายุของต้นไม้มากกว่าพารามิเตอร์เชิงโครงสร้าง ส่วนในพื้นที่ของกระพี้มีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกสูงที่สุด

Reyes-García et al. (2012) ศึกษาการใช้ น้ำของต้นไม้ตระกูลถั่วและต้นไม้ชนิดพันธุ์ที่ไม่อยู่ตระกูลถั่ว ในพื้นที่ Dzibilchaltún ซึ่งเป็นพื้นที่ป่าดิบแล้ง ประเทศเม็กซิโก โดยใช้ต้นไม้ตระกูลถั่ว 8 ชนิดพันธุ์ และต้นไม้ชนิดพันธุ์ที่ไม่อยู่ตระกูลถั่ว 12 ชนิดพันธุ์ การศึกษานี้ได้สร้างสมการระหว่างพื้นที่ของกระพี้ และรัศมีของลำต้นในต้นไม้ที่ทำการศึกษา เพื่อประเมินร่วมกับการศึกษาการไหลของน้ำในต้นไม้ (Sap flow) โดยการวัดพื้นที่ของกระพี้ ด้วยเทคนิคการย้อมสีจากตัวอย่างแกนไม้ โดยใช้สีย้อม Red dye (0.1 % carmine acid) ในการแยกความแตกต่างระหว่างกระพี้และแกนไม้ จากการศึกษาพบว่าต้นไม้ตระกูลถั่วมีการใช้น้ำน้อยกว่าต้นไม้ชนิดพันธุ์ที่ไม่อยู่ตระกูลถั่ว เนื่องจากต้นไม้ตระกูลถั่วมีพื้นที่ของกระพีน้อยกว่าต้นไม้ที่ไม่ใช่ตระกูลถั่ว

Lubczynski, Chavarro-Rincon, and Rossiter (2017) สร้างสมการอัลโลเมตริก ระหว่างพื้นที่ของกระพี้ พื้นที่หน้าตัดของลำต้น และเรื่อนยอดในต้นไม้ 9 ชนิดพันธุ์ที่พบได้ทั่วไป ในพื้นที่อุทยาน Kalahari ทางตอนกลางของประเทศบอตสวานา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกพื้นฐานในพื้นที่ เพื่อใช้ในการประเมินการคายน้ำ รวมถึงใช้ในการประเมินชีวมวลของต้นไม้ ในอนาคต ในการวัดพื้นที่ของกระพี้จะตัดจากต้นไม้โดยตรง และย้อมสี จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยใช้ Computerized Tomography Scan; CT scan เพื่อประเมินความหนาของกระพี้และแกนไม้

McIntire (2018) สร้างสมการอัลโลเมตริกของพื้นที่ของกระพี้ เพื่อใช้ในการประเมินการไหลของน้ำในลำต้น (Sap flow) ในป่าสนผสม และป่าผลัดใบในพื้นที่ศูนย์วิจัย Madbury และ Durham มหาวิทยาลัยนิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา โดยการเก็บตัวอย่างพื้นที่ของกระพี้ จะทำอยู่ 2 แบบ คือ เก็บจากตอไม้ และต้นไม้โดยตรง โดยการเก็บตัวอย่างจากตอไม้จะใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ (Increment borer) และการเก็บตัวอย่างจากต้นไม้จะทำการตัดต้นไม้โดยตรงเพื่อวัดความหนาของกระพี้

Mitra et al. (2020) สร้างสมการอัลโลเมตริก โดยใช้พื้นที่ของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ ความสูง และเส้นผ่านศูนย์กลางของเรื่อนยอด ในพื้นที่ระบบนิเวศที่ต่างกัน 2 แห่ง ได้แก่ นิวกินี และแอฟริกา ในทางตะวันออกเฉียงใต้ของอเมริกา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำสมการอัลโลเมตริกที่สร้าง ไปประเมินร่วมกับการวัดการไหลของน้ำในต้นไม้ (Sap flow) ในการศึกษาได้ใช้ชนิดพันธุ์ที่พบได้ทั่วไปในพื้นที่ในการทำการทดลอง โดยวัดพื้นที่ของกระพี้ โดยตรงจากแกนไม้ จากการศึกษาพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของกระพี้ มากกว่าปัจจัยอื่น ๆ และพบอีกว่าชนิดพันธุ์เดียวกันหากเจริญต่างพื้นที่กันจะมีรูปแบบสมการที่ต่างกัน เนื่องจากปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม

Aparecido et al. (2019) สร้างสมการอัลโลเมตริกของต้นไม้ในพื้นที่แอมะซอนในประเทศบราซิล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกของพื้นที่ของกระพี้ ที่มีความแม่นยำของต้นไม้ 26 ชนิดพันธุ์ในพื้นที่ป่าแอมะซอน จากผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ของกระพี้มีความสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้ มากกว่าพารามิเตอร์เชิงโครงสร้างอื่น ๆ และมีความแตกต่างของขนาดพื้นที่ของกระพี้ของกลุ่มชนิดพันธุ์ที่มีลักษณะของรูปแบบการกระจายของท่อลำเลียง (porous) ชนิดเดียวกัน เช่น ในชนิดพันธุ์ในกลุ่มที่มีลักษณะท่อลำเลียงแบบกระจายแบบสม่ำเสมอ (Diffuse-porous wood) จะมีขนาดของพื้นที่ของกระพี้ต่างกัน เนื่องจากต้นไม้แต่ละชนิดมีกายวิภาคต่างกันนอกเหนือจากการกระจายของท่อลำเลียง ได้แก่ เนื้อไม้ ไทลอส การสะสมของสารประกอบต่าง ๆ เป็นต้น

Y. Wang et al. (2019) สร้างสมการอัลโลเมตริกของต้นสน (*Larix principis-rupprechtii*) เพื่อใช้ในการประเมินการคายน้ำร่วมกับการวัดการไหลของน้ำในต้นไม้ (Sap flow) ในระดับพื้นที่ต่าง ๆ ของเทือกเขา Liupan ทางตอนใต้ของประเทศจีน โดยมีวัตถุประสงค์ในการประเมินการใช้น้ำของต้นสน (*Larix principis-rupprechtii*) ใน 3 พื้นที่การทดลอง ในแปลงที่ 1 อยู่กลางเนินเขา มีความหนาแน่นของต้นไม้ 930 ต้นต่อเฮกตาร์ แปลงที่ 2 อยู่ล่างเนินเขา มีความหนาแน่นของต้นไม้ 933 ต้นต่อเฮกตาร์ และแปลงที่ 3 อยู่ล่างเนินเขา มีความหนาแน่นของต้นไม้ 1139 ต้นต่อเฮกตาร์ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นที่ของกระพี้จากเครื่องมือ Lintab5 rings analyzer จากตัวอย่างของแกนไม้จากนั้นนำมาวิเคราะห์กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก จากการศึกษาพบว่าชนิดพันธุ์เดียวกันที่มีการเจริญเติบโตต่างพื้นที่จะมีรูปแบบสมการเชิงอัลโลเมตริกที่ต่างกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปผลการศึกษาร่วมกับการอัลโลเมตริกในป่าโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวมาข้างต้น

ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	ชนิดป่า (พื้นที่ศึกษา)	ชนิดพันธุ์	รูปแบบสมการอัลโลเมตริก	R ²	ที่มา
14° 30' 30.978" เหนือ 101° 28' 58.584" ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (700 – 800 เมตร)	ป่าปลูก ประเทศไทย	<i>Dalbergia cochinchinenses</i>	$SA = 0.0130 \cdot DBH^2 H^{1.02}$	0.98	อังสุมา พิณฑอง และคณะ (2559)
37°34' ใต้ 145°38' ตะวันตก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (750 เมตร)	ป่ายูคาลิปตัส ออสเตรเลีย	<i>Eucalyptus regnans</i> <i>Acacia dealbata</i>	$SA = 0.101 \cdot DBH^{2.31}$ $SA = 0.131 \cdot DBH^{2.31}$	0.96 0.87	Vertessy et al (1995)
37°34' ใต้ 145°38' ตะวันตก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (750 เมตร)	ป่ายูคาลิปตัส ที่มีอายุ 15 ปี ออสเตรเลีย	<i>Eucalyptus regnans</i>	$SA = 0.1006 \cdot DBH^{2.309}$	0.95	Vertessy et al (1997)
37°34' ใต้ 145°38' ตะวันตก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (750 เมตร)	ป่ายูคาลิปตัส ที่มีอายุ 56 ปี ออสเตรเลีย	<i>Eucalyptus regnans</i>	$SA = 0.5269 \cdot DBH^{1.619}$	0.69	

ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	ชนิดป่า (พื้นที่ศึกษา)	ชนิดพันธุ์	รูปแบบสมการอัลโลเมตริก	R ²	ที่มา
44° เหนือ 122° ตะวันตก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (410–1,630 เมตร)	ป่าสน สหรัฐอเมริกา	<i>Abies amabilis</i>	$ST = 5.9 \cdot (1 - e^{-0.05 \cdot DBH})$	-	Pruyn, Harmon, and Gartner (2003)
		<i>Pseudotsuga menziesii</i>	$ST = 4.8 \cdot (1 - e^{-0.07 \cdot DBH})$	0.76	
		<i>Thuja plicata</i>	$ST = 2.2 \cdot (1 - e^{-0.05 \cdot DBH})$	0.34	
		<i>Tsuga heterophylla</i>	$ST = 7.8 \cdot (1 - e^{-0.05 \cdot DBH})$	0.62	
45° 20' 25" เหนือ 127° 30' 34" ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (400 เมตร)	ป่าพืชมณี ประเทศจีน	<i>Pinus koraiensis</i>	$\text{Log}_{10}SA = -0.53(\text{log}_{10}DBH) + 1.94$	0.94	X.Wang et al. (2010)
		<i>Larix gmelinii</i>	$\text{Log}_{10}SA = 0.27(\text{log}_{10}DBH) + 1.32$	0.76	
		<i>Ulmus davidiana</i>	$\text{Log}_{10}SA = -0.78(\text{log}_{10}DBH) + 1.76$	0.87	
		<i>Fraxinus mandshurica</i>	$\text{Log}_{10}SA = -0.43(\text{log}_{10}DBH) + 1.69$	0.96	
		<i>Juglans mandshurica</i>	$\text{Log}_{10}SA = -0.15(\text{log}_{10}DBH) + 1.42$	0.70	
		<i>Phellodendron amurense</i>	$\text{Log}_{10}SA = -1.53(\text{log}_{10}DBH) + 1.42$	0.93	
		<i>Quercus mongolica</i>	$\text{Log}_{10}SA = -1.05(\text{log}_{10}DBH) + 2.1$	0.95	
		<i>Acacia gaueri</i>	$SA = 0.18 \cdot SR^{1.28}$		
21° 05' เหนือ	ป่าดิบแล้ง				Reyes-García

ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	ชนิดป่า (พื้นที่ศึกษา)	ชนิดพันธุ์	รูปแบบสมการอัลโลเมตริก	R ²	ที่มา
89° 35' ตะวันตก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (10 เมตร)	ต้นไม้ตระกูลถั่ว ประเทศเม็กซิโก ป่าดิบแล้ง ต้นไม้ทั่วไป ประเทศเม็กซิโก	<i>Piscidia piscipula</i>		0.66	et al. (2012)
		<i>Senna racemose</i>			
		<i>Ceiba schottii</i>			
		<i>Diospyros cuneata</i>	SA = 2.4 • SR ^{1.97}	0.94	
		<i>Bursera simaruba</i>			
		<i>Acacia erioloba</i>	SA = 0.6 • BA	0.98	
		<i>Terminalia sericea</i>	SA = 0.53 • BA	0.99	
		<i>Burke Africana</i>	SA = 0.77 • BA	0.99	
		<i>Dichrostachys cinerea</i>	SA = 0.39 • BA	0.99	
		22° 20' ใต้ 26°20' ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (1100 - 1250 เมตร) ประเทศบอตสวานา	ป่าทุ่งหญ้า (แถบแอฟริกา)	<i>Ochna pulchra</i>	
<i>Acacia fleckii</i>	SA = 0.79 • BA			0.99	
<i>Acacia luederitzii</i>	SA = 0.66 • BA			0.99	
<i>Lonchocarpus nelsii</i>	SA = 0.62 • BA			0.99	
<i>Boscia albitrunca</i>	SA = 0.71 • BA			0.96	
<i>Pinus strobus</i>	SA = 0.234 • DBH ^{1.93}			0.87	
43° 10' เหนือ	ป่าสนผสม				

ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	ชนิดป่า (พื้นที่ศึกษา)	ชนิดพันธุ์	รูปแบบสมการอัลโลเมตริก	R ²	ที่มา	
70° 55' ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (45 เมตร)	สหรัฐอเมริกา				McIntire (2018)	
35° 50' 57" เหนือ 106° 27' 3" ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (2167–3434 เมตร)	ป่าเบญจพรรณ New Mexico สหรัฐอเมริกา	<i>Picea engelmannii</i> <i>Populus tremuloides</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i>	SA = 1.02•DBH ^{1.86} SA = 0.02•DBH ^{2.78} SA = 1.64•DBH ^{1.73}	0.95 0.97 0.91	Mitra et al. (2020)	
32° 26' 34.80" เหนือ 110° 47' 16.80" ตะวันออก ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (2000 - 2300 เมตร)	ป่าเบญจพรรณ Arizona สหรัฐอเมริกา	<i>Pinus ponderosa</i> <i>Pseudotsuga menziesii</i> <i>Pinus ponderosa</i> <i>Acer grandidentatum</i> <i>Abies concolor</i>	SA = 0.36•DBH ^{2.08} SA = 1.81•DBH ^{1.57} SA = 0.61•DBH ^{1.89} SA = 0.37•DBH ^{2.3} SA = 1.43•DBH ^{1.62}	0.95 0.89 0.83 0.93 0.93		
02° 37' 31.8" ใต้ 60° 08' 24.7" ตะวันออก	ป่าดิบชื้น (ป่าแอมะซอน)	ต้นไม้ 34 ชนิดพันธุ์เด่น ในพื้นที่ป่าแอมะซอน	SA = 0.823•DBH ^{1.781}	0.46		Aparecido et al. (2019)

ที่ตั้งทางภูมิศาสตร์	ชนิดป่า (พื้นที่ศึกษา)	ชนิดพันธุ์	รูปแบบสมการอัลโลเมตริก	R ²	ที่มา
ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (115 เมตร)	ประเทศบราซิล				
35°29' เหนือ 106°15' ตะวันตก	ป่าสนภูเขา กลางเนินเขา 2394 เมตร a.s.l. ประเทศจีน	<i>Larix principis- rupprechtii</i>	$SA = 0.5425 \cdot DBH^{1.9009}$	0.96	Y. Wang et al. (2019)
	ป่าสนภูเขา ล่างเนินเขา 2276 เมตร a.s.l. ประเทศจีน.	<i>Larix principis- rupprechtii</i>	$SA = 1.1296 \cdot DBH^{1.6744}$	0.94	
ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (1960–2860 เมตร)	ป่าสนภูเขา ล่างเนินเขา 2283 เมตร a.s.l. ประเทศจีน.	<i>Larix principis- rupprechtii</i>	$SA = 0.4494 \cdot DBH^{1.9565}$	0.96	

SA = พื้นที่ของกรวย (cm²), DBH = เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (cm), BA = ค่าพื้นที่หน้าตัด (cm²), ST = ความหนาของกรวย (cm)

SR = รัศมีของลำต้น (m)

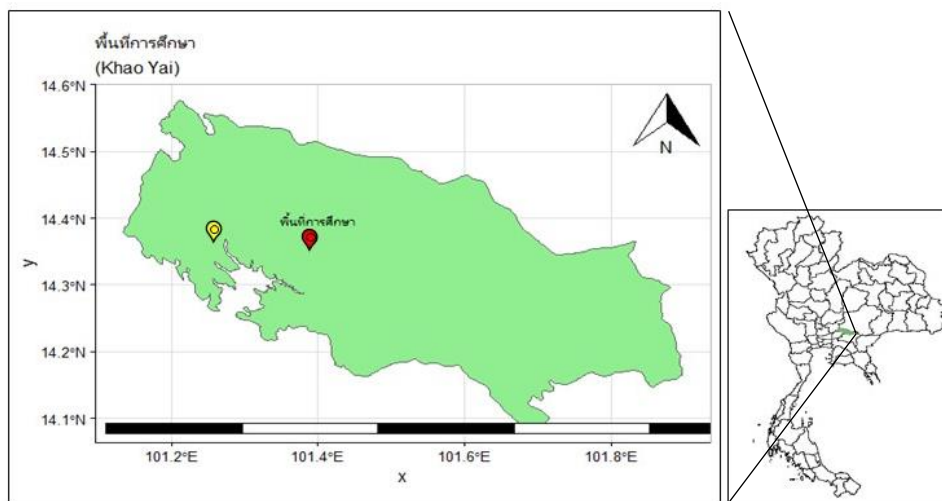
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ทำการศึกษาในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ซึ่งเป็นป่าดิบเขาตั้งอยู่ในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย โดยอยู่ที่พิกัด 14°26'31" เหนือ, 101°22'55" ตะวันออก มีความสูง 700 – 800 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล อุณหภูมิเฉลี่ย 22.4 องศาเซลเซียส มีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 2,100 มิลลิเมตร โดยเป็นข้อมูลระหว่างปี 1994 – 2014 ฤดูฝนอยู่ในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม และมีฤดูแล้งอยู่ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน ในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่มีการกระจายของประเภทป่าชนิดต่าง ๆ ตามการเปลี่ยนแปลงแทนที่ของระบบนิเวศ อาทิเช่น ป่าปฐมภูมิ (Primary forest) และป่าทุติยภูมิ (Secondary forest) ที่มีอายุต่างกันตามอายุและขนาดของต้นไม้ (Brockelman, Nathalang, and Maxwell, 2017) ในการศึกษาครั้งนี้เราได้คัดเลือกแปลงวิจัย 2 แห่งที่ตามการเปลี่ยนแปลงแทนที่ของระบบนิเวศ โดยแปลงวิจัยแห่งแรกคือ แปลงวิจัยมอสิงโต มีขนาดพื้นที่ 30 เฮกตาร์ โดยแปลงวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งขององค์กร ForestGeo ในหน่วยงานของวิทยาศาสตร์ป่าไม้เขตร้อน (CTFS) สถาบันวิจัยเขตร้อนสมิธโซเนียน และเป็นเครือข่ายแปลงวิจัยด้านป่าไม้และติดตามสภาพแวดล้อมของโลก โดยในแปลงวิจัยมอสิงโตมีการวัดขนาดของประชากรต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 1 เซนติเมตร รวมถึงบันทึกตำแหน่งในการทำแผนที่ต้นไม้ ทุก 5 ปี แปลงวิจัยแห่งนี้เป็นตัวแทนพื้นที่ของป่าปฐมภูมิที่มีอายุมากกว่า 200 ปี พันธุ์ไม้ที่พบส่วนใหญ่เป็นไม้ไม่ผลัดใบ และมีความหลากหลายของชนิดพันธุ์สูง เช่น ยางเสียน (*D. gracilis*), สีเสียดเทศ (*C. axillaris*), เหมือดตง (*S. cochinchinensis*), หนอนขี้ควาย (*G. nervosa*), หว่าภูเขา (*S. nervosum*) เป็นต้น มีชั้นเรือนยอดอยู่ระหว่าง 20 – 30 เมตรเหนือพื้นดิน (Brockelman, Nathalang, and Maxwell, 2017) ส่วนแปลงวิจัยอีกแห่งหนึ่ง คือ พื้นที่แปลงวิจัยหนองชิง มีขนาด 2 เฮกตาร์ และอยู่ห่างจากแปลงวิจัยมอสิงโตประมาณ 3 กิโลเมตร โดยแปลงวิจัยหนองชิงมีการวัดขนาดของประชากรต้นไม้ที่มีขนาดมากกว่า 1 เซนติเมตรเช่นเดียวกับแปลงวิจัยมอสิงโต มีความสูงของชั้นเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ที่ 15 เมตร พันธุ์ไม้ส่วนใหญ่เป็นไม้ผลัดใบในฤดูแล้งและความหลากหลายน้อยกว่าป่าปฐมภูมิ โดยชนิดพันธุ์ต้นไม้ที่พบมากในพื้นที่นี้ ได้แก่ หว่าภูเขา (*S. nervosum*), พิกุลป่า (*A. integerrima*), เสม็ดแดง (*S. antisepticum*), ตั้วเกลี้ยง (*C. cochinchinense*) และมีค่าดัชนีพื้นที่

ใบ (Leaf area index) ต่ำกว่าแปลงวิจัยมอสสิงโต แปลงวิจัยแห่งนี้เป็นตัวแทนของพื้นที่ป่าทุติยภูมิที่มีอายุประมาณ 4-5 ปี (Chanthorn, Hartig, and Brockelman, 2017) โดยสรุปข้อมูลไว้ดังตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประเทศไทย อัตราส่วน 1: 600,000 จุดสีแดงแสดงพื้นที่แปลงวิจัยมอสสิงโต (Primary forest) จุดสีเหลืองแสดงถึงพื้นที่แปลงวิจัยหนองซิง (Secondary forest)

ตารางที่ 3.1 สรุปข้อมูลพื้นที่การศึกษา

	แปลงวิจัยมอสสิงโต	แปลงวิจัยหนองซิง
ชนิดป่า	ป่าปฐมภูมิ (Primary forest; PF)	ป่าทุติยภูมิ (Secondary forest; SF)
อายุป่า	มากกว่า 200 ปี	4 – 5 ปี
ขนาดพื้นที่	30 เฮกตาร์	2 เฮกตาร์
ความสูงของเรือนยอด	30 เมตร	15 เมตร
ชนิดพันธุ์เด่น	<i>Dipterocarpus gracilis</i> Blume	<i>Cratogeomys cochinchinense</i> (Lour.) Blume
	<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burtt & Hill	<i>Adinandra integerrima</i> T. And. ex Dyer
	<i>Symplocos cochinchinensis</i> (Lour.) S. Moore	<i>Syzygium antisepticum</i> (Blume) Merr. & L.M.Perry
	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.

3.2 การคัดเลือกชนิดพันธุ์

ในแต่ละแปลงวิจัยเราได้ทำการคัดเลือกชนิดพันธุ์ของต้นไม้ชนิดพันธุ์เด่น โดยพิจารณาจากลำดับของความถี่สัมพัทธ์ของพื้นที่หน้าตัดของต้นไม้แต่ละชนิด (Relative basal area ranking) จากข้อมูลการจัดลำดับในแปลงวิจัยทั้ง 2 แห่ง ได้คัดเลือกชนิดพันธุ์ทั้งหมด 14 ชนิดพันธุ์ โดยเลือกชนิดพันธุ์จากป่าปฐมภูมิมากกว่าเนื่องจากมีความหลากหลายของชนิดพันธุ์มากกว่าป่าทุติยภูมิ แบ่งเป็นชนิดพันธุ์จากป่าปฐมภูมิ 11 ชนิดพันธุ์ และ ชนิดพันธุ์จากป่าทุติยภูมิ 4 ชนิดพันธุ์ โดยมี 1 ชนิดพันธุ์ที่ทำการเลือกจากทั้งในป่าปฐมภูมิและป่าทุติยภูมิ คือ หว่าญเขา (*S. nervosum*) ดังสรุปไว้ใน ตารางที่ 3.2 เมื่อเลือกชนิดพันธุ์แล้ว พิจารณาช่วงขนาดของต้นไม้เพื่อการเก็บข้อมูล โดยอาศัยข้อมูลการแจกแจงของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (diameter at breast height; DBH) ในแต่ละชนิดพันธุ์ที่ได้จากการวัดประชากรต้นไม้ในแปลงวิจัยมอสิงโตในปี 2016 (Brockelman, Nathalang, and Maxwell, 2017) และในแปลงวิจัยหนองชิงปี 2017 (Chanthorn, Hartig, and Brockelman, 2017) จากนั้นกำหนดช่วงขนาดของต้นไม้เพื่อการสุ่มตัวอย่าง โดยแบ่งเป็นช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ช่วงละ 10 เซนติเมตร หากต้นไม้มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากกว่า 100 เซนติเมตร คิดเป็น 1 ช่วง และสุ่มเลือกต้นไม้จำนวน 3 ต้นจากแต่ละช่วง ดังนั้น หากบางชนิดมีช่วงกว้าง ส่งผลให้มีจำนวนต้นไม้รวมของชนิดพันธุ์นั้นมากกว่า และทำการเลือกต้นไม้ที่สมบูรณ์ที่สุด หลีกเลียงต้นไม้ที่เป็นโรค มียอดหัก หรือเป็นโพรง

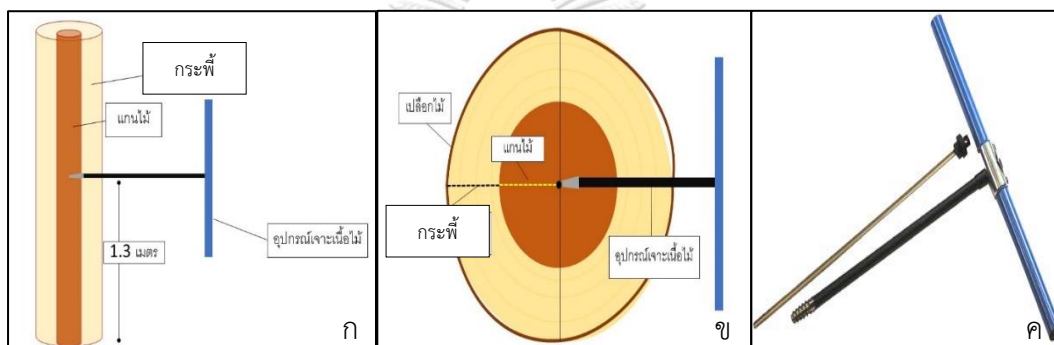
ตารางที่ 3.2 แสดงข้อมูลพื้นฐานของชนิดพันธุ์ต้นไม้ในพื้นที่การศึกษาของแปลงวิจัยมอสิงโต (Primary forest; PF) แปลงวิจัยหนองจิง (Secondary forest; SF) ประกอบด้วย ชนิดพันธุ์ ความถี่สัมพัทธ์ของพื้นที่หน้าตัดของต้นไม้แต่ละชนิด (Relative basal area; %) และช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH; เซนติเมตร) กล่าวคือค่าต่ำสุดและสูงสุดของต้นไม้ในแต่ละชนิดพันธุ์

พื้นที่การศึกษา	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	Relative basal area (%)	ช่วง DBH (เซนติเมตร)
PF	ยางเสียน	<i>Dipterocarpus gracilis</i> Blume	10.54	10.4 – 127
PF	สีเสียดเทศ	<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burtt & Hill	5.85	15.4 – 112
PF	ไม่มีชื่อไทย	<i>Ilex chevalieri</i> Tard.	5	12.1 – 42.5
PF	เหมือดดง	<i>Symplocos cochinchinensis</i> (Lour.) S. Moore	3.4	16 – 52.3
PF	หนอนขี้ควาย	<i>Gironniera nervosa</i> Planch.	4.87	15.5 – 57.4
PF	สะตี่ต้น	<i>Sloanea sigun</i> (Blume) K. Schum.	8.09	10.4 – 54.1
PF	สุรามะริด	<i>Cinnamomum subavenium</i> Miq.	3.23	13.2 – 59.5
PF	อินทวา	<i>Machilus gamblei</i> King ex Hk. f.	0.8	13.5 – 58
PF	ทะโล้	<i>Schima wallichii</i> (DC.) Korth.	1.58	13.7 – 55
PF	คันทาก	<i>Mastixia pentandra</i> Bl. ssp. <i>chinensis</i> (Merr.) Matt.	4.05	13.7 – 56.3
PF / SF	หัว้าภูเขา	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.	3.47/11.95	11.4 – 59.2
SF	พิกุลป่า	<i>Adinandra integerrima</i> T. And. ex Dyer	12.08	11.1 – 30
SF	เสม็ดแดง	<i>Syzygium antisepticum</i> (Blume) Merr. & L.M.Perry	26.52	12.3– 33.5
SF	ตัวเกลี้ยง	<i>Cratoxylum cochinchinense</i> (Lour.) Blume	30.75	10.7– 39.6

3.3 วิธีการวัดความหนาของกระพี้ในต้นไม้

3.3.1 การเก็บตัวอย่างแกนไม้เพื่อวัดความหนาของกระพี้

การเก็บตัวอย่างของกระพี้ในต้นไม้ ทำการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกของต้นไม้เพื่อกำหนดช่วงของขนาดลำต้น ตามตารางที่ 3.2 จากนั้น ทำการวัดเปลือกไม้โดยใช้เวอร์เนีย และกะเทาะเปลือกไม้บริเวณที่ทำการเจาะเนื้อไม้ออกให้หมด ใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ (increment borer; Haglöf, Sweden) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.15 มิลลิเมตร เจาะตัวอย่างเนื้อไม้เพื่อเก็บตัวอย่างแกนไม้ (Mitra et al., 2020) จากลำต้นของต้นไม้ที่ทำการศึกษาทั้ง 14 ชนิด ที่ระดับความสูงจากพื้นดิน 1.3 เมตร (ระดับเพียงอก) โดยเจาะลึกให้ถึงกลางลำต้น ต้นละ 3 ตัวอย่างรอบทิศตามวงศาเส้นรอบวงของต้นไม้ เพื่อให้ครอบคลุมของพื้นที่หน้าตัดของลำต้น



ภาพที่ 3.2 แสดงขั้นตอนและวิธีการในการเก็บตัวอย่างเนื้อไม้เพื่อวัดความหนาของกระพี้

- ก) แสดงตำแหน่งความสูงเหนือพื้นดินในการเก็บตัวอย่างเนื้อไม้โดยใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้
- ข) แสดงภาพแนวตัดขวางในการเก็บตัวอย่างโดยใช้อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้
- ค) อุปกรณ์เจาะเนื้อไม้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.15 มิลลิเมตร

3.3.2 การย้อมสีตัวอย่างแกนไม้

นำตัวอย่างแกนไม้ย้อมสีด้วยสีย้อมเมทิลออเรนจ์ความเข้มข้น 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้ปิเปต สีย้อมช่วยบ่งชี้ความแตกต่างระหว่างความหนาของกระพี้และแกนไม้ โดยหลังจากย้อมแล้ว ให้ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อให้สีซึมเข้าไปในตัวอย่าง เมื่อครบ 15 นาทีแล้ว ในส่วนของความหนาของกระพี้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองอ่อน ส่วนแกนไม้มีสีแดงเข้ม เพราะแกนไม้มีการสะสมของแทนนินและลิกนิน รวมถึงสารแทรกอื่นๆ มากกว่าในกระพี้จึงทำให้เกิดการแยกสีในตัวอย่างแกนไม้ (Palmroth et al., 2010; Mitra et al., 2020; Lubczynski, Chavarro-Rincon, and Rossiter, 2017;

Forrester, Collopy, and Morris, 2010; Burgess and Downey, 2014) จากนั้น ทำการวัดความหนาของกระพี้โดยใช้ไม้บรรทัดหรือเวอร์เนีย



ภาพที่ 3.3 แสดงรูปตัวอย่างแกนไม้ที่ทำการศึกษา

- ก) แสดงขั้นตอนการย้อมสีเมทิลออร์เรนจ์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ปิเปต
- ข) แสดงตัวอย่างแกนไม้ที่ย้อมเป็นเวลา 15 นาทีเสร็จแล้ว และทำการวัดความหนาของกระพี้โดยใช้เวอร์เนีย (Burgess and Downey, 2014)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกของความหนาของกระพี้ไม้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ด้วยโปรแกรม Sigmaplot 12.0 (Systat Software, Inc. San Jose, CA, USA) และได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์โดยแยกข้อมูลตามแต่ละชนิดพันธุ์ เพื่อสร้างสมการจำเพาะสำหรับแต่ละชนิดพันธุ์ และการวิเคราะห์ด้วยข้อมูลของทุกชนิดพันธุ์ในแต่ละแปลงศึกษาซึ่งมีขึ้นการทดแทนต่างกัน ในการวิเคราะห์เหล่านี้ได้คัดเลือกสมการอัลโลเมตริกโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) เศษเหลือคือค่าของความแตกต่างระหว่างข้อมูลกับค่าที่คำนวณจากสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ หากสมการที่ได้นี้ให้ค่าเศษเหลือที่ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับตัวแปรอิสระเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) แสดงว่าสมการดังกล่าวเหมาะสมที่นำมาใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระพี้กับเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก การทดสอบทางสถิติทั้งหมดอยู่ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผล

4.1 ข้อมูลพื้นฐานของชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา

ผลการศึกษาข้อมูลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ความหนาของเปลือก (Bark thickness) และความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) ของชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา 14 ชนิด ในพื้นที่ป่าปฐมภูมิ (Primary forest; PF) และพื้นที่ป่าทุติยภูมิ (Secondary forest; SF) โดยแบ่งเป็นแปลงวิจัยมอสิงโต 11 ชนิด และ แปลงวิจัยหนองชิง 4 ชนิด พบว่า ความหนาของกระพี้มีค่าเฉลี่ย อยู่ระหว่าง 7.6 – 24.8 เซนติเมตร โดยชนิดพันธุ์ที่มีความหนาของกระพีน้อยที่สุดคือ พิกุลป่า (*A. integririma*) และชนิดพันธุ์ที่มีความหนาของกระพี้มากที่สุดคือ สีเสียดเทศ (*C. axillaris*) (ตารางที่ 4.1) และมีความหนาของกระพี้ที่สูงเมื่อเทียบกับข้อมูลของป่าในพื้นที่อื่น ๆ อาทิ เช่น ป่าลัดใบเขตอบอุ่น ของชนิดพันธุ์ 7 ชนิด *Tsuga canadensis*, *Betula lenta*, *Quercus rubra*, *Acer rubrum*, *Pinus strobus*, *Pinus resinosa* และ *Betula papyrife* มีค่าความหนาของกระพี้อยู่ที่ 4.9 – 11.3 เซนติเมตร (Daley et al., 2007) และมีค่าความหนาของกระพี้ไม้สูงกว่าป่าเขตร้อนในประเทศจีน ของชนิดพันธุ์ 4 ชนิด ได้แก่ *Pterocarpus indicus*, *Pterocarpus macrocarpus*, *Pterocarpus marsupium*, *Pterocarpus santalinus* โดยมีค่าเฉลี่ยความหนาของกระพี้อยู่ระหว่าง 5.3 – 8.2 เซนติเมตร (Xu et al., 2016) ทั้งนี้แม้ว่าค่าเฉลี่ยของความหนาของกระพี้ไม่มีค่าน้อยกว่า อาจเป็นเพราะทั้งสองพื้นที่ที่ทำการศึกษาได้ทำการศึกษาต้นไม้ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกอยู่ในช่วง 10 – 30 เซนติเมตร ในขณะที่การศึกษาครั้งนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกอยู่ในช่วง 10 – 130 เซนติเมตร ส่งผลให้ต้นไม้ที่ทำศึกษามีค่าความหนาของกระพี้ไม้ที่สูงกว่า 2 พื้นที่ที่มีการเปรียบเทียบ เนื่องจากความหนาของกระพี้จะเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของต้นไม้ที่ทำการศึกษา (Shelburne, Hedden, and Allen, 1993)

สัดส่วนของความหนาของกระพี้ต่อรัศมีพื้นที่หน้าตัดของต้นไม้ทั้งหมดที่ทำการศึกษาคิดเป็น 46% – 99.3 % ของพื้นที่หน้าตัดของลำต้น โดยความหนาของกระพี้มีช่วงที่กว้างมาก หากเปรียบเทียบกับการศึกษาในพื้นที่ป่าในพื้นที่อื่น พบว่าความหนาของกระพี้มีค่าใกล้เคียงกับชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา อาทิเช่น ป่าเขตร้อนในพื้นที่ป่าแอมะซอน ของชนิดพันธุ์ที่พบได้ทั่วไป 7 ชนิด คือ *Albizia multiflora*, *Crateva benthamii*, *Laetia corymbulosa*, *Nectandra amazonum*,

Pseudobombax munguba, *Tabebuia barbata* และ *Vitex cymose* โดยมีค่าความหนาของ กระจพีเฉลี่ยอยู่ที่ 54% - 92% ของรัศมีลำต้น (Parolin and Müller, 2008) ป่าเขตอบอุ่นทาง ตะวันออกของรัฐเวอร์จิเนีย สหรัฐอเมริกา โดยมีการศึกษาใน 3 ชนิด คือ *Quercus rubra* L, *Acer saccharum* Marsh และ *Liriodendron tulipifera* L. พบความหนาของกระจพีมากถึง 66% - 83% ของพื้นที่หน้าตัดของต้นไม้ (Wiemann, 2004) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Phillips and Bond (2001) ในพื้นที่ป่าไม้เขตร้อนของประเทศปานามา โดยศึกษาในชนิดพันธุ์ 2 ชนิด ได้แก่ *Simarouba amara* Aubl, *Tapirira guianensis* Aubl ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ระหว่าง 14 – 64 เซนติเมตร พบว่ามีความหนาของกระจพีไม้ครอบคลุมเกือบ 100 % ของรัศมีลำต้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ในพื้นที่ของป่าเขตร้อน และมีการกระจายของชนิดพันธุ์ที่มากส่งผลให้มีช่วงของความหนากระจพีที่ กว้าง และชนิดพันธุ์ในป่าเขตร้อนต้องแข่งขันกันเจริญเติบโตส่งผลให้มีการสร้างกระจพีไม้มากกว่าแก่น ไม้ (Hooper, Legendre, and Condit, 2005)



ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลชนิดพันธุ์ของต้นไม้ที่ทำการศึกษา ในพื้นที่ป่าปฐมภูมิ (PF) และป่าทุติยภูมิ (SF) พร้อมทั้งข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ จำนวนตัวอย่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at Breast Height ; DBH) ความหนาของเปลือกไม้ (Bark thickness ; BT) ความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness ; ST) และสัดส่วนของความหนาของกระพี้ต่อรัศมีต้นไม้ (Ratio of sapwood thickness to stem radius ; SR) โดยแสดงค่าเฉลี่ย และ

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

พื้นที่	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน (ต้น)	DBH (ซม.)	BT (ซม.)	ST(ซม.)	SR (%)
PF	ยางเสียน	<i>Dipterocarpus gracilis</i> Blume	30	10.4 – 127	0.41±0.12	10.48±2.76	46.7
PF	สีเสียดเทศ	<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burt & Hill	30	15.4 – 112	0.47±0.05	24.81±10.17	85.4
PF	เหมือดแดง	<i>Symplocos cochinchinensis</i> (Lour.) S. Moore	15	16 - 52.3	0.05±0.01	17.38±6.30	99.3
PF	สุรามะริด	<i>Cinnamomum subavenium</i> Miq.	15	13.2 - 59.5	0.10±0.06	14.63±5.70	83
PF	หนอนชี่ควาย	<i>Gironniera nervosa</i> Planch.	15	15.5 - 57.4	0.17±0.02	17.03±6.32	97
PF	อินทวา	<i>Machilus gamblei</i> King ex Hk. f.	15	13.5 - 58.0	0.08±0.01	11.98±5.29	69.8
PF	คันทาก	<i>Mastixia pentandra</i> Bl. ssp. <i>chinensis</i> (Merr.) Matt.	15	13.7 - 56.3	0.22±0.20	17.00±7.11	97.9
PF	ทะเลเฒ่า	<i>Schima wallichii</i> (DC.) Korth.	15	13.7 - 55.0	0.43±0.08	8.52±3.22	52.7
PF	สะตี่ต้น	<i>Sloanea sigun</i> (Blume) K. Schum.	15	10.4 - 54.1	0.56±0.14	15.34±6.34	92
PF	ไม่มีชื่อไทย	<i>Ilex chevalieri</i> Tard.	12	12.1 - 42.5	0.06±0.02	13.78±5.32	97
PF	หัวกุกเขา	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.	15	11.4 - 59.2	0.47±0.03	12.37±4.57	73
SF	หัวกุกเขา	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.	9	11.0 - 39.5	0.54±0.06	8.94±5.38	66.7

พื้นที่	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	จำนวน (ต้น)	DBH (ซม.)	BT (ซม.)	ST(ซม.)	SR (%)
SF	ตัว	<i>Cratogeomys cochinchinense</i> (Lour.) Blume	9	10.7 - 39.6	0.44±0.14	9.62±3.46	83.5
SF	เสม็ดแดง	<i>Syzygium antisepticum</i> (Blume) Merr. & L.M.Perry	9	12.3 - 33.5	0.31±0.03	10.36±4.02	91
SF	พิกุลป่า	<i>Adinandra integerrima</i> T. And. ex Dyer	6	11.1 - 30.0	0.23±0.01	7.60±1.95	90



4.2 การสร้างสมการอัลโลเมตริก

สร้างสมการอัลโลเมตริก ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression analysis) ระหว่างความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness) และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH) ในชนิดพันธุ์เด่นของพื้นที่แปลงวิจัยมอสิงโต และแปลงวิจัยหนองซิง ได้ทำการวิเคราะห์แยกและรวมทุกชนิดพันธุ์ โดยในการวิเคราะห์ในแต่ละชนิด พบว่าใน ยางเสียน (*D. gracilis*) สามารถแบ่งการวิเคราะห์เป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงของต้นไม้ที่มีขนาดน้อยกว่า 30 เซนติเมตร และ มากกว่า 30 เซนติเมตร เนื่องจากมีความต่างกันของรูปแบบการจัดเรียงของข้อมูล ดังตารางที่ 4.2, ภาพที่ 4.1-ก, 4.1-ค นอกจากนี้ ในกรณีของ หว่าญเขา (*S. nervosum*) ที่เติบโตในทั้งพื้นที่ป่าปฐมภูมิ และป่าทุติยภูมิ สามารถวิเคราะห์ข้อมูลรวมกันได้ เนื่องจากข้อมูลมีการเรียงตัวใกล้เคียงกัน และในชนิดพันธุ์อื่นๆ ที่ทำการศึกษาก็สามารถวิเคราะห์เป็นสมการเดียวโดยไม่จำเป็นต้องมีการแยกวิเคราะห์เนื่องจากไม่มีความต่างกันของรูปแบบการจัดเรียงของข้อมูลในแต่ละชนิด ดังตารางที่ 4.2, ภาพที่ 4.4-จ

จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาสมการที่เหมาะสมกับข้อมูลพบว่าสมการยกกำลัง ($y = a \cdot x^b$) มีความเหมาะสมกับการวิเคราะห์ใน 12 ชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษาก็ได้แก่ ยางเสียน (*D. gracilis*), สีเสียดเทศ (*C. axillaris*), เหมือดตง (*S. cochinchinensis*), หนอนขี้ควาย (*G. nervosa*), สะตีดัน (*S. sigun*), สุรามะริด (*C. subavenium*), ทะโล้ (*S. wallichii*), คันคาก (*M. pentandra*), หว่าญเขา (*S. nervosum*), พิ กูล ป่า (*A. integerrima*), เสริมัดแดง (*S. antisepticum*), ตัวเกลี้ยง (*C. cochinchinense*) และ สมการเส้นตรง ($y = b + ax$) เหมาะสมใน 2 ชนิดพันธุ์ ได้แก่ อินทวา (*M. gamblei*), *I. chevalieri* โดยเหตุผลที่สองชนิดนี้เหมาะสมกับสมการเส้นตรง (Linear) เนื่องจากข้อมูลที่ได้บ่งชี้ว่าชนิดพันธุ์ทั้งสองมีการเจริญเติบโตของกระพี้ในอัตราที่ค่อนข้างคงที่เมื่อขนาดของต้นไม้เพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากชนิดอื่นๆ ที่แสดงให้เห็นว่ามีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วตามรูปแบบสมการยกกำลัง ในการคัดเลือกสมการที่เหมาะสมจะตัดสินจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความเหมาะสมของสมการเพิ่มเติมโดยใช้การวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) พบว่าเศษเหลือไม่มีความสัมพันธ์กับ DBH ในทุกชนิดโดยมีค่า p อยู่ระหว่าง 0.62 - 0.98 จึงสรุปได้ว่าสมการที่ได้มีความเหมาะสมกับรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความหนาของกระพี้ไม้และ DBH ดังสรุปในตารางที่ 4.2 ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Meinzer, Clearwater, and Goldstein (2001) ที่ได้กล่าวหาว่าสมการอัลโลเมตริกที่ใช้ในการประเมินความหนาของกระพี้ไม้ ส่วนใหญ่จะมีรูปแบบสมการยกกำลัง และสมการเส้นตรง นอกจากนี้ Enquist (2002) ได้มีการเสนอการใช้สมการยกกำลัง สำหรับในการประเมินความหนาของกระพี้จากเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก โดยอาศัยเลขยกกำลังสากล คือ $7/3$ (หรือ 2.33) อย่างไรก็ตาม Meinzer et al. (2005) ได้พบว่าเลขยกกำลังสามารถ แบ่งออกได้เป็นอย่างน้อย 3 กลุ่มใน 25 ชนิดพันธุ์ของ

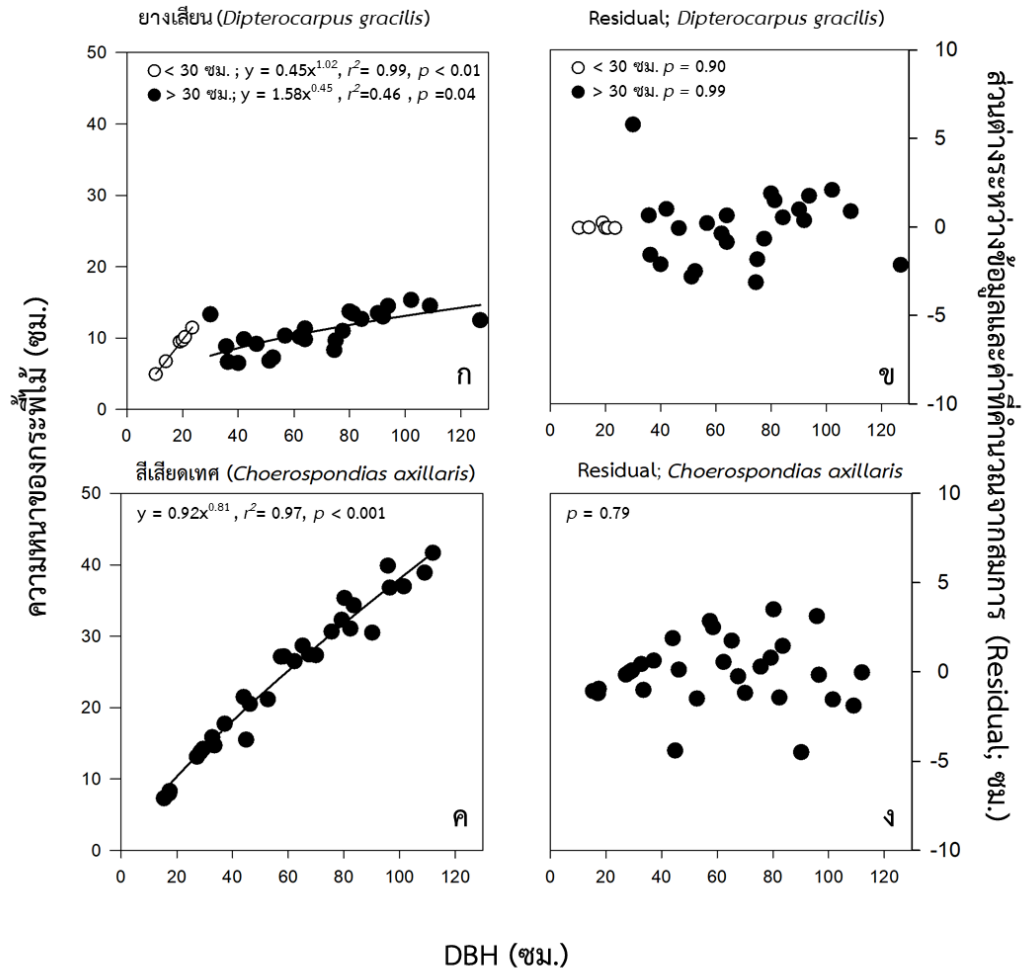
พื้นที่ป่าเขตอบอุ่น และเขตร้อน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.42 – 1.90 โดยข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้มีเลขยกกำลังอยู่ในช่วงระหว่าง 0.45 – 1.02 ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับผลการศึกษาดังกล่าวแต่มีช่วงเลขยกกำลังที่ต่ำกว่า แสดงว่าช่วงของความหนาของกระพี้ไม้มีขนาดเล็กกว่าการศึกษาในพื้นที่อื่น โดยหากต้นไม้มีขนาดเท่ากันความหนากระพี้ไม้ในพื้นที่ศึกษาจะมีขนาดเล็กกว่าเสมอ นอกจากนี้ยังมีเหตุผลในความแตกต่างกันในคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยา สรีระวิทยาของท่อลำเลียงน้ำของพืช ตัวอย่างเช่น ต้นสนที่มีเทรคีด (tracheid) ทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำ และ ต้นไม้จำพวก Angiosperm ที่มี เวสเซล (vessel) ทำหน้าที่ในการลำเลียงน้ำ ส่งผลให้พืชสองจำพวกนี้มีการลำเลียงน้ำที่ต่างกัน นอกจากนี้ความแตกต่างพื้นฐานเหล่านี้ ยังมีความแตกต่างกันอีกหลายประการ อาทิเช่น ขนาดของท่อลำเลียง การกระจายของพอร์ โดยเฉพาะความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของต้นไม้ กับ การไหลของน้ำในลำต้น ในกลุ่มชนิดพันธุ์ต่างๆ ที่มีความแตกต่างกัน รวมถึงสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน ภายในชนิดพันธุ์เดียวกันส่งผลให้เลขยกกำลังมีความต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ และ ชนิดพันธุ์ (Xu et al. 2016)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของกระพี้ไม้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในช่วง (r^2) 0.46 – 0.99 ดังแสดงในรูปภาพที่ 4.1 – 4.5 และมีค่า p น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.04 ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.2 โดยสามารถบอกได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก เป็นตัวแปรที่ดีในการประเมินความหนาของกระพี้ไม้ของชนิดพันธุ์ไม้เด่นในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ได้ โดยผลที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และ กระพี้ไม้มีการเจริญไปพร้อมๆ กันซึ่งเมื่อ ต้นไม้มีขนาดใหญ่ขึ้นการเจริญของกระพี้ก็จะมากขึ้นตาม (Shelburne, Hedden, and Allen 1993) ยกเว้นในต้นไม้เพียงบางชนิดเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกจึงเป็นตัวแปรที่นิยมใช้ในการประเมินความหนาของกระพี้ไม้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Mitra et al. (2020) ที่ได้ทำการศึกษาพื้นที่ของกระพี้ไม้ในพื้นที่ป่าเขตอบอุ่น โดยอาศัย 3 ตัวแปรได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางของเรือนยอด ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) ที่สูงกว่าตัวแปรอื่นๆ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Montagu et al. (2005) ซึ่งพบว่า DBH เพียงตัวแปรเดียวสามารถให้ผลที่ถูกต้องเพียงพอในการประเมินพื้นที่กระพี้ไม้ หากไม่สามารถวัดความสูงได้ จึงสามารถสรุปได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเป็นตัวแปรที่เหมาะสมต่อการสร้างสมการอัลโลเมตริกของความหนากระพี้ไม้

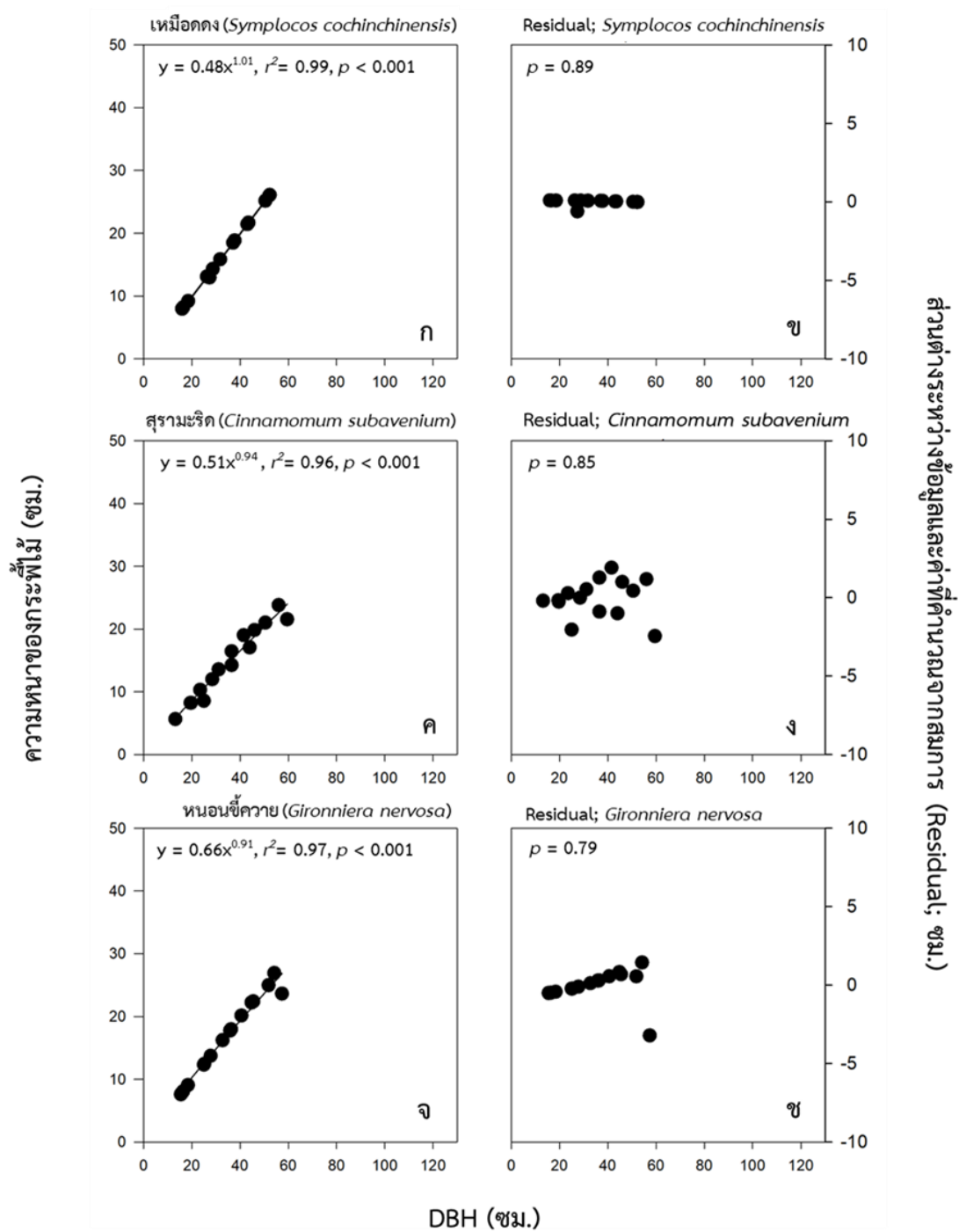
อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากประสิทธิภาพทางสถิติแล้ว อีกเหตุผลที่เลือกเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเป็นตัวแปรอิสระในการศึกษาครั้งนี้ คือ ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกสามารถวัดได้ง่าย และแม่นยำกว่าตัวแปรชนิดอื่นๆ เช่น ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางเรือนยอด ดัชนีพื้นที่ใบ และได้มีการศึกษาของ Montagu et al. (2005) พบว่าการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก มีข้อผิดพลาดอยู่ที่ 3 % ในขณะที่ความสูงของต้นไม้มีข้อผิดพลาดอยู่ที่ 10% -15% ยิ่งไปกว่านั้น การวัดความสูงต้อง

อาศัยผู้เชี่ยวชาญ และต้องใช้แรงงานมากกว่าการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอย่างเดียวเฉพาะในพื้นที่ป่าดิบเขา ที่มีต้นไม้ในปริมาณมากและมีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกันจะส่งผลให้มีการคลาดเคลื่อนในการวัดได้ และในการศึกษาครั้งนี้เราได้สร้างสมการอัลโลเมตริก 2 รูปแบบจากความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และความหนาของกระพี้ไม้ คือ สมการยกกำลัง และสมการเส้นตรง ซึ่งสามารถเทียบกับรูปแบบสมการอัลโลเมตริกในพื้นที่อื่นๆ ที่มีชนิดพันธุ์ใกล้เคียงกับที่ทำการศึกษาก็ได้

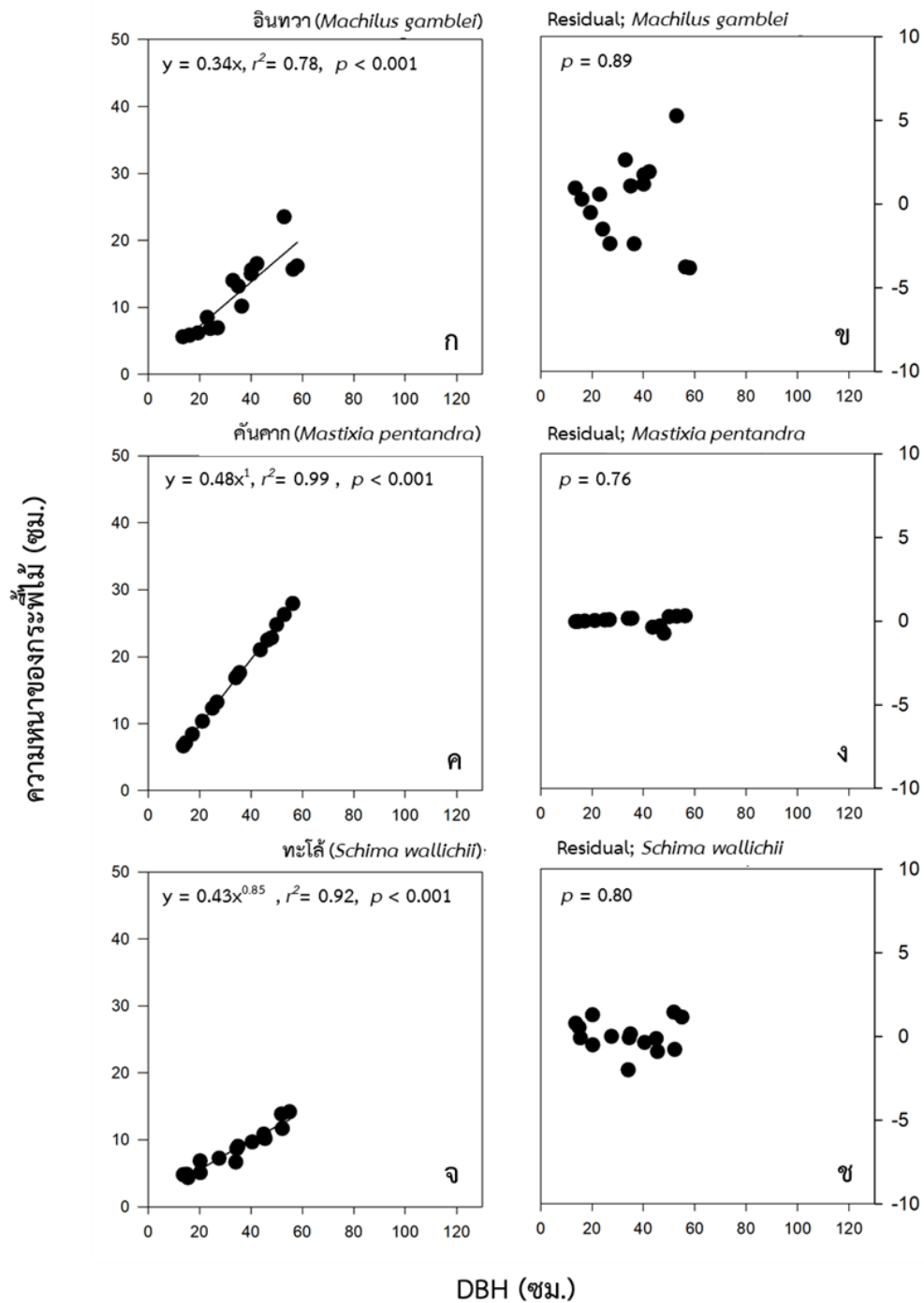
เทคนิคการวัดความหนาของกระพี้เป็นอีกปัจจัย ที่ต้องคำนึงถึง ในปัจจุบันมีเทคนิคการวัดความหนาของกระพี้ไม้มากมาย ซึ่งมีข้อดีข้อเสียต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้ ตัวอย่างเช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน เพื่อกำหนดพื้นที่ความหนาของกระพี้ไม้ ซึ่งเทคนิคนี้มีความแม่นยำสูง แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงตาม และต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการศึกษา (Quiñonez-Piñón and Valeo 2017) โดยเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ เทคนิคการย้อมสีจากตัวอย่างแกนไม้ โดยสีย้อมจะทำปฏิกิริยากับลิกนิน และสารแทรกอื่นๆ ในแกนไม้ส่งผลให้แก่นไม้มีการเปลี่ยนสีเข้มกว่ากระพี้ไม้ แต่เทคนิคนี้มีการรบกวนต้นไม้ โดยการเจาะลำต้นเพื่อเก็บตัวอย่างแกนไม้ ส่งผลให้หลายพื้นที่ไม่สามารถทำได้ ซึ่งเหตุผลที่เลือกเทคนิคนี้คือสามารถวัดในภาคสนามได้ทันทีเนื่องจากต้นไม้ที่ทำการศึกษามีหลายชนิดพันธุ์ที่ต้องทำการศึกษา และหลายช่วงขนาดของลำต้น อย่างไรก็ตามอาจมีการศึกษาในอนาคตโดยใช้เทคนิคอื่นเพื่อยืนยันการใช้เทคนิคย้อมสีนี้ อีกปัจจัยที่อาจส่งผลต่อการวัดความหนาของไม้กระพี้คือ ลำต้นของต้นไม้เป็นโพรงซึ่งพบในป่าเขตร้อนอื่นๆ โดยพบลำต้นเป็นโพรงถึง 83% ของหน้าตัดของลำต้น (Heineman et al. 2015) โดยการศึกษาครั้งนี้ไม่มีการคัดเลือกต้นไม้ที่เป็นโพรงเนื่องจากเราได้เลือกต้นไม้ที่สมบูรณ์แข็งแรงอย่างระมัดระวัง หรือหากพบโพรงในต้นไม้ที่เจาะก็จะคัดต้นนั้นออก นอกจากนี้ การศึกษาครั้งนี้ไม่มีต้นไม้ขนาดใหญ่มากนัก ส่วนใหญ่เป็นต้นไม้ขนาดเล็กถึงขนาดปานกลาง ส่งผลให้ไม่พบต้นไม้ที่เป็นโพรงมากนัก เนื่องจากจะพบต้นไม้ที่เป็นโพรงส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 เซนติเมตร ในพื้นที่ป่าเขตร้อน (Heineman et al. 2015)



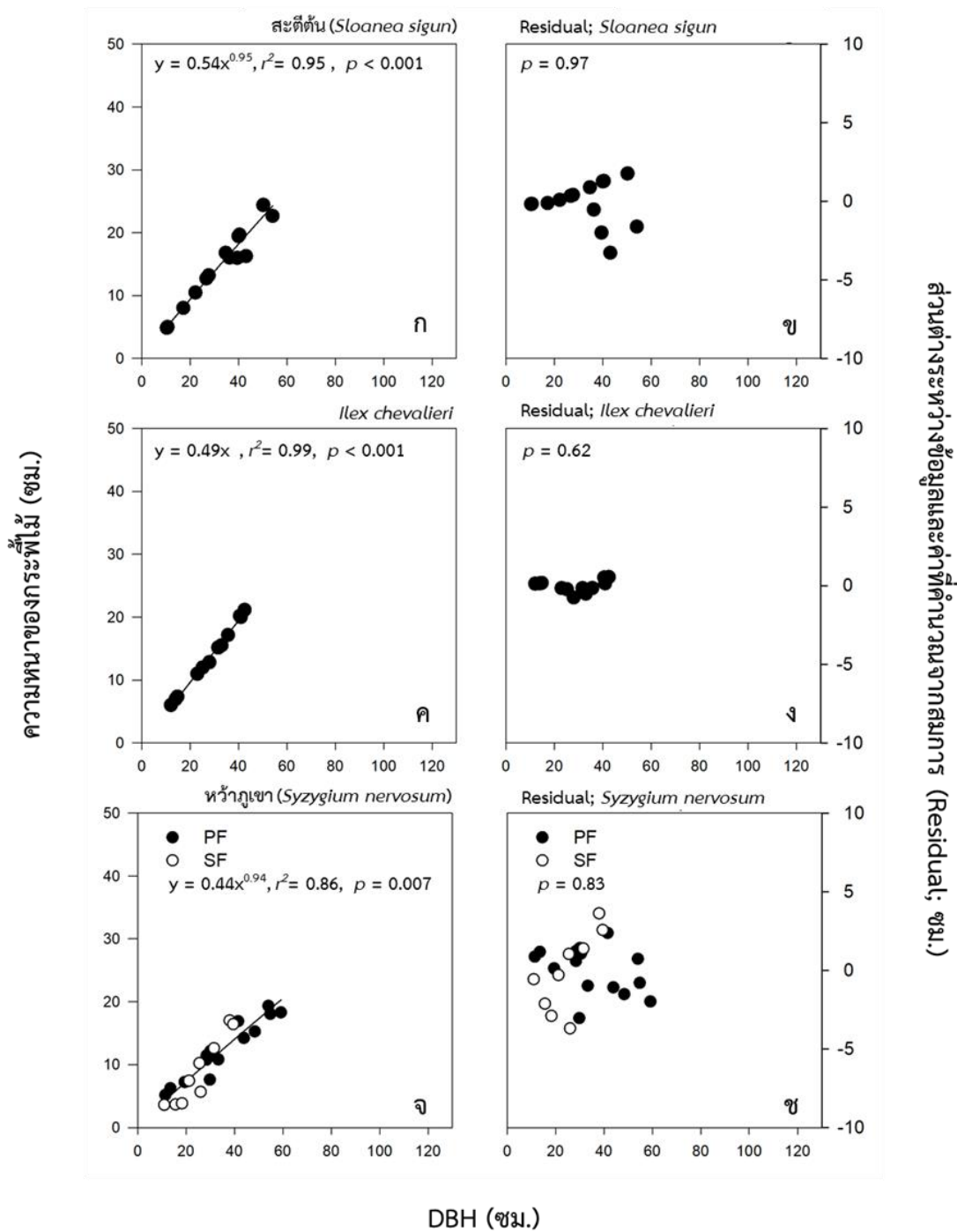
ภาพที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ ยางเสียน (*D. gracilis* ; ก และ ข) และ สีเสียดเทศ (*C. axillaris*; ค และ ง)



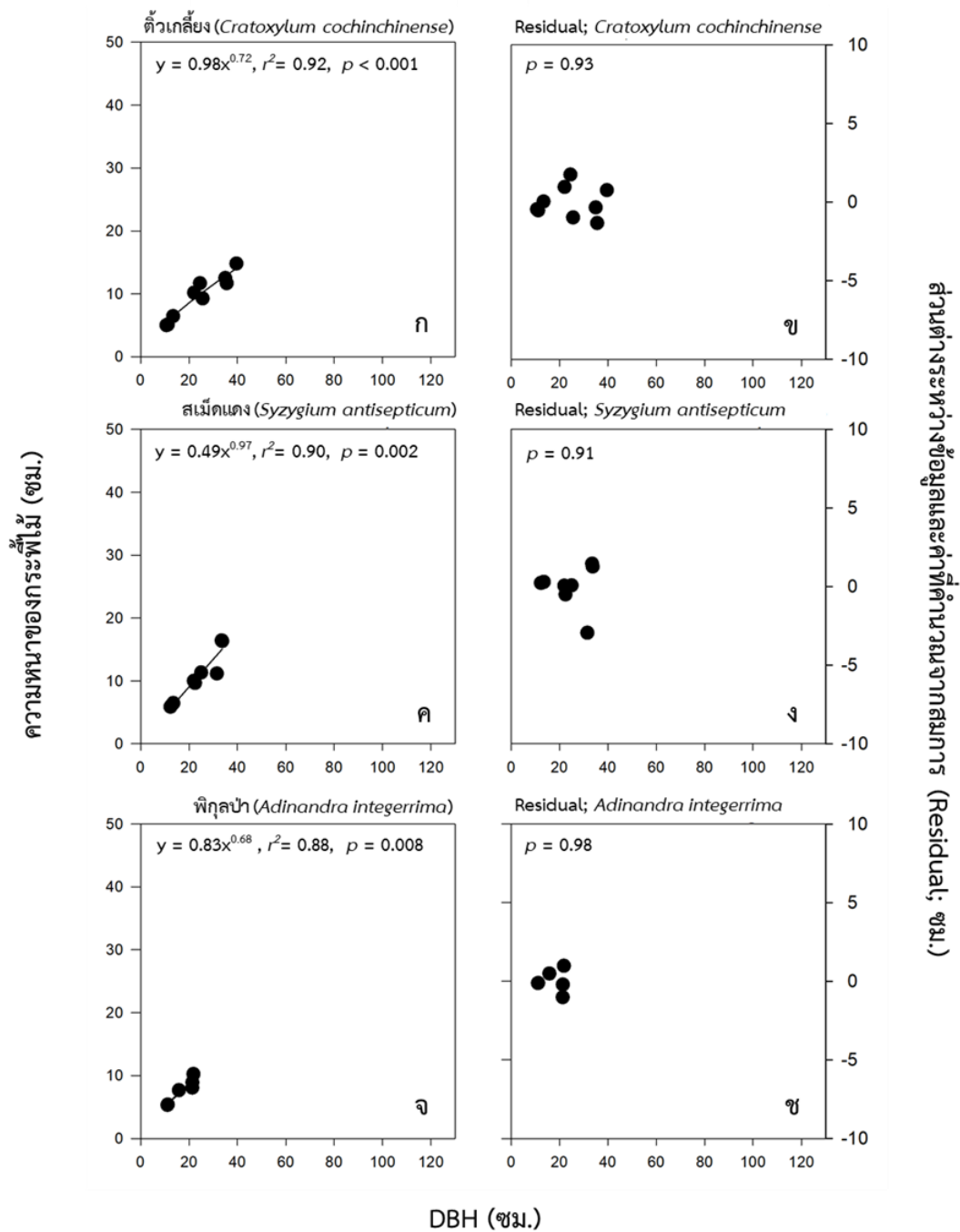
ภาพที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ เหือดคง (*S. cochinchinensis* ; ก และ ข) สุรามะริด (*C. subavenium* ; ค และ ง) และ หนอนขี้ควาย (*G. nervosa* ; จ และ ช)



ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ อินทวา (*M. gamblei* ; ก และ ข) คันทาก (*M. pentandra* ; ค และ ง) และ ทะโล้ (*S. wallichii* ; จ และ ช)

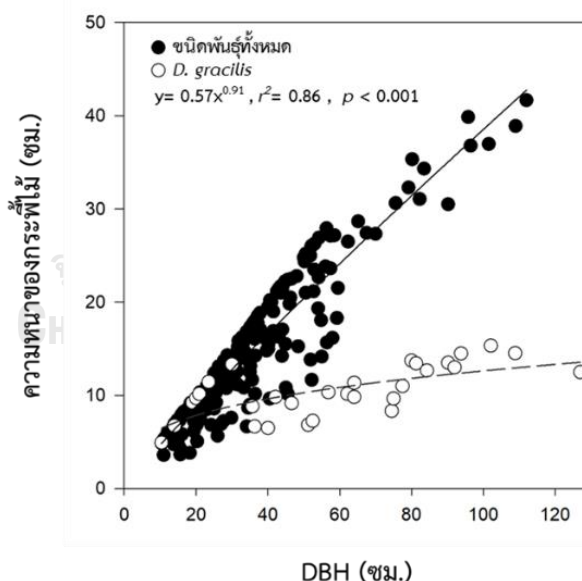


ภาพที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ สะตีดัน (*S. sigun* ; ก และ ข) *I. chevalieri* (ค และ ง) และ หว้า ภูเขา (*S. nervosum* ; จ และ ช) วงกลมสีดำแสดงถึงข้อมูลจากป่าปฐมภูมิ (PF) และ วงกลมสีขาวแสดงถึงข้อมูลจากป่าทุติยภูมิ (SF)



ภาพที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนากระพี้ไม้ (ซม.) และ เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (DBH ; ซม.) และการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual analysis) ในชนิดพันธุ์ ตั้วเกลี้ยง (*C. cochinchinense* ; ก และข) เสม็ดแดง (*S. antisepticum* ; ค และ ง) และ พิกุลป่า (*A. integerrima* ; จ และ ช)

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลของทุกชนิดพันธุ์แล้วพบว่า ยางเสียน (*D. gracilis*) มีรูปแบบการเรียงตัวของข้อมูลต่างจากชนิดพันธุ์อื่นที่ทำการศึกษา จึงแยกชนิดพันธุ์นี้จากการวิเคราะห์ชนิดพันธุ์ทั้งหมด ดังภาพที่ 4.6 ตารางที่ 4.2 เมื่อเปรียบเทียบกับสมการอัลโลเมตริกของความหนาของกระพี้ไม้ของทุกชนิดพันธุ์ กับสมการอัลโลเมตริกในแต่ละชนิดพันธุ์พบว่า สมการอัลโลเมตริกของทุกชนิดยกเว้น *D. gracilis* มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ($r^2 = 0.86$) ที่ต่ำกว่าบางชนิดพันธุ์ที่ได้ทำการศึกษา อาทิเช่น หนอนซี่ควาย (*G. nervosa*), คันทาก (*M. pentandra*) และ *I. chevalieri* ($r^2=0.99$) สอดคล้องกับการค้นพบของ Paul et al. (2013) พบว่าการพัฒนาสมการอัลโลเมตริกของทุกชนิดพันธุ์รวมกันจะทำให้ค่าที่น้อยกว่าการวิเคราะห์แยกชนิดพันธุ์ อย่างไรก็ตามสมการอัลโลเมตริกของทุกชนิดพันธุ์อาจเป็นทางเลือกที่ดีในการประเมินความหนาของกระพี้ไม้ในกรณีที่ไม่ได้มีสมการอัลโลเมตริกเฉพาะชนิดพันธุ์นั้นๆ โดยเฉพาะการประเมินความหนาของกระพี้ไม้ในป่าที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่และมีพันธุ์ไม้หลากหลายชนิด ซึ่งไม่สามารถสร้างสมการเฉพาะชนิดพันธุ์ทั้งหมดได้ (Thurner et al., 2019) โดยทั่วไป สมการอัลโลเมตริกที่สร้างขึ้นมาจะให้ความแม่นยำในเฉพาะพื้นที่ที่ทำการศึกษาเท่านั้น เนื่องจากมีความแปรปรวนของข้อมูล อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมและการเจริญเติบโตของต้นไม้ที่ต่างกันออกไป (He et al., 2018)



ภาพที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ของความหนาของกระพี้ไม้ (ซม.) และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (ซม.) ของชนิดพันธุ์ไม้เด่นที่ทำการศึกษา ในอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประเทศไทย สัญลักษณ์วงกลมสีดำแสดงถึงข้อมูลของทุกชนิดพันธุ์ และวงกลมสีขาวแสดงเฉพาะชนิดพันธุ์ ยางเสียน (*D. gracilis*) เท่านั้น ผลการวิเคราะห์ได้สรุปไว้ดังตารางที่ 4.2

สำหรับชนิดพันธุ์ ยางเสียน (*D. gracilis*) นี้พบได้เฉพาะในพื้นที่ป่ามอสสิงโต ซึ่งเป็นป่าที่มีความชื้นสูง สอดคล้องกับการศึกษาของ Appanah and Turnbull (1998) พบว่ากลุ่มไม้สกุล *Dipterocapus spp.* มีการเจริญอยู่ในพื้นที่สูงเจริญเฉพาะในป่าดิบชื้นที่มีความสูงเฉลี่ย 0 – 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล และมีค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1000 – 2000 มิลลิเมตร รวมถึงพื้นที่ต้องมีช่วงฤดูแล้งที่ยาวนานไม่เกิน 6 เดือน และพบอีกว่าในพื้นที่ป่าฝน ประเทศมาเลเซีย ชนิดพันธุ์ ยางเสียน (*D. gracilis*) ในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ตั้งแต่ร้อยละ 1 เซนติเมตร จนถึงขนาดที่มากกว่า 100 เซนติเมตร ซึ่งพบต้นที่สูงโดยมีความสูงถึง 60 เมตร โดยพบการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกเป็นอย่างมาก (Göltenboth, Langenberger, and Widmann, 2006) สอดคล้องกับการศึกษาครั้งนี้ โดยในพื้นที่การศึกษาพบว่าการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมาก ส่งผลให้การศึกษาในชนิดพันธุ์นี้มีการกระจายของช่วงตัวอย่าง 10 ช่วง ซึ่งถือว่าเป็นชนิดพันธุ์ที่มีการกระจายของช่วงตัวอย่างมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกมากที่สุดคือ 127 เซนติเมตร และเป็นต้นไม้ที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากนี้ต้นไม้ชนิดพันธุ์นี้เป็นไม้เนื้อแข็งที่มีความสูงของเรือนยอดมากในพื้นที่ศึกษา และมีการค้นพบของ Soerianegara and Lemmens (1993) พบว่าความหนาแน่นของเนื้อไม้ ชนิดนี้มีค่าอยู่ที่ 580 – 1000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยจัดเป็นไม้เนื้อแข็งปานกลางที่มีความทนทานตามธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Martawijaya et al. (1989) พบว่าชนิดพันธุ์นี้จะสูงขึ้น 160 เซนติเมตรต่อปี จึงอาจส่งผลให้ลำต้นของยางเสียน (*D. gracilis*) มีการสร้างแก่นไม้มากกว่าเพื่อรองรับน้ำหนักลำต้นและเรือนยอด เนื่องจากแก่นไม้มีความคงทนตามธรรมชาติ โดยมีการศึกษาในชนิดพันธุ์ที่ใกล้เคียงกับ ยางเสียน (*D. gracilis*) ในพื้นที่ป่าดิบชื้น ของประเทศฝรั่งเศส คือ *Dicorynia guianensis* Amsl. โดยชนิดนี้จะมี ความสูงประมาณ 50 เมตร และมีการสร้างแก่นไม้เพิ่มขึ้นเมื่อต้นไม้มีขนาดเพิ่มขึ้นควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตของเรือนยอด และแก่นไม้จะเป็นหนึ่งในโครงสร้างที่สำคัญในการทำหน้าที่รับน้ำหนักของ ต้นไม้และเรือนยอด เมื่อต้นไม้มีขนาดและความสูงและมากยิ่งขึ้น (Lehnebach et al., 2017) นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาของ Cordero and Kanninen (2003) ในพื้นที่ป่าดิบชื้น ในประเทศ คอสตาริกา ของชนิดพันธุ์ *Tectona grandis* ซึ่งเป็นไม้เนื้อแข็ง พบว่าพื้นที่แก่นไม้ของชนิดนี้มี สัดส่วนมากถึง 61% ของพื้นที่หน้าตัดลำต้น พร้อมทั้งมีการเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอกและอายุของต้นไม้ นอกจากนี้ปริมาณสัดส่วนของแก่นไม้แล้ว ยังมีการศึกษาการสะสมของ สารประกอบอินทรีย์ใน ยางเสียน (*D. gracilis*) โดยประกอบด้วย เซลลูโลส 51%, ลิกนิน 19%, เพน โทแซน 17 % และสารประกอบอื่นๆ โดยสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้จะถูกสร้างในระหว่างการ เปลี่ยนแปลงจากกระ皮ไม้เป็นแก่นไม้ โดยสัดส่วนของสารประกอบเหล่านี้ พบได้มากในไม้เนื้อแข็ง

(Tarasov, Leitch, and Fatehi, 2018; Martha et al., 2021) ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ลำต้นของชนิดพันธุ์นี้ โดยเฉพาะเซลลูโลส และการสะสมสารเหล่านี้ส่งผลต่อการสร้างแกนไม้ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามอายุของต้นไม้ (Martawijaya et al., 1989) จากการศึกษาพบว่าคุณสมบัติของกระพี้ไม้เฉลี่ยในชนิดพันธุ์นี้ในบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีเพียง 46.7 % ของพื้นที่หน้าตัดลำต้นทั้งหมด โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วงคือ 1. ช่วงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงน้อยกว่า 30 เซนติเมตร มีความหนาของกระพี้เฉลี่ย 96.8% ของพื้นที่หน้าตัดลำต้น และ 2. ช่วงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงมากกว่า 30 เซนติเมตรขึ้นไป มีความหนาของกระพี้ลดลงไปอยู่ที่ 33.8 % ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.3 สอดคล้องกับการศึกษาของ Pruyn, Harmon, and Gartner (2003) ที่ทำการศึกษาในต้นไม้ 4 ชนิด ได้แก่ *Abies amabilis*, *Pinus monticola*, *Pseudotsuga menziesii*. และ *Tsuga heterophylla*. ในพื้นที่ป่าตอนกลาง ของรัฐโอเรกอน สหรัฐอเมริกา พบว่าในชนิดพันธุ์ที่มีอายุน้อยจะมีเฉพาะกระพี้ไม้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของลำต้น โดยต้นไม้ที่มีขนาดน้อยกว่า 30 เซนติเมตร เหล่านี้จะกังวลเฉพาะเรื่องการเจริญเติบโตเท่านั้น เนื่องจากต้องมีการแข่งขันในการค้นหาแหล่งอาหาร และแย่งสารอาหารกันระหว่างต้นไม้รอบๆ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณสารอาหารเพียงพอที่สามารถใช้ในการเจริญเติบโตได้ ต้นไม้เหล่านี้จะค่อยๆ เปลี่ยนจากกระพี้ไม้เป็นแกนไม้เพื่อสร้างความแข็งแรงให้ลำต้น และมีการศึกษาของ Gower et al. (1993) ซึ่งพบว่า ต้นไม้จะสร้างกระพี้เร็วที่สุดในช่วงที่มีขนาดตั้งแต่ 0 -25 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งพบว่า ชนิดพันธุ์ ยางเสียน (*D. gracilis*) ขนาด 10 -30 เซนติเมตรมีสร้างกระพี้ไม้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจะเริ่มสร้างแกนไม้ช้าลงเมื่อมีขนาด 30 เซนติเมตรขึ้นไป

สำหรับชนิดพันธุ์ หัวภูเข่า (*S. nervosum*) ชนิดพันธุ์นี้พบได้ทั่วไปในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ มีความสูงของเรือนยอดประมาณ 10 – 40 เมตร มีการกระจายของช่วงขนาดลำต้นมากสุดในช่วง 1 – 50 เซนติเมตร ในชนิดพันธุ์นี้เจริญอยู่ในพื้นที่ ป่าปฐมภูมิในแปลงวิจัยมอสสิงโต และ พื้นที่ป่าทุติยภูมิในแปลงวิจัยหนองซิง ที่มีความต่างกันของชนิดป่า และ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ อาทิ เช่น ความชื้นในดิน ชนิดพันธุ์ของต้นไม้ที่มีการเจริญเติบโตในพื้นที่ ปริมาณแสง โดยมีการศึกษาพบว่าเหตุผลที่ชนิดพันธุ์นี้สามารถเจริญได้ทั้งในพื้นที่ป่าปฐมภูมิและป่าทุติยภูมิ เนื่องจากเป็นชนิดมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีการปรับตัวเข้ากับสภาวะแวดล้อมได้ดี (Gamage, Ashton, and Singhakumara, 2003; Zauza et al., 2010; Zhu et al., 2015) นอกจากนี้ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมบางประการที่มีความใกล้เคียงกัน อาทิเช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ และ แสงใกล้เคียง อาจส่งผลให้ชนิดพันธุ์นี้มีการเจริญในทั้งสองพื้นที่การศึกษา และ มีการศึกษาของ Li et al. (2017) พบว่า หัวภูเข่า (*S. nervosum*) สามารถเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่ชื้นน้ำ และ มีปริมาณน้ำในปริมาณที่เหมาะสม ใน

ส่วนของสัดส่วนความหนาของกระท่อมที่มีพื้นที่หน้าตัดลำต้นของชนิดนี้มีค่า 73 % ในพื้นที่แปลงวิจัยมอสโต และ 66% ในแปลงวิจัยหนองชิง และมีการเรียงตัวของข้อมูลใกล้เคียงกัน และสามารถวิเคราะห์ข้อมูลรวมกันได้ โดยเหตุผลที่ข้อมูลมีความใกล้เคียงกันในประเด็นนี้ยังไม่มีการศึกษา และข้อมูลที่มารองรับ เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาในชนิดพันธุ์นี้ แต่อาจเกิดจากปัจจัยด้าน สรีรวิทยา และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมบางประการที่ส่งผลให้ค่าความหนาของกระท่อมไม่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาในอนาคตต่อไป

ในกรณีของ ทะโล้ (*S. wallichii*) และ อินทวา (*M. gamblei*) ที่มีพื้นที่สัดส่วนความหนาของกระท่อมที่มีพื้นที่หน้าตัดของลำต้น 52.7 % และ 69.8 % ตามลำดับ โดยในสองชนิดนี้มักมักจะเจริญใกล้กัน หรือ บริเวณพื้นที่เดียวกัน โดยมีการศึกษาใน 2 ชนิดนี้พบว่า ทะโล้ (*S. wallichii*) และ อินทวา (*M. gamblei*) มีการเจริญเติบโตที่ค่อนข้างช้า และ ต้องมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต อาทิเช่น ปริมาณแสง ปริมาณความชื้น เป็นต้น (Boojh and Ramakrishnan, 1983; Z. Yang et al., 2016) ด้วยเหตุนี้เมื่อต้นไม้มีขนาดที่เพิ่มมากขึ้นจะมีอายุมากขึ้นตาม และส่งผลมีการสร้างแก่นไม้ที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของกระท่อมไม้เป็นแก่นไม้เมื่อเวลาผ่านไป

ตารางที่ 4.2 สรุปการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression analysis) โดยมีรูปแบบที่เหมาะสม 2 สมการ ได้แก่ สมการ ยกกำลัง (Power ; $y = ax^b$) และ สมการเส้นตรง (Linear ; $y = b + ax$) โดยค่า x คือเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก และค่า y คือความหนาของกระพี้ไม้ ในหน่วยเซนติเมตร n คือจำนวนของตัวอย่างของชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษา, r^2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ, p คือค่านัยสำคัญทางสถิติและ SEE คือ การประมาณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการถดถอย

พื้นที่	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	n	สมการ	r^2	p	SEE	ภาพที่
PF	ยางเสียน	<i>Dipterocarpus gracilis</i> Blume (DBH < 30 ซม.)	6	$y = 0.45x^{1.02}$	0.99	<0.0001	0.13	1-ก
PF	ยางเสียน	<i>Dipterocarpus gracilis</i> Blume (DBH > 30 ซม.)	24	$y = 1.58x^{0.45}$	0.46	0.04	2.10	1-ก
PF	สีเสียดเทศ	<i>Choerospondias axillaris</i> (Roxb.) Burt & Hill	30	$y = 0.92x^{0.81}$	0.97	<0.0001	1.92	1-ค
PF	หมือดแดง	<i>Symplocos cochinchinensis</i> (Lour.) S. Moore	15	$y = 0.48x^{1.01}$	0.99	<0.0001	0.18	2-ก
PF	สุรามะริด	<i>Cinnamomum subavenium</i> Miq.	15	$y = 0.51x^{0.94}$	0.96	<0.0001	1.25	2-ค
PF	หนอนชื้อควาย	<i>Girardinia nervosa</i> Planch.	15	$y = 0.66x^{0.91}$	0.97	<0.0001	1.08	2-จ
PF	อินทวา	<i>Machilus gamblei</i> King ex Hk. f.	15	$y = 0.34x$	0.78	<0.0001	2.51	3-ก
PF	คันทาก	<i>Mastixia pentandra</i> Bl. ssp. <i>chinensis</i> (Merr.) Matt.	15	$y = 0.48x^{1.04}$	0.99	<0.0001	0.29	3-ค
PF	พะโล้	<i>Schima wallichii</i> (DC.) Korth.	15	$y = 0.43x^{0.85}$	0.92	<0.0001	0.95	3-จ
PF	สะตีด้าน	<i>Stoanea sigun</i> (Blume) K. Schum.	15	$y = 0.54x^{0.95}$	0.95	<0.0001	1.47	4-ก
PF	-	<i>Ilex chevalieri</i> Tard.	12	$y = 0.49x$	0.99	<0.0001	0.38	4-ค
PF/SF	หัวฤๅษะ	<i>Syzygium nervosum</i> A.Cunn. ex DC.	24	$y = 0.44x^{0.94}$	0.86	0.007	1.92	4-จ

พื้นที่	ชื่อสามัญ	ชื่อวิทยาศาสตร์	n	สมการ	r ²	p	SEE	ภาพที่
SF	ดีว	<i>Cratogeomys cochinchinense</i> (Lour.) Blume	9	$y = 0.98x^{0.72}$	0.92	<0.0001	1.06	5-ก
SF	เสม็ดแดง	<i>Syzygium antisepticum</i> (Blume) Merr. & L.M.Perry	9	$y = 0.49x^{0.97}$	0.90	0.0002	1.35	5-ค
SF	พิทูลป่า	<i>Adinandra integerrima</i> T. And. ex Dyer	6	$y = 0.83x^{0.68}$	0.88	0.008	0.76	5-จ
PF/SF	-	ทุกชนิดพันธุ์ยกเว้น <i>D. gracilis</i>	194	$y = 0.57x^{0.91}$	0.86	<0.0001	2.92	6

y = ความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness)

x = เส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at Breast Height ; DBH)

a, b = ค่าคงที่ของสมการ



มหาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
MAHACHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูลของชนิดพันธุ์ ยางเสี้ยน (*Dipterocarpus gracilis*), พร้อมทั้งข้อมูลพื้นฐาน ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก (Diameter at Breast Height ; DBH) ความหนาของกระพี้ (Sapwood thickness ; ST) และสัดส่วนของความหนาของกระพี้ต่อรัศมีต้นไม้ (Ratio of sapwood thickness to stem radius ; SR) โดยแสดงค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ช่วง DBH (ซม.)	DBH (ซม.)	ST (ซม.)	SR (%)
10 - 20	14.46 ± 2.15	6.97 ± 2.15	96.3
20 - 30	21.46 ± 1.81	10.44 ± 0.9	97.3
30 - 40	34 ± 3.47	9.62 ± 3.40	56.5
40 - 50	42.9 ± 3.37	8.5 ± 1.76	39
50 - 60	53.5 ± 2.93	8.14 ± 1.90	30
60 - 70	63.36 ± 1.09	10.44 ± 0.78	32.9
70 - 80	75.66 ± 1.60	9.67 ± 1.33	25.5
80 - 90	81.86 ± 2.20	13.28 ± 0.55	32.4
90 - 100	92 ± 1.80	13.67 ± 0.76	29.7
มากกว่า 100	112 ± 12.87	14.12 ± 1.46	25

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ เราได้สร้างสมการอัลโลเมตริกระหว่างความหนาของกระพี้และเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ของชนิดพันธุ์ไม้เด่น 14 ชนิดในป่าปฐมภูมิและป่าทุติยภูมิในพื้นที่อุทยานแห่งชาติเขาใหญ่ ประเทศไทย ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า สมการยกกำลัง และสมการเส้นตรง มีความเหมาะสม ในการสร้างสมการอัลโลเมตริกอย่างมีนัยสำคัญของชนิดพันธุ์ไม้ที่ทำการศึกษาทุกชนิดพันธุ์ โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (r^2) และแผนภาพเศษเหลือ (Residual analysis) และเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลของทุกชนิดพันธุ์ยกเว้น *Dipterocarpus gracilis* พบว่าสามารถสร้างสมการอัลโลเมตริกเดี่ยวเพื่อใช้กับพันธุ์ไม้ทุกชนิดได้ และได้สมการดังนี้ $y = 0.57x^{0.91}$ โดยสมการอัลโลเมตริกของความหนากระพี้ไม้ที่สร้างขึ้น เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้งานง่าย โดยใช้เพียงข้อมูลเพียงเส้นผ่านศูนย์กลางเพียงอก ใส่ลงในสมการอัลโลเมตริกสำหรับชนิดพันธุ์ที่ทำการศึกษาเพื่อคำนวณความหนาของกระพี้ไม้ นอกจากนี้สมการอัลโลเมตริกของความหนากระพี้ไม้ที่ได้สามารถใช้ประเมินการคายน้ำของป่า ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในวัฏจักรน้ำให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยใช้สมการอัลโลเมตริกของความหนากระพี้ไม้ร่วมกับเทคนิคการวัดการไหลของน้ำ (Sap flow) เพื่อประเมินการคายน้ำในพื้นที่ป่า โดยอาศัยสมการ โดยสรุปแล้วสมการอัลโลเมตริกของความหนากระพี้ไม้ที่ได้เป็นฐานข้อมูลสำคัญ ในการศึกษาการคายน้ำของต้นไม้และของป่า และเป็นต้นแบบในการศึกษาการคายน้ำในพื้นที่ป่าที่มีการประเมินความหนาของกระพี้ในต้นไม้เฉพาะพื้นที่สำหรับป่าไม้แห่งอื่นในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้

บรรณานุกรม

- กรมอุตุนิยมวิทยา. 2561. “ความรู้อุตุนิยมวิทยา.” 2561. <http://www.tmd.go.th/index.php>.
- กิจการ พรหมมา. 2555. อุทกวิทยาธรณีวิทยา (Hydrogeology). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวุฒิ นาคอ่อน. 2546. “เครื่องมือวัดปริมาณน้ำฝนแบบถ้วยกระดก”. มหาวิทยาลัยราชชมงคล.
- นิตยา หวังวงศ์วิโรจน์. 2551. อุทกวิทยา (Hydrology). 1st ed. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- บุศราศิริ ธนะ. 2562. หนังสืออุตุนิยมวิทยา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.
- พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุตินกุล. 2552. “ต้นน้ำป่าเบญจพรรณให้น้ำเท่าไร.” ส่วนวิจัยต้นน้ำสำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- พูนพิภพ เกษมทรัพย์, ดวงรัตน์ ศตคุณ, เจษฎา ภัทรเลอพงศ์ และ เชษฐ สาทกรกิจ. 2559. “การศึกษาสมมูลคาร์บอนและน้ำเพื่อใช้เป็นข้อมูลทำคาร์บอนฟุตพริ้นต์และวอเตอร์ฟุตพริ้นต์ของสวนยางพารา: ระยะที่ 3.”
- ยุวเรศ เวชกามา. 2545. “โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการจัดการข้อมูลฝน”.
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.
- ฤทัย เพลงวัฒนา. 2554. “ประเทศไทย กับ พายุหมุนเขตร้อน”.
- วิชัย บุญลือ. 2552. อุทกวิทยา. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วิชา นิยม. 2535. อุทกวิทยาป่าไม้ (Forest Hydrology). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะวนศาสตร์.
- ศศิธร พ่วงปาน. 2555. “พัฒนาการของวิธีแอลโลเมตรีเพื่อการประมาณมวลชีวภาพของป่าไม้.” วารสารการจัดการป่าไม้ 6 (12): 64–72.
- สมชาย อ่อนอาษา, พจน์ เจริญสุข และ ชลาทร ศรีตุลานนท์. 2555. คู่มือการตรวจวัดน้ำท่าในลำธาร. 1st ed. กรุงเทพฯ: สำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช.
- สมาคมนักอุทกวิทยาไทย. 2563. “วิกิตถ์แล้ง ปี 2563.” วารสารสมาคมนักอุทกวิทยาไทย.
- ส่วนวิจัยต้นน้ำสำนักอนุรักษ์และจัดการต้นน้ำ. 2554. “คู่มือการเก็บวัดข้อมูลน้ำฝน-น้ำท่าบริเวณพื้นที่ต้นน้ำ”.
- สำเภา แก้วสระแสน, จารึก สิ้นธุรัตน์, และ วิชรี กองแก้ว. 2560. คู่มือการติดตั้งถังวัดปริมาณการใช้น้ำ

ของพืชแบบระบายน้ำ (Percolation Type Lysimeter). 1st ed. ส่วนการใช้ น้ำชลประทาน
สำนักบริหารจัดการน้ำและอุทกวิทยากรมชลประทาน กาญจนบุรี.

อังสุมา พิณทอง, ธิติ วิสารรัตน์, ชุตติกานต์ หุตะแสงชัย, พรเทพ เหมือนพงษ์ และ สาทิศ ดิลกสัมพันธ์.
2559. “การประมาณแก่นและการกักเก็บคาร์บอนของไม้พะยูง ณ สถานีวนวัฒนวิจัยหมู่สี่
จังหวัดนครราชสีมา.” วารสารวนศาสตร์.

Aparecido, Luiza Maria Teophilo, Gretchen R Miller, Anthony T Cahill, and Georgianne W
Moore. 2016. “Comparison of Tree Transpiration under Wet and Dry Canopy
Conditions in a Costa Rican Premontane Tropical Forest.” Hydrological
Processes 30 (26): 5000–5011.

Aparecido, Luiza Maria Teophilo, Joaquim Dos Santos, Niro Higuchi, and Norbert Kunert.
2019. “Relevance of Wood Anatomy and Size of Amazonian Trees in the
Determination and Allometry of Sapwood Area.” Acta Amazonica 49 (1): 1–10.
<https://doi.org/10.1590/1809-4392201800961>.

Appanah, Simmathiri, and Jennifer M Turnbull. 1998. “A review of dipterocarps: taxo-
nomy, ecology, and silviculture”.

Batchelor, C, J Hoogeveen, J-M Faurès, and L Peiser. 2016. “Water Accounting and
Auditing. A Sourcebook.” FAO Water Reports (FAO) Eng No. 43.

Benyon, R G, and T M Doody. 2015. “Comparison of Interception, Forest Floor Evapo-
ration and Transpiration in Pinus Radiata and Eucalyptus Globulus Plantations.”
Hydrological Processes 29 (6): 1173–87.

Boojh, Ram, and PS Ramakrishnan. 1983. “The Growth Pattern of Two Species of
Schima.” Biotropica, 142–47.

Bosch, David D., Laura K. Marshall, and Robert Teskey. 2014. “Forest Transpiration from
Sap Flux Density Measurements in a Southeastern Coastal Plain Riparian Buffer
System.” Agricultural and Forest Meteorology 187: 72–82

Brockelman, Warren Y., Anuttara Nathalang, and J F Maxwell. 2017. Mo Singto Forest
Dynamics Plot Flora and Ecology. National Science Technology Development
Agency, Department of National Parks, Wildlife Plant Conservation, Bangkok.

- Brutsaert, Wilfried. 2013. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications. Vol. 1. Springer Science & Business Media.
- Burgess, S, and A Downey. 2014. "SFM1 Sap Flow Meter Manual." ICT International Pty Ltd.: Armidale, NSW, Australia.
- Calder, Ian, Thomas Hofer, Sibylle Vermont, and Patrizio Warren. 2008. "Towards a New Understanding of Forests and Water." UNASYLVA-FAO- 229: 3.
- Carswell, F E, A L Costa, M Palheta, Y Malhi, P Meir, J de Pr Costa, M de L Ruivo, L do Sm Leal, J M N Costa, and R J Clement. 2002. "Seasonality in CO₂ and H₂O Flux at an Eastern Amazonian Rain Forest." Journal of Geophysical Research: Atmospheres 107 (D20): LBA-43.
- Chanthorn, Wirong, Florian Hartig, and Warren Y. Brockelman. 2017. "Structure and Community Composition in a Tropical Forest Suggest a Change of Ecological Processes during Stand Development." Forest Ecology and Management 404 (June): 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.08.001>.
- Chen, Xi, and Qi Hu. 2004. "Groundwater Influences on Soil Moisture and Surface Evaporation." Journal of Hydrology 297 (1–4): 285–300.
- Cordero, L D Pérez, and Markku Kanninen. 2003. "Heartwood, Sapwood and Bark Content, and Wood Dry Density of Young and Mature Teak (*Tectona Grandis*) Trees Grown in Costa Rica." Silva Fennica 37 (1): 45–54.
- Dai, Aiguo, Tianbao Zhao, and Jiao Chen. 2018. "Climate Change and Drought: A Precipitation and Evaporation Perspective." Current Climate Change Reports 4 (3): 301–12. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>.
- Daley, Michael J, Nathan G Phillips, Cory Pettijohn, and Julian L Hadley. 2007. "Water Use by Eastern Hemlock (*Tsuga Canadensis*) and Black Birch (*Betula Lenta*): Implications of Effects of the Hemlock Woolly Adelgid." Canadian Journal of Forest Research 37 (10): 2031–40.
- Ellison, David, Cindy E Morris, Bruno Locatelli, Douglas Sheil, Jane Cohen, Daniel Murdiyarso, Victoria Gutierrez, Meine Van Noordwijk, Irena F Creed, and Jan

- Pokorny. 2017. "Trees, Forests and Water: Cool Insights for a Hot World." Global Environmental Change 43: 51–61.
- Enquist, Brian J. 2002. "Universal Scaling in Tree and Vascular Plant Allometry: Toward a General Quantitative Theory Linking Plant Form and Function from Cells to Ecosystems." Tree Physiology 22 (15–16): 1045–64.
- Evans, T. E. 1996. "The Effects of Changes in the World Hydrological Cycle on Availability of Water Resources." Global Climate Change and Agricultural Production: Direct and Indirect Effects of Changing Hydrological, Pedological and Plant Physiological Processes, 15–48.
- Federer, C A. 1979. "A Soil-plant-atmosphere Model for Transpiration and Availability of Soil Water." Water Resources Research 15 (3): 555–62.
- Forrester, David I., John J. Collopy, and Jim D. Morris. 2010. "Transpiration along an Age Series of Eucalyptus Globulus Plantations in Southeastern Australia." Forest Ecology and Management 259 (9): 1754–60.
- Galván, J. Diego, J. Julio Camarero, Gabriel Sangüesa-Barreda, Arben Q. Alla, and Emilia Gutiérrez. 2012. "Sapwood Area Drives Growth in Mountain Conifer Forests." Journal of Ecology 100 (5): 1233–44.
- Gamage, Harshi K, Mark S Ashton, and BMP Singhakumara. 2003. "Leaf Structure of Syzygium Spp.(Myrtaceae) in Relation to Site Affinity within a Tropical Rain Forest." Botanical Journal of the Linnean Society 141 (3): 365–77.
- Gartner, Barbara L., and Frederick C. Meinzer. 2005. Structure-Function Relationships In Sapwood Water Transport And Storage. Vascular Transport in Plants. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-012088457-5/50017-4>.
- Gilmour, D. 2014. "Forests and Water: A Synthesis of the Contemporary Science and Its Relevance for Community Forestry in the Asia–Pacific Region." RECOFT—The Center for People and Forests: Bangkok, Thailand.
- GISTDA. 2020. "Thailand flood monitoring system". 2020. <http://flood.gistda.or.th/>.
- Göltenboth, Friedhelm, Gerhard Langenberger, and Peter Widmann. 2006. "16 -

- TROPICAL LOWLAND EVERGREEN RAINFOREST”. Edit by Friedhelm Göltenboth, Kris H Timotius, Paciencia Po Milan, and Josef B T - Ecology of Insular Southeast Asia Margraf, 297–383. Amsterdam: Elsevier.
- Gower, Stith T, Brent E Haynes, Karin S Fassnacht, Steve W Running, and E Raymond Hunt Jr. 1993. “Influence of Fertilization on the Allometric Relations for Two Pines in Contrasting Environments.” Canadian Journal of Forest Research 23 (8): 1704–11.
- GRANIER, A. 1985. “Une Nouvelle Méthode Pour La Mesure Du Flux de Sève Brute Dans Le Tronc Des Arbres.” Annales Des Sciences Forestières 42 (2): 193–200. <https://doi.org/10.1051/forest:19850204>.
- Granier, André, Denis Loustau, and Nathalie Bréda. 2000. “A Generic Model of Forest Canopy Conductance Dependent on Climate, Soil Water Availability and Leaf Area Index.” Annals of Forest Science 57 (8): 755–65.
- Hasenmueller, Elizabeth A, and Robert E Criss. 2013. “Water Balance Estimates of Evapotranspiration Rates in Areas with Varying Land Use.” Evapotranspiration - An Overview, 1–22. <https://doi.org/10.5772/52811>.
- He, Annie, Gregory J McDermid, Mir Mustafizur Rahman, Maria Strack, Saraswati Saraswati, and Bin Xu. 2018. “Developing Allometric Equations for Estimating Shrub Biomass in a Boreal Fen.” Forests 9 (9): 569.
- Healy, Richard W, Thomas C Winter, James W LaBaugh, and O Lehn Franke. 2007. Water Budgets: Foundations for Effective Water-Resources and Environmental Management. Vol. 1308. US Geological Survey Reston, Virginia.
- Heineman, K D, S E Russo, I C Baillie, J D Mamit, PP-K Chai, L Chai, E W Hindley, B-T Lau, S Tan, and P S Ashton. 2015. “Evaluation of Stem Rot in 339 Bornean Tree Species: Implications of Size, Taxonomy, and Soil-Related Variation for Above-ground Biomass Estimates.” Biogeosciences 12 (19): 5735–51.
- Hooper, Elaine, Pierre Legendre, and Richard Condit. 2005. “Barriers to Forest Regeneration of Deforested and Abandoned Land in Panama.” Journal of Ap-

- plied Ecology 42 (6): 1165–74.
- Huxman, Travis E, Bradford P Wilcox, David D Breshears, Russell L Scott, Keirith A Snyder, Eric E Small, Kevin Hultine, William T Pockman, and Robert B Jackson. 2005. “Ecohydrological Implications of Woody Plant Encroachment.” Ecology 86 (2): 308–19.
- Jasechko, Scott, Zachary D. Sharp, John J. Gibson, S. Jean Birks, Yi Yi, and Peter J. Fawcett. 2013. “Terrestrial Water Fluxes Dominated by Transpiration.” Nature 496 (7445): 347–50. <https://doi.org/10.1038/nature11983>.
- Jaskierniak, Dominik, Richard Benyon, George Kuczera, and Andrew Robinson. 2015. “A New Method for Measuring Stand Sapwood Area in Forests.” Ecohydrology 8 (3): 504–17.
- Klaassen, Wim, Fred Bosveld, and E De Water. 1998. “Water Storage and Evaporation as Constituents of Rainfall Interception.” Journal of Hydrology 212: 36–50.
- Kutscha, Norman P, and Irving B Sachs. 1962. “Color tests for differentiating heartwood and sapwood in certain softwood tree species”.
- Lehnebach, Romain, H el ene Morel, Julie Bossu, Gilles Le Mogu edec, Nadine Amusant, Jacques Beauch ene, and Eric Nicolini. 2017. “Heartwood/Sapwood Profile and the Tradeoff between Trunk and Crown Increment in a Natural Forest: The Case Study of a Tropical Tree (*Dicorynia Guianensis* Amsh., Fabaceae).” Trees 31 (1): 199–214.
- Li, BiRu, ShuFei Weng, JiaYi Feng, YongXin Ou, and Miao Dong. 2017. “Growth Rhythm of *Cleistocalyx Operculatus* Seedlings.” Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology 37 (1): 41–46.
- Loon, Anne F Van. 2015. “Hydrological Drought Explained.” Wiley Interdisciplinary Reviews: Water 2 (4): 359–92.
- Lu, Ping, Laurent Urban, and Ping Zhao. 2004. “Granier’s Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice.” ACTA BOTANICA SINICA-ENGLISH EDITION- 46 (6): 631–46.

- Lubczynski, Maciek W, Diana C Chavarro-Rincon, and David G Rossiter. 2017. "Conductive Sapwood Area Prediction from Stem and Canopy Areas—Allometric Equations of Kalahari Trees, Botswana." Ecohydrology 10 (6): e1856.
- Martawijaya, Abdurahim, Iding Kartasujana, Kosasi Kadir, and Soewanda Among Prawira. 1989. "Indonesian Wood Atlas, Vol I." Forest Research and Development Agency. Ministry Of Forestry Republik of Indonesia.
- Martha, Resa, Mahdi Mubarak, Wayan Darmawan, Wasrin Syafii, Stéphane Dumarcay, Christine Gérardin Charbonnier, and Philippe Gérardin. 2021. "Biomolecules of Interest Present in the Main Industrial Wood Species Used in Indonesia-A Review." Journal of Renewable Materials 9 (3): 399–449.
- McIntire, Cameron D. 2018. "Impacts and management of foliar pathogens of eastern white pine (*Pinus strobus*) in the northeastern United States".
- Meinzer, Frederick C, Barbara J Bond, Jeffrey M Warren, and David R Woodruff. 2005. "Does Water Transport Scale Universally with Tree Size?" Functional Ecology 19 (4): 558–65.
- Meinzer, Frederick C, Michael J Clearwater, and Guillermo Goldstein. 2001. "Water Transport in Trees: Current Perspectives, New Insights and Some Controversies." Environmental and Experimental Botany 45 (3): 239–62.
- Mitra, Bhaskar, Shirley A. Papuga, M. Ross Alexander, Tyson Lee Swetnam, and Nate Abramson. 2020. "Allometric Relationships between Primary Size Measures and Sapwood Area for Six Common Tree Species in Snow-Dependent Ecosystems in the Southwest United States." Journal of Forestry Research 31 (6): 2171–80. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01048-y>.
- Montagu, K D, K Düttmer, C V M Barton, and A L Cowie. 2005. "Developing General Allometric Relationships for Regional Estimates of Carbon Sequestration—an Example Using *Eucalyptus Pilularis* from Seven Contrasting Sites." Forest Ecology and Management 204 (1): 115–29.
- Nepstad, Daniel C, Ingrid Marisa Tohver, David Ray, Paulo Moutinho, and Georgina

- Cardinot. 2007. "MORTALITY OF LARGE TREES AND LIANAS FOLLOWING EXPERIMENTAL DROUGHT IN AN AMAZON FOREST." Ecology. Vol. 88.
- Oishi, A. Christopher, Ram Oren, and Paul C. Stoy. 2008. "Estimating Components of Forest Evapotranspiration: A Footprint Approach for Scaling Sap Flux Measurements." Agricultural and Forest Meteorology 148 (11): 1719–32. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.06.013>.
- Palmroth, Sari, Gabriel G Katul, Dafeng Hui, Heather R McCarthy, Robert B Jackson, and Ram Oren. 2010. "Estimation of Long-term Basin Scale Evapotranspiration from Streamflow Time Series." Water Resources Research 46 (10).
- Parolin, P, E Müller, and W J Junk. 2008. "Sapwood area in seven common tree species of Central Amazon floodplains". Area Pesquisas Botanica 59: 277–86.
- Paul, Keryn I, Stephen H Roxburgh, Jacqueline R England, Peter Ritson, Trevor Hobbs, Kim Brooksbank, R John Raison, John S Larmour, Simon Murphy, and Jaymie Norris. 2013. "Development and Testing of Allometric Equations for Estimating Above-Ground Biomass of Mixed-Species Environmental Plantings." Forest Ecology and Management 310: 483–94.
- Phillips, Nathan, Barbara J Bond, and Michael G Ryan. 2001. "Gas exchange and hydraulic properties in the crowns of two tree species in a Panamanian moist forest". Trees 15 (2): 123–30.
- Prueger, John H, Jerry L Hatfield, J Kristian Aase, and Joseph L Pikul Jr. 1997. "Bowen-ratio Comparisons with Lysimeter Evapotranspiration." Agronomy Journal 89 (5): 730–36.
- Pruyn, Michele L, Mark E Harmon, and B L Gartner. 2003. "Stem Respiratory Potential in Six Softwood and Four Hardwood Tree Species in the Central Cascades of Oregon." Oecologia 137 (1): 10–21. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1316-2>.
- Quiñonez-Piñón, M Rebeca, and Caterina Valeo. 2017. "Allometry of Sapwood Depth in Five Boreal Trees." Forests 8 (11): 457.
- Quiñonez-Piñón, M Rebeca, and Caterina Valeo. 2018. "Assessing the Translucence and

- Color-Change Methods for Estimating Sapwood Depth in Three Boreal Species.” Forests 9 (11): 686.
- Reyes-García, Casandra, José Luis Andrade, J Luis Simá, Roberth Us-Santamaría, and Paula C Jackson. 2012. “Sapwood to Heartwood Ratio Affects Whole-Tree Water Use in Dry Forest Legume and Non-Legume Trees.” Trees 26 (4): 1317–30.
- Schaap, M G, and W Bouten. 1997. “Forest Floor Evaporation in a Dense Douglas Fir Stand.” Journal of Hydrology 193 (1–4): 97–113.
- Sellin, Arne. 1994. “Sapwood–Heartwood Proportion Related to Tree Diameter, Age, and Growth Rate in *Picea Abies*.” Canadian Journal of Forest Research 24 (5): 1022–28.
- Shelburne, V B, R L Hedden, and R M Allen. 1993. “The Effect of Site, Stand Density, and Sapwood Permeability on the Relationship between Leaf Area and Sapwood Area in Loblolly Pine (*Pinus Taeda L.*)” Forest Ecology and Management 58 (3–4): 193–209.
- Soerianegara, I, and RHMJ Lemmens. 1993. “Plant Resources of Southeast Asia.” No. 5 (1). Timber Trees: Major Commercial Timbers, 384–91.
- Swanson, Robert H. 1994. “Significant Historical Developments in Thermal Methods for Measuring Sap Flow in Trees.” Agricultural and Forest Meteorology 72 (1–2): 113–32.
- Tang, Jianwu, Paul V Bolstad, Brent E Ewers, Ankur R Desai, Kenneth J Davis, and Eileen V Carey. 2006. “Sap Flux–Upscaled Canopy Transpiration, Stomatal Conductance, and Water Use Efficiency in an Old Growth Forest in the Great Lakes Region of the United States.” Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 111 (G2).
- Tangprasertsri, S. 2005. “Secondary Succession of Tropical Seasonal Evergreen Forest: Species Composition and Dispersal at Mo Singto, Khao Yai Nation Park, Thailand”. Mahidol University.
- Tarasov, Dmitry, Mathew Leitch, and Pedram Fatehi. 2018. “Lignin–Carbohydrate

- Complexes: Properties, Applications, Analyses, and Methods of Extraction: A Review.” Biotechnology for Biofuels 11 (1): 1–28.
- Turner, Martin, Christian Beer, Thomas Crowther, Daniel Falster, Stefano Manzoni, Anatoly Prokushkin, and Ernst-Detlef Schulze. 2019. “Sapwood Biomass Carbon in Northern Boreal and Temperate Forests.” Global Ecology and Biogeography 28 (5): 640–60.
- Tor-ngern, Pantana, Ram Oren, Andrew C Oishi, Joshua M Uebelherr, Sari Palmroth, Lasse Tarvainen, Mikael Ottosson-Löfvenius, Sune Linder, Jean-Christophe Domec, and Torgny Näsholm. 2017. “Ecophysiological Variation of Transpiration of Pine Forests: Synthesis of New and Published Results.” Ecological Applications 27 (1): 118–33.
- Vertessy, R A, R G Benyon, S K O Sullivan, and P R Gribben. 1995. “TreePhysiology.”
- Vertessy, R. A., T. J. Hatton, P. Reece, S. K. O’Sullivan, and R. G. Benyon. 1997. “Estimating Stand Water Use of Large Mountain Ash Trees and Validation of the Sap Flow Measurement Technique.” Tree Physiology 17 (12): 747–56. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.12.747>.
- Wang, Hailong, Huade Guan, Adrien Guyot, Craig T Simmons, and David A Lockington. 2016. “Quantifying Sapwood Width for Three Australian Native Species Using Electrical Resistivity Tomography.” Ecohydrology 9 (1): 83–92.
- Wang, Xingchang, Chuankuan Wang, Quanzhi Zhang, Xiankuai Quan, Xingchang Wang, Chuankuan Wang, Quanzhi Zhang, and Xiankuai Quan Heartwood. 2011. “Heartwood and sapwood allometry of seven Chinese temperate tree species
To cite this version : HAL Id : hal-00883583 Original article Heartwood and sapwood allometry of seven Chinese”.
- Wang, Yunni, Gongxiang Cao, Yanhui Wang, Ashley A Webb, Pengtao Yu, and Xiaojiang Wang. 2019. “Response of the Daily Transpiration of a Larch Plantation to Variation in Potential Evaporation, Leaf Area Index and Soil Moisture.” Scientific Reports 9 (1): 1–11.

- Wei, Zhongwang, Kei Yoshimura, Lixin Wang, Diego G Miralles, Scott Jasechko, and Xuhui Lee. 2017. "Revisiting the Contribution of Transpiration to Global Terrestrial Evapotranspiration." Geophysical Research Letters 44 (6): 2792–2801.
- Wiemann, Michael Carl. 2004. Effects of Uneven-Aged and Diameter-Limit Management on West Virginia Tree and Wood Quality. Vol. 621. US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Wolock, David M, and Gregory J McCabe. 1999. "ESTIMATES OF RUNOFF USING WATER-BALANCE AND ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODELS 1." JAWRA Journal of the American Water Resources Association 35 (6): 1341–50.
- Xu, C, J Zeng, T Cui, Q Chen, and Y Ma. 2016. "Introduction, Growth Performance and Ecological Adaptability of Hongmu Tree Species (*Pterocarpus* Spp.) in China." Journal of Tropical Forest Science, 260–67.
- Yang, Guang, Kunnan Liang, Zaizhi Zhou, Xiyang Wang, and Guihua Huang. 2020. "UPLC-ESI-MS/MS-Based Widely Targeted Metabolomics Analysis of Wood Metabolites in Teak (*Tectona Grandis*)." Molecules 25 (9): 2189.
- Yang, ZeXiong, Teng Yan, YiHang Peng, and HeDe Gong. 2016. "Seedling Growth of *Machilus Gamblei* in Artificial Controlled Experiment in Ailao Mountain." Journal of West China Forestry Science 45 (1): 88–88.
- Zauza, Edival AV, Acelino C Alfenas, Ken Old, Michelle MF Couto, Rodrigo N Graça, and Luiz Antônio Maffia. 2010. "Myrtaceae Species Resistance to Rust Caused by *Puccinia Psidii*." Australasian Plant Pathology 39 (5): 406–11.
- Zhu, Shi-Dan, Ya-Jun Chen, Kun-Fang Cao, and Qing Ye. 2015. "Interspecific Variation in Branch and Leaf Traits among Three *Syzygium* Tree Species from Different Successional Tropical Forests." Functional Plant Biology 42 (4): 423–32.

Sapwood area ~ DBH allometries for 14 common tree species in a successional tropical forest in Thailand

Siriphong Yaemphum¹, Weerapong Unawong², Pantana Tor-ngern^{3,4*}

¹Graduate School, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

²Center of Excellence on Hazardous Substance Management,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

³Department of Environmental Science, Faculty of Science,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

⁴Water Science and Technology for Sustainable Environment Research Group,
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand

*Corresponding author: Email: Pantana.t@chula.ac.th

Sapwood area is an important parameter for estimating canopy transpiration in the forest water cycle. However, sapwood area highly varies across species and forest ecosystems, and is difficult to measure directly. Therefore, species- and site-specific allometric equations are needed to estimate sapwood area of all trees in a forest. Here, we conducted a comprehensive campaign to measure sapwood thickness and estimate sapwood area of 14 common tree species in a successional forest in Thailand. These data represent the first comprehensive measurements of sapwood area in Southeast Asian successional forests growing under diverse environmental conditions in terms of soil moisture and canopy density. The results show that a power function can significantly explain the relationship between sapwood area and stem size, represented by diameter at breast height (DBH), in all species in both primary and secondary forests. Interestingly, a single equation could describe the sapwood area ~ DBH relationship in all species and forest stages, except for *Dipterocarpus*

gracilis, an emergent, dominant species in the primary forest. The latter showed slower growth in sapwood area once the trees reached a DBH of approximately 30 cm. Overall, our results can benefit future studies that estimate canopy transpiration of tropical forests with similar conditions as in our study sites.

Introduction

Forests are an important part of the global water cycle. Specifically, transpiration from forests represents approximately 40-90% of the total amount of water emitted to the atmosphere (Miralles et al., 2011; Jasechko et al., 2013; Wang-Erlandsson et al., 2014; Good et al., 2015), thus significantly affecting hydrological and energy partitioning processes in terrestrial ecosystems (Bonan, 2008). Among the global forests, tropical forests play an important role in mitigating rising atmospheric carbon (C) dioxide contents and thus related climate change impacts, by sequestering ca. 0.28-1.26 Pg C annually (Hubau et al., 2020). However, widespread deforestation and land use change in the tropics are rapidly transforming these ecosystems, with over 80 million hectares of natural, old-growth tropical forests being lost since 1990 (FAO and UNEP, 2020). In Southeast Asia, transformation of forests to large-scale agricultural production and commercial tree plantations have been identified as the main drivers of forest loss (Curtis et al., 2018). In some areas, the abandonment of such large-scale agricultural operations due to unsustainable practices led to the regeneration of secondary forests through natural or artificial processes. As a result, forests in Southeast Asia typically comprise a mosaic of primary, old-growth forests and forests at different stages of secondary succession.

Because tropical forests commonly contain various successional stages, it is challenging to estimate canopy transpiration, which is influenced by many factors, including canopy structure, microclimatic and soil conditions, and species composition. Many studies have demonstrated that sap flow measurements are an effective but time-consuming and hence costly method to estimate tree water use and thus canopy transpiration. Most sap flow measurement methods rely on point measurements of sap flux density across the conductive sapwood (xylem) area. The whole tree water use is generally defined as the product of sap flux density and sapwood area. Previous studies showed that the variability of sap flux density among trees of different age and size is relatively low (e.g. Kumagai et al., 2007; Reyes-Acosta and Lubczynski, 2013, 2014; Jaskierniak et al., 2016; Tor-Ngern et al., 2017); therefore, the whole tree water use within a given forest should mostly depend on the sapwood area of the trees in the area.

Despite the importance of quantifying sapwood areas of trees, there is inadequate research on this topic. One of the major constraints in using sapwood area for estimating canopy transpiration is the potentially high variability of sapwood patterns among species, especially in tropical trees (Parolin et al., 2008; Horna et al., 2011). Another limitation is that cutting down trees for measuring sapwood area is often prohibited and it is hence

challenging to collect corresponding data. An alternative approach is the extraction of wood cores using an increment borer to measure sapwood depth and then estimate sapwood area. After being collected from trees, the increment cores are stained with a chemical solution to reveal the difference in chemical composition between the hydro-conductive sapwood and the non-conductive heartwood areas. Some examples of chemical solutions for staining wood cores include methyl orange, benzidine, sodium nitrite, safranin, astra and Eosin-B (Lubczynski *et al.*, 2017). The latter were proven to be successful in estimating sapwood areas in many studies (Pfausch *et al.*, 2012). Once sapwood area is determined, the whole tree water use can be estimated in combination with measured sap flux density (e.g. Granier *et al.*, 1996; Wullschleger *et al.*, 1998; Tor-Ngern *et al.*, 2017). At the forest scale, the canopy transpiration is calculated using the total sapwood area of all trees within the stand and the weighted average sap flux density data from sampled trees, depending on the site-specific scaling approach. Because it is difficult to determine sapwood area of all trees in the forest stand, species-specific allometric equations for estimating sapwood area from biometric parameters, such as diameter at breast height, basal area or crown area, are often used to obtain the total sapwood areas within a stand (Lubczynski *et al.*, 2017; Güney, 2018; Aparecido *et al.*, 2019).

Allometric equations for estimating sapwood area using biometric parameters of trees have been developed for various tree species and forest ecosystems (e.g. Cienciala *et al.*, 2000; Wullschleger *et al.*, 2002; Kumagai *et al.*, 2005; Parolin *et al.*, 2008; Lubczynski *et al.*, 2017; Güney, 2018; Aparecido *et al.*, 2019), but only a few of them exist in tropical regions, and studies for successional forests in Southeast Asia are particularly rare. This study aims to develop species-specific allometric equations relating sapwood area with tree size, represented by diameter at breast height, for 14 common species in a Southeast Asian forest harboring two successional stages. Additionally, one of the examined species existed in both primary and secondary successional stages with different canopy height and soil moisture conditions. Because allometric relationships between sapwood area and tree size of the same species can vary across site conditions, such as elevation (Mitra *et al.*, 2019), we hence used the data of this species to explore whether different forest stages, with corresponding site conditions, affected the relationship between sapwood area and tree size. In this study, we did not intend to perform deep investigation on the physiological mechanism of sapwood growth. However, we aimed to develop allometric equations for estimating sapwood area of common species in successional forests which will be used in combination with the on-going monitored sap flux measurement in the forests to estimate canopy transpiration. The derived equations may be used for estimating tree and canopy transpiration in other successional forests of this region and may also facilitate the calculation of sapwood areas of trees in other tropical forests growing under similar environmental conditions.

Methods

Study site

The measurements were conducted in a seasonal evergreen forest in Khao Yai National Park (KYNP), Nakhon Ratchasima Province, Thailand (14°26'31" N, 101°22'55" E, 700-800 m asl). Mean annual temperature and rainfall at the site are 22.4 °C and 2,100 mm, respectively, based on 1994-2018 data (Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation; 25-year means). The wet season is usually from May to October while the dry season lasts from late October to April, when total monthly rainfall is less than 100 mm (Brockelman *et al.*, 2017). KYNP consists of old-growth (primary) forest with scattered regions of secondary forests at multiple successional stages that have regenerated from old fields within the past 50 years (Jha *et al.*, 2020). In this study, we selected common tree species occurring in two permanent plots, one located in a primary and the other in a secondary forest. The first plot was a 30-ha Mo Singto forest dynamic plot (Brockelman *et al.*, 2017), which is a ForestGEO plot in the global network of the Center for Tropical Forest Science (CTFS), Smithsonian Tropical Research Institute (Davies *et al.*, 2021). This plot represents an old-growth, primary stage (hereafter PF), with an age of at least 200 years. The PF's mean canopy height was 30 m, with a leaf area index (LAI) of 5 and a stem density of 1,112 trees ha⁻¹ (Chanthorn *et al.*, 2016; Brockelman *et al.*, 2017). Approximately 3 km away from the PF plot, a 2-ha plot in a 4-year-old, initial-stage secondary forest (hereafter SF) was established. Its mean canopy height was 15 m and stem density was 1,226 trees ha⁻¹. For this plots no LAI data was available but the SF canopy visually appeared distinctly sparse compared to the canopy of PF. The soil type of both forests was gray, brown ultisol (Brockelman *et al.*, 2017) with soil bulk densities of 1.26 and 1.24 g cm⁻³ in PF and SF, respectively. In a separate campaign for another study, soil moisture was measured at 25 locations in each plot during the onset of the dry season (February 2020). The measurements showed that soil moisture was significantly higher in PF (45.4 ± 8.72%) than in SF (23.9 ± 5.34%).

Tree sampling and measurements

We used information on occurring tree species and their size distribution which were collected in the most recent census, during which all trees with DBH > 1 cm were surveyed and measured for DBH. The corresponding measurements were conducted in 2016 for PF (Brockelman *et al.*, 2017) and in 2017 for SF (Chanthorn *et al.*, 2017). For each forest stage, we selected common species based on the ranking of relative basal area and by ensuring a sufficiently high number of trees that we could sample from around the permanent study plots. According to the ranking in PF, we selected species with relative basal area ranging from 3% to 11% whereas it was 12-31% in SF. The seemingly low species-specific relative basal area values in PF were due to the high diversity in this site. The species with the highest measured relative basal area was *Dipterocarpus gracilis* with 11%. After using the plot data to identify representative species, we sampled trees outside the permanent plots to collect tree cores to avoid disturbance of trees in the plots that are subject to on-going studies. In total, we sampled 14 common species: 11 species were from PF (*Dipterocarpus*

gracilis, *Choerospondias axillaris*, *Ilex chevalieri*, *Symplocos cochinchinensis*, *Gironniera nervosa*, *Sloanea sigun*, *Cinnamomum subavenium*, *Machilus gamblei*, *Schima wallichii*, *Mastixia pentandra*, *Syzygium nervosum*) and 3 species were from SF (*Adinandra integerrima*, *Syzygium antisepticum*, *Cratoxylum cochinchinensis*). Among the chosen species, only one of them, *S. nervosum*, existed in both successional stages and was used to explore if the allometric equation differed between the two forest stages. For the tree sampling, we additionally considered the DBH distribution of each species based on the 2016 (PF) and 2017 (SF) measurement campaigns. We realized that the information of tree size that was used to determine sampling intervals did not match the ages of trees during our measurement campaign which should be older. However, such mismatch should not affect our main objective for developing the allometric equations. Furthermore, data from the 2016-2017 census were the only available information we had to determine the size distribution of trees. To ensure that our dataset for developing the allometries contained samples from the complete spectrum of DBH values occurring on the sites, we partitioned the range of the DBH data into intervals of 10 cm and sampled 3 trees from each interval for measurements. Only healthy trees with no apparent diseases, broken tops or hollowed stem were chosen.

The sample collection was done in July-September 2020 and June 2021 which corresponded to the wet season. After measuring the DBH of each study tree, we debarked a small area on the tree and took a wood core sample from 3 equally spaced position along the azimuthal direction around the stem. We used an increment borer of 5.15 mm diameter (Hagl f, Sweden) to collect a wood core sample of at least half the DBH of each tree. The sample collection was done during 10:00-15:00 when transpiration was high (Tor-ngern *et al.*, 2021). Then, we immediately stained each core sample with 0.1% methyl orange which, after 15 minutes, distinguished regions of sapwood with light color compared to the dark region of heartwood (Forrester *et al.*, 2010; Burgess and Downey, 2014; Molina *et al.*, 2016; Macfarlane *et al.*, 2018). The sapwood thickness was then measured using a ruler. To avoid further damage to the sample trees, we randomly chose a tree from the sampled ones within each class size for measuring bark thickness. For each selected tree, we took three wood core samples of up to 5 cm depth from the outside bark and measured bark thickness using a vernier caliper. Then, we took the average of measured bark thickness values from the three samples and used it in our calculation. Next, we calculated sapwood area (A_s) of the trees using the following equation.

$$A_s = \pi \left((R - \bar{D}_{bark})^2 - (R - \bar{D}_{bark} - \bar{D}_{sapwood})^2 \right) \quad (1)$$

where R is stem radius, and \bar{D}_{bark} and $\bar{D}_{sapwood}$ represent averaged bark thickness and sapwood thickness, respectively. All units are in cm. Because our data showed small azimuthal variation in sapwood thickness for each tree ($CV \leq 7\%$), our assumption of circular shape for calculating the sapwood area was confirmed.

Data analysis

We performed an exploratory data analysis and implemented regression analyses to derive allometric equations between A_s and DBH in Sigmaplot 12.0 (Systat Software, Inc. San Jose, CA, USA). Although some previous studies also explored bark thickness and sapwood thickness as predictors (Güney, 2018), we did not use it in our analysis after finding no significant relationship in the former (Figure S1, Supplementary materials). In contrast, the relationship between sapwood area and sapwood thickness was significant (Figure S2). However, we chose DBH as the main predictor to make our allometries universally applicable for future analysis such as estimating sapwood area of all trees in the forests for calculating canopy transpiration. In addition, using DBH is more suitable because it is a commonly measured metric and causes no damage to the trees. We first performed the analyses by species, then with pooled data for each study site and finally from all sites if no significant difference was found, using an F-test to analyze the difference between regression lines. We also compared the allometric equation of the only species growing in both sites (i.e., *S. nervosum*). Based on the exploratory data analysis, two types of equations were tested: an exponential growth function ($y = ae^{bx}$) and a power function ($y = ax^b$). Both equation forms had to go through the origin under the assumption that no sapwood area would be observed with zero DBH. The power function yielded lower standard error of the regression than the exponential growth form (Table S1); thus, we employed the power function in our analysis. To validate the performance of the selected regression lines, we further assessed whether residuals of the regression varied with DBH. All statistical tests were based on the significance level of 5%.

Finally, we considered different physiological characteristics, including wood type (i.e., hardwood *versus* softwood) and leaf habit (deciduous *versus* evergreen), in the studied species as shown in Table 1. Hardwood species are often associated with slow growth and they tend to build more heartwood than sapwood whereas the opposite is observed in softwood species (Gartner and Meinzer, 2005; Lachenbruch *et al.*, 2011). For leaf habit, deciduous species generally grow fast in the active season, resulting in larger variation in sapwood growth in the species compared to evergreen species (Givnish, 2002). We therefore tested whether the allometric relationships for the group of these physiological traits differed.

Results

Table 1 summarizes the average values and range of bark and sapwood thickness, and corresponding estimates of sapwood area of the selected species. Mean sapwood thickness of the species ranged between 7.6 and 24.8 cm, accounting for 35%-99% of the stem radius. *D. gracilis* showed distinctively low fraction of sapwood thickness, and therefore a large heartwood region, compared to the other species. Average sapwood area of each studied species ranged from 230 to 3258 cm², comprising 63%-99% of the tree basal area. Among the studied species, almost no heartwood was observed in 4 species including *S. cochinchinensis*, *G. nervosa*, *I. chevalieri*, and *M. pentandra*. Despite the relatively high

variation in the averages, the standard deviation of sapwood thickness and area were quite similar among the species.

Regression analysis between sapwood area and DBH showed significant results for all species (Figure 1-3). The residual analyses of the derived models showed no significant trends with changes in DBH in all species (Figure S3-S5) and hence confirmed the validity of the allometries. Overall, the power function explained the relationships between DBH and sapwood area very well with r^2 values ranging from 0.97 to 1.00. Concerning the examined physiological characteristics (hard- versus softwood and deciduous versus evergreen species) our results showed no significant difference among them. For *S. nervosum* which grew in both PF and SF, a single equation could explain the DBH ~ sapwood relationship across both successional stages (Figure 3A). Considering pooled data, a power function significantly described the DBH ~ sapwood relationship for all species, regardless of successional stages, except for *D. gracilis* (Figure 4).

Discussion

Although many techniques are available for determining sapwood area of trees, all of them have their own advantages and disadvantages which make the techniques more or less suitable for different purposes. For example, recent studies recommended using computer tomography for accurate estimation of sapwood, but the technique is expensive and requires extensive data processing (Quinonez-Pinon and Valeo, 2017). The cut-and-dye technique is perhaps the most direct method for measuring sapwood area, but it is highly destructive and hence often infeasible, particularly in protected areas. For this study, we chose the staining method which we applied to three bore-cores extracted from each sampled tree during periods of high transpiration. We believe that our method was suitable given the challenging situation in the field and considering the conservation status of the study area. Nevertheless, future studies using other techniques may be performed to verify our approach in this area. One factor that may affect the measurement of sapwood thickness is the presence of hollow stems, which was found to account for up to 83% of stems' cross sections in other tropical sites (Heineman *et al.*, 2015). However, none of our sample trees was hollow because we carefully selected healthy trees and excluded trees from the selection if we found large cavities in the cores. Furthermore, the relatively small to medium sizes of most sample trees may have contributed to the sparse number of hollow stems during our sampling procedure as hollow stems have been frequently observed in trees of DBH>50 cm in tropical forests (Heineman *et al.*, 2015).

For all species, sapwood thickness did not vary circumferentially, validating the assumption of circular sapwood area. The invariant sapwood thickness around the tree also implied that the trees were not influenced by environmental conditions, such as variations in light exposure and soil moisture around the tree. In some boreal species, sapwood thickness was significantly different between north-facing and south-facing sides of the trees which experienced different solar irradiation (Quinonez-Pinon and Valeo, 2017), resulting in smaller sapwood thickness in the side with longer sunlight exposure - an adaptation of the tree to avoid losing much water. Sapwood areas of the studied species (ranging from 230 to

3258 cm² for DBH ranges of 10.4-127 cm) were within the range of values reported for seven tree species in another tropical forest in Southeast Asia (43-4395 cm² for DBH ranges of 10.4-95 cm, Horna *et al.*, 2011), but somewhat higher than those in other neotropical and montane forests (Granier *et al.*, 1996; Andrade *et al.*, 1998; Goldstein *et al.*, 1998; Anhuf *et al.*, 1999; Meinzer *et al.*, 1999; Motzer *et al.*, 2005; Parolin *et al.*, 2008; Aparecido *et al.*, 2016; Kunert *et al.*, 2017; Moore *et al.*, 2018). According to these studies, sapwood area in tropical tree species considerably varies across species and forest ecosystems. However, our result surprisingly showed that the allometric relationship between sapwood area and tree size was mostly consistent across tree species and the two examined successional stages with partly differing environmental conditions.

At the tree level, several biometric parameters have been explored to predict sapwood area. For example in a montane Mediterranean conifer (Güney, 2018) related sapwood area to DBH, tree basal area, sapwood thickness and stem radius without bark. The study found that stem radius without bark explained most of the variation in data. In our study, we also measured the bark thickness of the sample trees and found a generally small bark thickness (<4% of stem radius) which related less well to sapwood area (Figure S1). Additionally, previous studies often used DBH as the predictor for sapwood area because it is the most common tree metric that is frequently measured in the field. Thus, we here focused on DBH as the main predictor of sapwood area. Tree height and crown area have also been used to predict sapwood area (Lubczynski *et al.*, 2017; Güney, 2018; Aparecido *et al.*, 2019), but it was difficult to perform measurements of both parameters in these forests with our available tools. Nevertheless, a further study including measurements of these parameters would potentially improve the allometric equations to extend their use to cover application with large-scale analysis, such as one involving remote-sensing data. The power function significantly described the relationships between sapwood area and DBH in all species, suggesting that these trees continued to develop sapwood area as they grow. Furthermore, a single equation could explain the DBH ~ sapwood area relationship for *S. nervosum* samples collected in both successional stages. Thus, different environmental conditions in both sites did not influence the relation between sapwood area and tree size in this particular species, supporting its presence in multiple forest stages.

Combining data from all species, a single power function significantly described the relationship between sapwood area and DBH, regardless of forest stages, except for *D. gracilis*. The equation for *D. gracilis* suggested that sapwood area of this species grows fast in small trees (i.e., DBH < 30 cm) but slow in large trees. In fact, sapwood area of *D. gracilis* individuals with DBH < 30 cm on average accounted for approximately 96.8% of the basal area. However, for the larger trees with a DBH greater than or equal to 30 cm, the average proportion of sapwood area to basal area was 33.8%. This indicates that the small trees almost exclusively grow sapwood to rapidly acquire and transport resources to outcompete others; however, when the trees reach a certain size, they invest more in building heartwood for structural support (Gower *et al.*, 1993; Pruyn *et al.*, 2003). A future study investigating whether detailed physiological and functional traits of the species affect the allometric equations between DBH and sapwood is desirable. The two traits examined in our

study (hard- versus softwood and deciduous versus evergreen species) did not show any effect on the DBH + sapwood relationship. The developed allometric equations for the pooled dataset can hence be used for calculating the sapwood area of most trees in these forests if their DBH is known. The resulting sapwood area estimates can be used for estimating canopy transpiration, which is a significant component of water cycles in forests (e.g. Tor-ngern *et al.*, 2017).

Conclusions

In this study, we performed measurements of sapwood thickness and estimated sapwood area of 14 common tree species in a successional forest in Thailand. These data represent the first comprehensive measurements of these parameters in tropical forests in Southeast Asia growing in forests of two successional stages. The results show that a power function significantly explains the relationship between sapwood area and stem size, represented by diameter at breast height, in all species in both primary and secondary forests. Interestingly, a single equation could describe the relationship in all species and sites, except for *D. gracilis*, an emergent, dominant species in the primary forest. The allometric equation for *D. gracilis* indicated that the sapwood area of this species grows slower than in other species in this forest once tree individuals have reached a DBH of approximately 30 cm. Our results will greatly benefit studies that aim to estimate canopy transpiration of tropical forests growing under similar conditions as the forests in our study sites.

Funding

This research was financially supported by the National Science and Technology Development Agency (NSTDA, P-18-51395); and the Thailand Science Research and Innovation (TSRI, RDG6230006).

Acknowledgements

We would like to thank Dr. Warren Brockelman, Dr. Wirong Chanthorn, and Ms. Anuttara Nathalang for information about tree species and size distribution of trees in permanent plots in the primary and secondary forests. We appreciate comments and suggestions for improving the theoretical writing of the manuscript from the Editors, the reviewers and Dr. Nisa Leksungnoen. We are grateful for field assistance from Rathasart Somnuk, Ratchanon Ampornpitak, and Prangwilai Khobpee.

Conflict of interest statement

None declared.

Data availability statement

The raw data used in this study are publicly available in the Dryad repository at doi:10.5061/dryad.qz612jmgh

Supplementary materials

The following supplementary materials are available at *Forestry* online.

Figure S1: Relationship between sapwood area *versus* bark thickness for all species.

Figure S2: Relationship between sapwood area *versus* sapwood thickness for all species.

Figure S3-S5: Results of residual analysis for the regression models of sapwood area *versus* DBH

by species.

Table S1: Comparison of standard error of the estimates (SEE) from the regression analyses using the exponential growth function and the power function to analyze the relationship between sapwood area and DBH.

References

Andrade, J.L., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Holbrook, N.M., Cavelier, J., Jackson, P. *et al.* 1998 Regulation of water flux through trunks, branches, and leaves in trees of a lowland tropical forest. *Oecologia* **115** (4), 463-471.

Anhuf, D., Motzer, T., Rollenbeck, R., xfc, tger, Schr *et al.* 1999 Water Budget of the Surumoni Crane Site (Venezuela). *Selbyana* **20** (1), 179-185.

Aparecido, L.M.T., Miller, G.R., Cahill, A.T. and Moore, G.W. 2016 Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest. *Hydrol. Process.* **30** (26), 5000-5011.

Aparecido, L.M.T., dos Santos, J., Higuchi, N. and Kunert, N. 2019 Relevance of wood anatomy and size of Amazonian trees in the determination and allometry of sapwood area. *Acta. Amazon.* **49** (1), 1-10.

Bonan, G.B. 2008 Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* **320** (5882), 1444-1449.

Brockelman, W.Y., Nathalang, A. and Maxwell, J.F. 2017 *Mo Singto Forest Dynamics Plot: Flora and Ecology*. National Science and Technology Development Agency: Bangkok.

Burgess, S. and Downey, A. 2014 *SFM1 sap flow meter manual*. ICT International Pty. Ltd.: Armidale, NSW, Australia.

Chanthorn, W., Hartig, F. and Brockelman, W.Y. 2017 Structure and community composition in a tropical forest suggest a change of ecological processes during stand development. *For. Ecol. Manag.* **404**, 100-107.

Chanthorn, W., Ratanapongsai, Y., Brockelman, W., Allen, M., Favier, C. and Dubois, M.-A. 2016 Viewing tropical forest succession as a three-dimensional dynamical system. *Theor. Ecol.* **9**, 163-172.

Cienciala, E., Kucera, J. and Malmer, A. 2000 Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *J. Hydrol.* **236** (1-2), 109-120.

Curtis, P.G., Slay, C.M., Harris, N.L., Tyukavina, A. and Hansen, M.C. 2018 Classifying drivers of global forest loss. *Science* **361** (6407), 1108-1111.

Davies, S.J., Abiem, I., Abu Salim, K., Aguilar, S., Allen, D., Alonso, A. *et al.* 2021 ForestGEO: Understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network. *Biol. Conserv.* **253**, 108907.

De Guzman, C.C. and Siemonsma, J.S. 1999 *Plant resources of South-East Asia no 13: spices*. Backhuys Publishers: Leiden, The Netherlands, 400 p.

FAO and UNEP. 2020 The State of the World's Forests 2020. Forests, biodiversity and people.

Forrester, D.I., Collopy, J.J. and Morris, J.D. 2010 Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. *For. Ecol. Manag.* **259** (9), 1754-1760.

Gamal, H.M.S. 2014 *Investigation of selected wood properties and the suitability for industrial utilization of *Acacia seyal* var. *seyal* Del and *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile grown in different climatic zones of Sudan*. PhD, Technische Universität Dresden.

Gartner, B.L., Meinzer, F.C. 2005 Structure-function relationships in sapwood water transport and storage. In: Holbrook, N.M. and Zwieniecki, M. (Eds) *Vascular Transport in Plants*, Elsevier/Academic Press, Oxford, p. 307-331.

Givnish, T.J. 2002 Adaptive significance of evergreen vs. deciduous leaves: solving the triple paradox. *Silva Fennica* **36**, 1322-1343.

Goldstein, G., Andrade, J.L., Meinzer, F.C., Holbrook, N.M., Cavelier, J., Jackson, P. *et al.* 1998 Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant. Cell. Environ.* **21** (4), 397-406.

Good, S.P., Noone, D. and Bowen, G. 2015 Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science* **349** (6244), 175-177.

- Gower, S.T., Haynes, B.E., Fassnacht, K.S., Running, S.W. and Hunt Jr, E.R. 1993 Influence of fertilization on the allometric relations for two pines in contrasting environments. *Can. J. For. Res.* **23** (8), 1704-1711.
- Granier, A., Huc, R. and Barigah, S.T. 1996 Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. *Agric. For. Meteorol.* **78** (1-2), 19-29.
- Güney, A. 2018 Sapwood Area Related to Tree Size, Tree Age, and Leaf Area Index in *Cedrus libani*. *Bilge. Sci.* **2** (1), 83-91.
- Handayani, A. and Hidayati, S. 2020 *Schima wallichii* (DC.) Korth. Theaceae. In *Ethnobotany of the Mountain Regions of Southeast Asia*. F.M. Franco (ed.), Springer International Publishing, Cham, pp. 1-8.
- Heineman, K.D., Russo, S.E., Baillie, I.C., Mamit, J.D., Chai, P.P.K., Chai, L. *et al.* 2015 Evaluation of stem rot in 339 Bornean tree species: implications of size, taxonomy, and soil-related variation for aboveground biomass estimates. *Biogeosciences* **12** (19), 5735-5751.
- Horna, V., Schuldt, B., Brix, S. and Leuschner, C. 2011 Environment and tree size controlling stem sap flux in a perhumid tropical forest of Central Sulawesi, Indonesia. *Ann. Forest. Sci.* **68** (5), 1027-1038.
- Hubau, W., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Affum-Baffoe, K., Beekman, H., Cuni-Sanchez, A. *et al.* 2020 Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. *Nature* **579** (7797), 80-87.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y. and Fawcett, P.J. 2013 Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* **496** (7445), 347-350.
- Jaskierniak, D., Kuczera, G., Benyon, R.G. and Lucieer, A. 2016 Estimating tree and stand sapwood area in spatially heterogeneous southeastern Australian forests. *J. Plant Ecol.* **9** (3), 272-284.
- Jha, N., Tripathi, N.K., Chanthorn, W., Brockelman, W., Nathalang, A., Pelissier, R. *et al.* 2020 Forest aboveground biomass stock and resilience in a tropical landscape of Thailand. *Biogeosciences* **17** (1), 121-134.
- Kritsanachandee, N. and Sookchaloem, D. 2006 Systematic studies of *Cratoxylum Blume* and *Hypericum L.* (Guttiferae) in Thailand. In *Proceedings of 44th Kasetsart University Annual Conference : Engineering, Architecture, Natural Resources and Environmental Management*, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, pp. 602-609.
- Kumagai, T., Aoki, S., Shimizu, T. and Otsuki, K. 2007 Sap flow estimates of stand transpiration at two slope positions in a Japanese cedar forest watershed. *Tree Physiol.* **27** (2), 161-168.

Kumagai, T.o., Nagasawa, H., Mabuchi, T., Ohsaki, S., Kubota, K., Kogi, K. *et al.* 2005 Sources of error in estimating stand transpiration using allometric relationships between stem diameter and sapwood area for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *For. Ecol. Manag.* **206** (1-3), 191-195.

Kunert, N., Aparecido, L.M.T., Wolff, S., Higuchi, N., dos Santos, J., de Araujo, A.C. *et al.* 2017 A revised hydrological model for the Central Amazon: The importance of emergent canopy trees in the forest water budget. *Agric. For. Meteorol.* **239**, 47-57.

Lachenbruch, B., Moore, J.R., Evans, R. 2011 Radial variation in wood structure and function in woody plants, and hypotheses for its occurrence. In: Meinzer, F.C., Lachenbruch, B., and Dawson, T.E. (Eds) Size- and Age-related Changes in Tree Structure and Function. *Tree Physiology*, Springer 4: 121-164.

Lubczynski, M.W., Chavarro-Rincon, D.C. and Rossiter, D.G. 2017 Conductive sapwood area prediction from stem and canopy areas-allometric equations of Kalahari trees, Botswana. *Ecohydrology* **10** (6), e1856.

Macfarlane, C., Grigg, A., McGregor, R., Ogden, G. and Silberstein, R. 2018 Overstorey evapotranspiration in a seasonally dry Mediterranean eucalypt forest: Response to groundwater and mining. *Ecohydrology* **11** (5), e1971.

Matthew, K.M. 1976 A revision of the genus *Mastixia* (Cornaceae). *Blumea - Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants* **23**, 51-93.

Meinzer, F.C., Goldstein, G., Franco, A.C., Bustamante, M., Iglar, E., Jackson, P. *et al.* 1999 Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. *Funct. Ecol.* **13** (2), 273-282.

Miralles, D.G., De Jeu, R.A.M., Gash, J.H., Holmes, T.R.H. and Dolman, A.J. 2011 Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale. *Hydrol. Earth Syst. Sc.* **15** (3), 967-981.

Mitra, B., Papuga, S.A., Alexander, M.R., Swetnam, T.L. and Abramson, N. 2020 Allometric relationships between primary size measures and sapwood area for six common tree species in snow-dependent ecosystems in the Southwest United States. *J. For. Res.* **31** (6), 2171-2180.

Molina, A.J., Aranda, X., Carta, G., Llorens, P., Romero, R., Save, R. *et al.* 2016 Effect of irrigation on sap flux density variability and water use estimate in cherry (*Prunus avium*) for timber production: Azimuthal profile, radial profile and sapwood estimation. *Agr. Water Manage.* **164**, 118-126.

Moore, G.W., Orozco, G., Aparecido, L.M.T. and Miller, G.R. 2018 Upscaling transpiration in diverse forests: Insights from a tropical premontane site. *Ecohydrology* **11** (3), e1920.

- Motzer, T., Munz, N., Koppers, M., Schmitt, D. and Anhuf, D. 2005 Stomatal conductance, transpiration and sap flow of tropical montane rain forest trees in the southern Ecuadorian Andes. *Tree Physiol.* **25** (10), 1283-1293.
- Parolin, P., Müller, E.K.H. and Junk, W.J. Sapwood area in seven common tree species of central amazon floodplains. *Pesqui. Bot.* **59**, 277-286.
- Pfautsch, S., Macfarlane, C., Ebdon, N. and Meder, R. 2012 Assessing sapwood depth and wood properties in Eucalyptus and Corymbia spp. using visual methods and near infrared spectroscopy (NIR). *Trees* **26** (3), 963-974.
- Phongkrathung, R., Vajrodaya, S. and Kermanee, P. 2016 Wood anatomy and properties of three species in the genus Spondias L. (Anacardiaceae) found in Thailand. *Agric. Nat. Resour.* **50**, 14-19.
- Priyadi, H., Takao, G., Rahmawati, I., Supriyanto, B., Ikbal Nursal, W. and Rahman, I. 2010 *Five hundred plant species in Gunung Halimun Salak National Park, West Java: a checklist including Sundanese names, distribution and use*. Center for International Forestry Research (CIFOR): Bogor, Indonesia.
- Pruyn, M.L., Harmon, M.E. and Gartner, B. 2003 Stem respiratory potential in six softwood and four hardwood tree species in the central cascades of Oregon. *Oecologia* **137** (1), 10-21.
- Quinonez-Pinon, M.R. and Valeo, C. 2017 Allometry of Sapwood Depth in Five Boreal Trees. *Forests* **8** (11), 457.
- Reyes-Acosta, J.L. and Lubczynski, M.W. 2013 Mapping dry-season tree transpiration of an oak woodland at the catchment scale, using object-attributes derived from satellite imagery and sap flow measurements. *Agric. For. Meteorol.* **174**, 184-201.
- Reyes-Acosta, J.L. and Lubczynski, M.W. 2014 Optimization of dry-season sap flow measurements in an oak semi-arid open woodland in Spain. *Ecohydrology* **7** (2), 258-277.
- Schultz, J. 2005 *The Ecozones of the World*. 2 edn. Springer: Berlin, Heidelberg, 252 p.
- Tor-Ngern, P., Oren, R., Oishi, A.C., Uebelherr, J.M., Palmroth, S., Tarvainen, L. *et al.* 2017 Ecophysiological variation of transpiration of pine forests: synthesis of new and published results. *Ecol. Appl.* **27** (1), 118-133.
- Tor-ngern, P., Chart-asa, C., Chanthorn, W., Rodtassana, C., Yampum, S., Unawong, W. *et al.* 2021 Variation of leaf-level gas exchange rates and leaf functional traits of dominant trees across three successional stages in a Southeast Asian tropical forest. *For. Ecol. Manag.* **489**, 119101.

Uphof, J.C.T. 1959 *Dictionary of economic plants*. (Bergstrasse) H. R. Engelmann; Hafner: Weinheim, New York, 400 p.

Wang-Erlandsson, L., van der Ent, R.J., Gordon, L.J. and Savenije, H.H.G. 2014 Contrasting roles of interception and transpiration in the hydrological cycle - Part 1: Temporal characteristics over land. *Earth Syst. Dynam.* **5** (2), 441-469.

Weerakoon, W.M.A.I., Damunupola, J.W. and Gunaratne, A.M.T.A. Vegetative propagation of two native tree species for the restoration of degraded grasslands in knuckles forest reserve. University of Peradeniya, Sri Lanka, p. 592.

Wong, K.M. 1995 Hypericaceae. In *Tree Flora of Sabah and Sarawak*. E. Soepadmo and K.M. Wong (eds.), Sabah Forestry Department, Forest Research Institute Malaysia, Sarawak Forestry Department, Malaysia.

Wullschleger, S.D., Meinzer, F.C. and Vertessy, R.A. 1998 A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiol.* **18** (8-9), 499-512.

Wullschleger, S.D., Gunderson, C.A., Hanson, P.J., Wilson, K.B. and Norby, R.J. 2002 Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO₂ concentration - interacting variables and perspectives of scale. *New. Phytol.* **153** (3), 485-496.

Wuu-Kuang, S. 2011 Taxonomic revision of *Cinnamomum* (Lauraceae) in Borneo. *Blumea - Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants* **56** (3), 241-264.

Table and Figure captions

Figure 1 Regression results for the relationship between sapwood area (cm²) and DBH (cm) of the species in primary forest in Khao Yai National Park, Thailand. Note that the scales are different.

Figure 2 Regression results for the relationship between sapwood area (cm²) and DBH (cm) of the species in primary forest in Khao Yai National Park, Thailand. Note that the scales are different.

Figure 3 Regression results for the relationship between sapwood area (cm²) and DBH (cm) of the species in secondary forest in Khao Yai National Park, Thailand. Note that the result for *S. nervosum* (A) included data from both primary (closed circles) and secondary (open circles) forests and that the scales are different.

Figure 4 Regression results for the relationship between sapwood area (cm²) and DBH (cm) of all study species in Khao Yai National Park, Thailand. Circles represent data from all species except *D. gracilis* which is shown in diamonds. Closed (open) circles represent data from all species except *D. gracilis* in the primary (secondary) forest.

Table 1. Information of the selected tree species for developing allometric equations in the primary forest and secondary forest, along with mean \pm one standard deviation and the range of diameter at breast height (DBH; cm), bark and sapwood thickness (cm) and sapwood area (m²) for each species. The sample size (n) is the number of trees used in the analysis. Leaf habit was identified as deciduous (D) or evergreen (E) according to Brockelman *et al.* (2017). The species were categorized into two wood type: moderately hard to hardwood (H) and softwood (S) according to the noted references.

Table 1.

Species	Leaf habit	Wood type	n	DBH (cm)	Bark thickness (cm)	Sapwood thickness (cm)	Sapwood area (m ²)
Primary forest							
<i>Dipeterocarpus gracilis</i>	D	H ^{1,2}	30	59.19\pm30.93 (10.4-127.0)	0.41\pm0.12 (0.27-0.62)	10.48\pm2.76 (4.94-15.33)	0.17\pm0.13 (0.01-0.43)
<i>Choerospondias axillaris</i>	D	H ³	30	60.43\pm28.74 (15.4-112.0)	0.47\pm0.05 (0.40-0.55)	24.81\pm10.17 (7.30-41.67)	0.33\pm0.26 (0.02-0.90)
<i>Ilex chevalieri</i>	E	S ⁴	12	25.32\pm11.68 (12.1-42.5)	0.06\pm0.02 (0.03-0.09)	13.78\pm5.32 (6.00-21.16)	0.07\pm0.05 (0.01-0.14)
<i>Symplocos cochinchinensis</i>	E	S ⁵	15	34.97\pm12.55 (16.0-52.3)	0.05\pm0.01 (0.04-0.07)	17.38\pm6.30 (7.96-26.09)	0.11\pm0.07 (0.02-0.21)

<i>Gironniera nervosa</i>	E	H ⁴	15	35.17±13.75 (15.5-57.4)	0.17±0.02 (0.14-0.19)	17.03±6.32 (7.61-26.91)	1.09±0.08 (0.02-0.25)
<i>Sloanea sigun</i>	E	S ⁶	15	33.57±13.99 (10.4-54.1)	0.56±0.14 (0.34-0.73)	15.34±6.34 (4.86-24.42)	0.10±0.07 (0.01-0.21)
<i>Cinnamomum subavenium</i>	E	S ⁷	15	35.4±14.06 (13.2-59.5)	0.10±0.06 (0.04-0.19)	14.63±5.70 (5.63-23.83)	1.08±0.08 (0.01-0.25)
<i>Machilus gamblei</i>	E	S ⁸	15	34.51±14.15 (13.5-58.0)	0.08±0.01 (0.06-0.10)	11.98±5.29 (5.60-23.50)	0.10±0.07 (0.01-0.22)
<i>Schima wallichii</i>	E	H ⁹	15	33.73±14.45 (13.7-55.0)	0.43±0.08 (0.34-0.56)	8.52±3.22 (4.33-14.17)	0.08±0.06 (0.01-0.17)
<i>Mastixia pentandra</i>	E	S ¹⁰	15	34.71±14.45 (13.7-56.3)	0.22±0.2 (0.20-0.26)	17.00±7.11 (6.64-27.93)	1.07±0.08 (0.01-0.25)
<i>Syzygium nervosum</i>	E	H ⁴	15	35.11±14.79 (11.4-59.2)	0.47±0.03 (0.44-0.52)	12.37±4.57 (5.18-19.33)	0.10±0.07 (0.01-0.23)
Secondary forest							
<i>Syzygium nervosum</i>	E	H ⁴	9	25.18±9.79 (11.0-39.5)	0.54±0.06 (0.49-0.61)	8.94±5.38 (3.60-17.00)	0.05±0.04 (0.01-0.11)
<i>Adinandra integerrima</i>	E	S ⁴	6	17.1±5.11 (11.1-30.0)	0.23±0.01 (0.22-0.23)	7.60±1.95 (5.33-10.23)	0.02±0.01 (0.01-0.04)
<i>Syzygium antisepticum</i>	E	H ⁴	9	22.94±8.78 (12.3-33.5)	0.31±0.03 (0.28-0.34)	10.36±4.02 (5.87-16.43)	0.04±0.03 (0.01-0.09)
<i>Cratoxylum cochinchinensis</i>	D	H ^{11,12}	9	24.19±10.94 (10.7-39.6)	0.44±0.14 (0.25-0.56)	9.62±3.46 (5.00-14.80)	0.05±0.04 (0.01-0.11)

¹Uphof (1959), ²Gamal (2014), ³Phongkrathung *et al.* (2016) , ⁴De Guzman and Siemonsma (1999),

⁵Weerakoon *et al.* (2014), ⁶Priyadi *et al.* (2010), ⁷Wuu-Kuang (2011), ⁸Schultz (2005),

⁹Handayani and Hidayati (2020), ¹⁰Matthew (1976), ¹¹Wong (1995), ¹²Kritsanachandee and Sookchaloem (2006).

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศิริพงศ์ แยมพุ่ม
วัน เดือน ปี เกิด	26/10/2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขา ชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ที่อยู่ปัจจุบัน	22/1 ม.1 ต.ข้าวmung อ.สารภี จ.เชียงใหม่ 50140
ผลงานตีพิมพ์	ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้ถูกเผยแพร่ผ่านการนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ งานประชุมวิชาการระดับชาตินนทรีอีสาน ครั้งที่ 9 ออนไลน์ เมื่อวันที่ 27 พฤศจิกายน 2564 จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตเฉลิมพระ เกียรติ จังสกลนคร ผ่านช่องทาง Zoom นอกจากนี้ ผู้เขียนได้ใช้ผลการศึกษางานวิจัยนี้ในการวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อสร้างสมการอัลโลเมตริกสำหรับประเมินพื้นที่ต่อลำเลียงน้ำในต้นไม้ เขียนบทความวิจัยและได้รับการตอบรับเพื่อตีพิมพ์ในวารสาร Forestry: An International Journal of Forest Research ดังรายละเอียดของร่าง บทความวิจัยในข้างต้น ขณะนี้กำลังอยู่ระหว่างการเตรียมตีพิมพ์โดยวารสาร (ข้อมูล ณ วันที่ 16 ธันวาคม 2564)