

เปรียบเทียบเทคนิคการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบในสวนป่าดินเปิด

COMPARISON OF TECHNIQUES FOR LEAF AREA INDEX
ESTIMATION IN *ALSTONIA SCHOLARIS* R.BR. PLANTATIONลดาววัลย์ พวงจิตร์¹Ladawan Puangchit¹อรุณี ภูสุตแสง²Arune Pusudsavang²มณฑล จำเริญพฤษฯ¹Monton Jamroenprucksas¹

ABSTRACT

There are several techniques in measuring leaf area index of stand. The objective of the present study was to compare different techniques in estimating leaf area index including, clip method, hemispherical photography and plant canopy analyzer (LAI 2000). The study was carried out in 3-year-old *Alstonia scholaris* R.Br. Plantation at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province, with 3 different densities i.e., 40,000, 10,000 and 2,500 trees per hectare (6,400, 1,600 and 400 trees per rai) respectively. The results showed that leaf area index estimated by hemispherical photography gave the highest value, since it was actually the value of canopy area index of which branches and stems were included. Using different techniques in leaf area index estimation were not different statistically in 40,000 and 2,500 trees per hectare plots, but different statistically in 10,000 trees per hectare plot. The results implied that any techniques can be used for leaf area index determination if the canopy is evenly distributed without large gap. If the canopy is not evenly distributed, clip method which is the direct method for leaf area determination is probably provided the best result. If hemispherical photography and plant canopy analyzer are used, more samples must be considered. Advantages and disadvantages of these three techniques were discussed in details in the present study.

บทคัดย่อ

การประมาณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของหมู่ไม้มีหลายวิธี การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีการตัดใบ วิธีการถ่ายภาพเรเนียนยอด และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer โดยดำเนินการศึกษาในสวนป่าดินเปิดอายุ 3 ปี ที่ระดับความหนาแน่นต่างๆ 3 ระดับ คือ 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ ในสถานีวิจัยวนเกษตรตราด อำเภอมือ จังหวัดตราด ผลการศึกษพบว่า วิธีการถ่ายภาพจะให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบสูงที่สุด เนื่องจากค่าที่วัดได้จากการถ่ายภาพ และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer เป็นค่าของดัชนีพื้นที่เรเนียนยอด เพราะได้รวมเอาส่วนของกิ่ง ก้าน และลำต้น เข้าไปด้วย ค่าที่ได้จึงอาจจะสูงกว่าวิธีการตัดใบ ซึ่งเป็นค่าของดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยตรง อย่างไรก็ตาม การหาดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธี ให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความหนาแน่น 6,400 และ 400 ต้นต่อไร่ แต่มีความแตกต่าง

¹ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ² สำนักส่งเสริมการปลูกป่าภาคเอกชน กรมป่าไม้ จตุจักร กรุงเทพฯ

ทางสถิติที่ระดับความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบอาจเลือกใช้วิธีการใดก็ได้หากในแปลงที่ศึกษามีการกระจายของเรือนยอดสม่ำเสมอต่อเนื่อง และมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดน้อย แต่หากเรือนยอดไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดมาก วิธีการตัดใบอาจถือว่าเป็นวิธีการที่ให้ค่าถูกต้องมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีการวัดทางตรง หากใช้วิธีการถ่ายภาพและใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ก็ควรมีการสุ่มตัวอย่างให้กระจายทั่วทั้งพื้นที่ และเพิ่มจำนวนตัวอย่างที่ศึกษาให้มากขึ้น ซึ่งวิธีการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธี มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน และได้วิจารณ์ในการศึกษานี้

คำนำ

ใบเป็นส่วนประกอบของเรือนยอดของต้นไม้ ที่ทำหน้าที่ในการรับพลังงานแสงเพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเติบโตและผลผลิตของต้นไม้ ดังนั้น ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ (leaf area index, LAI) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวใบทั้งหมดและพื้นที่ดินที่ห่มใบปกคลุม จึงเป็นข้อมูลสำคัญในการประเมินความสามารถในการสร้างผลผลิตของต้นไม้ Kozłowski *et al.* (1991) กล่าวว่า การเติบโตและผลผลิตของต้นไม้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของต้นไม้ เมื่อดัชนีพื้นที่ผิวใบเพิ่มมากขึ้นมักมีผลทำให้ผลผลิตของต้นไม้เพิ่มมากขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม หากดัชนีพื้นที่ผิวใบของต้นไม้สูงมากเกินไป ก็อาจมีผลให้ผลผลิตของต้นไม้ลดลงได้เช่นกัน ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่เกิดเนื่องมาจากการแย่งแย่งปัจจัยแวดล้อมที่ถูกจำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแสง ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบในระดับเหมาะสมจึงเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการรักษาอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุดของเรือนยอดต้นไม้

แม้ว่าดัชนีพื้นที่ผิวใบจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อผลผลิตของต้นไม้ แต่การหาดัชนีพื้นที่ผิวใบของต้นไม้เป็นเรื่องค่อนข้างยุ่งยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดหาพื้นที่ผิวใบทั้งหมดของเรือนยอด เนื่องจากต้องใช้แรงงานและเวลานาน จึงได้มีผู้พยายามศึกษาคิดค้นวิธีการทางอ้อมเพื่อประมาณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ ซึ่งสามารถดำเนินการได้หลายวิธี โดยมีรายละเอียด

และหลักการในการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบที่แตกต่างกัน และได้มีการรวบรวมไว้ในเอกสารหลายเล่ม อาทิ Larsen and Kershaw (1990), Van Volkenburgh and Davies (1990) และ Norman and Campbell (1991) เป็นต้น วิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการประเมินดัชนีพื้นที่ผิวใบนั้นมีความถูกต้องแม่นยำ รวมทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ซึ่งผู้ศึกษาคือผู้พิจารณาถึงความเหมาะสมในแต่ละกรณี เช่น ลักษณะโครงสร้างของต้นไม้ สภาพแวดล้อม เวลา แรงงาน และงบประมาณ เป็นต้น

ตีนเป็ด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า สัตบรรณ มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Alstonia scholaris* R.Br. จัดอยู่ในวงศ์ Apocynaceae เป็นพันธุ์ไม้พื้นเมือง พบกระจายอยู่ทั่วทุกภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณที่มีความชื้นสูง มีขนาดใหญ่สูงได้ถึง 40 เมตร เรือนยอดแตกเป็นชั้นๆ รูปเจดีย์ ใบเป็นใบเดี่ยว เรียงกันเป็นวงรอบกิ่ง จำนวน 5-8 ใบ ไม้ต้นเป็ดเป็นไม้เนื้ออ่อนและเบา ไซดบดได้ง่าย นิยมใช้ในอุตสาหกรรมดินสอ ปัจจุบันนิยมปลูกเป็นไม้ประดับในเมือง (กรมป่าไม้, 2529)

สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่แตกต่างกัน 3 วิธี ในสวนป่าตีนเป็ดที่ปลูกด้วยความหนาแน่นแตกต่างกัน เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการเลือกใช้วิธีการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบที่เหมาะสมกับสวนป่าตีนเป็ด และสวนป่าไม้ชนิดอื่นๆ ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

แปลงตัวอย่าง

การศึกษารังนี้ดำเนินการศึกษาที่สวนป่าดินเปิด อายุ 3 ปี ในบริเวณสถานีวิจัยวนเกษตรตราด อำเภอ เมือง จังหวัดตราด โดยมีระยะปลูกที่แตกต่างกัน 3 ระยะ คือ 0.5 x 0.5, 1.0 x 1.0 และ 2.0 x 2.0 เมตร หรือคิดเป็นความหนาแน่นของต้นไม้เท่ากับ 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ หรือเท่ากับ 40,000, 10,000 และ 2,500 ต้นต่อเฮกแตร์ ตามลำดับ แปลงตัวอย่างมีขนาด 40 x 40 ตารางเมตร โดยมีผังการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) จำนวน 3 ซ้ำ สำหรับดินเปิดในแปลงทดลองมีค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางโคนต้น และความสูงทั้งหมด ดังแสดงใน Table 1

วิธีการศึกษา

ดำเนินการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบในสวนป่าดินเปิดด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังนี้

(1) วิธีการตัดใบ (Clip method)

ทำการสุ่มตัวอย่างดินดินเปิดในแปลงตัวอย่าง โดยในแต่ละซ้ำจะทำการสุ่มตัวอย่างดินเปิดจำนวน 4 ต้น เป็นมุมสี่เหลี่ยม ตัดใบไม้ทั้งหมดออกจากต้นไม้ตัวอย่าง โดยแยกเป็นรายต้น จำแนกใบไม้ทั้งหมดออกเป็น 5 ชั้นขนาดตามความยาวของใบ ได้แก่ <8, >8-12, >12-16, >16-20 และ >20 เซนติเมตร นับจำนวนใบทั้งหมดในแต่ละชั้นขนาดความยาว แล้วสุ่มตัวอย่างใบจำนวน 5 ใบในแต่ละชั้นเพื่อหาพื้นที่ผิวใบแต่ละใบโดยการสแกนใบเป็นภาพดิจิทัล (digital) แล้ววิเคราะห์หาพื้นที่ด้วยโปรแกรม Delta-T Scan Version 2.04 คำนวณหาพื้นที่ผิวใบเฉลี่ยในแต่ละชั้นขนาด แล้วคำนวณหาพื้นที่ผิวใบทั้งหมดต่อต้น ดังนี้

$$\text{พื้นที่ผิวใบทั้งหมดต่อต้น} = \Sigma (\text{พื้นที่ใบในแต่ละชั้นขนาด} \times \text{จำนวนใบในแต่ละชั้นขนาด})$$

คำนวณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบ จากสูตร

$$\text{ดัชนีพื้นที่ผิวใบ} = \frac{\text{พื้นที่ผิวใบทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ดินที่เรือนยอด ครอบคลุม}}$$

(2) วิธีการถ่ายภาพเรือนยอด (Hemispherical photography)

ทำการถ่ายภาพเรือนยอดของสวนป่าดินเปิด ด้วยกล้องถ่ายภาพที่ประกอบด้วยเลนส์ตาปลา (fisheye lens) ในแปลงตัวอย่างจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ภาพ โดยใช้ฟิล์มแบบสไลด์ ซึ่งจะทำให้ได้ภาพถ่ายของเรือนยอดที่ครอบคลุมพื้นที่มุมกว้าง 180 องศา ทำการตั้งกล้องที่บริเวณกึ่งกลางของระยะปลูก การถ่ายภาพจะถ่ายในช่วงเช้าหรือช่วงเย็น เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้แสงจากดวงอาทิตย์เข้าสู่ภาพ เมื่อได้ภาพสไลด์แล้วทำการแปลงภาพสไลด์เป็นภาพดิจิทัล หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบจากภาพด้วยโปรแกรม FEW 5.2 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย Dr. Moriyoshi Ishizuka จากประเทศญี่ปุ่น เนื่องจากการวิเคราะห์ดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยวิธีนี้ได้รวมเอาส่วนของกิ่งก้านของเรือนยอดที่ติดเข้ามาในภาพถ่ายด้วย จึงมักเรียกค่าที่คำนวณได้ว่าดัชนีพื้นที่เรือนยอด (canopy area index)

(3) การใช้เครื่องมือ Plant Canopy Analyzer

ใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer รุ่น LAI-2000 ของบริษัท Li-cor ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนคือส่วนที่ทำหน้าที่บันทึกข้อมูลและประมวลผล (data logger) และส่วนที่ใช้วัดประกอบด้วยแกนขาวมีเลนส์ตาปลาติดอยู่ส่วนปลายแกน ในการวัดให้ยืนยังจุดที่จะวัดแล้วถือแกนวัดให้อยู่ในแนวระนาบกับพื้นดิน กดปุ่มเพื่อบันทึกค่า ทำการบันทึกค่าในแปลงตัวอย่างโดยเลือกบริเวณกึ่งกลางแถวจำนวน

4 ครั้ง ในแต่ละครั้งให้มีระยะห่างประมาณ 10 ก้าว แล้วออกมาบันทึกค่าภายนอกเรือนยอด 1 ครั้ง นับเป็น 1 รอบ ดำเนินการในลักษณะดังกล่าวจำนวน 3 รอบ ต่อแปลงตัวอย่าง 1 ซ้ำ หลังจากนั้น เครื่องจะทำการบันทึกและประมวลผลค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบให้ทันที เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวใช้เลนส์ตาปลาเช่นเดียวกับถ่ายภาพเรือนยอด ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่วิเคราะห์ได้จึงเป็นค่าที่รวมเอาส่วนของกิ่งก้านของเรือนยอด หรือดัชนีพื้นที่เรือนยอด เช่นเดียวกับการถ่ายภาพ

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ได้จากวิธีการวัดที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

Table 1. Average diameter at ground level and total height of of 3-year-old *Alstonia scholaris* plantation planted under different densities at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province

Spacing (meter x meter)	Density		Diameter at ground level (centimeter)	Total height (meter)
	(tree/hectare)	(tree/rai)		
0.5 x 0.5	40,000	6,400	4.15	1.79
1.0 x 1.0	10,000	1,600	5.34	2.03
2.0 x 2.0	2,500	400	9.27	3.01

ผลการศึกษา

การหาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยวิธีการตัดใบ

การตัดใบเพื่อหาพื้นที่ผิวใบทั้งหมดของเรือนยอด จัดเป็นวิธีการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยทางตรงวิธีหนึ่ง และเป็นวิธีที่นับว่าให้ค่าถูกต้องและแม่นยำแต่ต้องใช้ เวลาและแรงงานจำนวนมาก (Larsen and Kershaw, 1990) จึงไม่เป็นที่นิยมนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากการหาพื้นที่ผิวใบต้องใช้วิธีการตัดใบออกจากต้น เพราะ ต้นไม้อาจตายได้

จากการตัดและจำแนกใบดินเปิดออกเป็น 5 ชั้น ตามความยาวของใบ เพื่อทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวใบทั้งหมดของเรือนยอด พบว่า พื้นที่ผิวใบทั้งหมดของ ดินเปิดอายุ 3 ปี ที่ปลูกด้วยความหนาแน่นแตกต่างกัน มีจำนวนใบและพื้นที่ผิวใบทั้งหมดแตกต่างกันอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) โดยมีจำนวนใบเฉลี่ย เท่ากับ 110.49, 117.49 และ 2,114.66 ใบต่อต้น คิดเป็น พื้นที่ผิวใบทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 0.4110, 0.8250 และ 5.2044 ตารางเมตรต่อต้น เมื่อมีความหนาแน่นเท่ากับ 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ตามลำดับ และใบที่มี ขนาดปานกลาง (มีความยาวของใบน้อยกว่า 12-16 เซนติเมตร) มีจำนวนใบมากที่สุดยกเว้นในแปลงที่มีความหนาแน่น 400 ต้นต่อไร่ ซึ่งมีใบขนาดเล็ก (ความยาวน้อยกว่า 8 เซนติเมตร) มากที่สุด (Table 2) จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาแน่นของต้นดินเปิดต่อพื้นที่ลดลง จะทำให้พื้นที่ผิวใบและจำนวนใบต่อต้น เพิ่มขึ้น โดยเฉพาอย่างยิ่งที่ความหนาแน่น เท่ากับ 400 ต้นต่อไร่ ซึ่งเมื่อพิจารณาการเติบโตของ ดินเปิดใน Table 1 และการเติบโตและผลผลิตของ ดินเปิดในพื้นที่เดียวกันนี้ที่รายงานโดยสมภัทร (2544) จะเห็นได้ว่าการเติบโตและผลผลิตของดินเปิด

ที่ความหนาแน่น 400 ต้นต่อไร่ มีการเติบโตดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระดับความหนาแน่นที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเติบโตของต้นไม้ หรืออาจเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของพื้นที่

เมื่อคำนวณหาพื้นที่การปกคลุมของเรือนยอดของต้นไม้ในแต่ละระดับความหนาแน่นโดยใช้ขนาดพื้นที่แปลงตัวอย่างหารด้วยจำนวนต้นไม้ในแปลง ได้พื้นที่การปกคลุมเรือนยอดเท่ากับ 0.25, 1.00 และ 4.00 ตารางเมตรต่อต้น ซึ่งคำนวณหาค่าดัชนีพื้นที่ที่ผิวใบได้เท่ากับ 1.65, 0.82 และ 1.30 ที่ระดับความหนาแน่น 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ (Table 2) แม้ว่าการหาค่าดัชนีพื้นที่ที่ผิวใบโดยวิธีการตัดใบจะเป็นวิธีที่ทำการศึกษาโดยตรงกับต้นไม้และถือ

ว่าเป็นวิธีการที่ให้ความถูกต้องมากที่สุด (Larsen and Kershaw, 1990) แต่ในทางปฏิบัตินั้น การวัดหาพื้นที่ที่ผิวใบทั้งหมดของต้นไม้ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากใบมีจำนวนมากและหากใช้เวลาในการวัดนานเกินไปก็จะเหี่ยว ทำให้พื้นที่ใบลดลงและเกิดความผิดพลาดได้ สำหรับการศึกษารังนี้ได้นำวิธีการนับใบตามชั้นขนาดความยาว แล้วจึงประเมินหาพื้นที่ที่ผิวใบซึ่งก็อาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแบ่งชั้นขนาดของใบ เนื่องจากการใช้ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ใบในชั้นขนาดนั้นๆ เทคนิคการตัดใบจะสามารถประเมินพื้นที่ที่ผิวใบทั้งหมดของเรือนยอด และดัชนีพื้นที่ที่ผิวใบเท่านั้นไม่สามารถประเมินหาค่าอื่นๆ ได้

Table 2. Number of leaf, total leaf area and leaf area index of 3-year-old *Alstonia scholaris* plantation planted under different densities at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province, estimated by clip method

Density (tree/rai)	Leaf length class (cm)	Leaf area (cm ² /leaf)	Number of leaf	Total leaf area (m ² /tree)	Leaf area index
6,400	< 8	11.527	21.08	0.0251	1.65
	>8 - 12	27.158	36.33	0.0976	
	>12 - 16	44.285	33.25	0.1457	
	>16 - 20	66.276	16.83	0.1121	
	> 20	92.934	3.00	0.0305	
	Total		110.49	0.4110	
1,600	< 8	10.883	60.66	0.1160	0.82
	>8 - 12	23.617	55.50	0.1966	
	>12 - 16	52.110	67.16	0.2682	
	>16 - 20	67.857	36.50	0.1724	
	> 20	88.470	15.16	0.0718	
	Total		234.98	0.8250	
400	< 8	8.873	778.33	0.5313	1.30
	>8 - 12	20.147	572.00	1.0093	
	>12 - 16	37.303	553.00	2.0789	
	>16 - 20	68.117	163.00	1.1075	
	> 20	98.130	48.33	0.4772	
	Total		2,114.66	5.2044	
Average			780.88	2.0093	1.26

การหาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยวิธีการถ่ายภาพเรือนยอด

เทคนิคการถ่ายภาพเรือนยอดเป็นเทคนิคที่ได้มีการพัฒนามานาน โดยในระยะแรกเป็นการพัฒนาเพื่อใช้ภาพถ่ายในการศึกษาสภาพของแสง และต่อมาได้มีการพัฒนาเพื่อศึกษาเรือนยอดของต้นไม้ เทคนิคดังกล่าวประกอบด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องที่ประกอบด้วยเลนส์คาปลา ซึ่งมีมุมกว้าง 180 องศา เป็นการถ่ายภาพจากพื้นดินผ่านเรือนยอดขึ้นสู่ท้องฟ้า ภาพถ่ายเรือนยอดของต้นไม้ที่ได้มีลักษณะเป็นภาพวงกลม (Figure 1) แล้วจึงนำภาพที่ได้มาคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างรัศมี (radial distance) และมุมเซนิต (zenith angle) การวิเคราะห์ภาพในระยะเริ่มแรกเป็นการคำนวณด้วยมือซึ่งค่อนข้างยุ่งยาก ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการคำนวณและประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีอยู่มากมายหลายโปรแกรม อาทิ SOLARCAL (Charzdon and Field, 1987), CANOPY (Rich, 1990), HEMIPHOT (Steege, 1994) และ Hemi View 2.0 ซึ่งทุกโปรแกรมล้วนมีรากฐานการคำนวณที่คล้ายคลึงกัน โดยอาศัยทฤษฎีในเรื่องเรขาคณิตของแสง ส่วนการคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบนั้นจะเป็นการคำนวณทางอ้อมโดยอาศัยหลักการของแสงที่ส่องผ่านเรือนยอดลงมา ด้วยวิธีการนี้ยังสามารถคำนวณค่าอื่นๆ เช่น ขนาดช่องว่างของเรือนยอดและการจัดเรียงตัวของใบ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการถ่ายภาพของเรือนยอดเป็นการถ่ายภาพโครงสร้างทั้งหมดของเรือนยอดอันได้แก่ ส่วนของใบ กิ่ง ก้าน และลำต้น ค่าของดัชนีพื้นที่ผิวใบที่คำนวณได้จึงรวมเอาทุกส่วนของเรือนยอดเข้าไปด้วย แม้ว่าโปรแกรมส่วนมากจะมีทางเลือกให้ผู้เลือกเอาส่วนของลำต้นและกิ่งที่ไม่ต้องการนำมาใช้ในการคำนวณออกได้ แต่ก็เป็นงานที่ต้องใช้เวลาและความประณีตมาก ซึ่งมักไม่นิยมทำ

จึงมักเรียกดัชนีพื้นที่ผิวใบที่คำนวณได้โดยวิธีนี้ว่า ดัชนีพื้นที่เรือนยอด (canopy area index, CAI) หรือ ดัชนีพื้นที่พืช (plant area index, PAI หรือ vegetation area index, VAI)

สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายในการศึกษาครั้งนี้ ใช้โปรแกรม FEW 5.2 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย Dr. Moriyoshi Ishizuka จากประเทศญี่ปุ่น ได้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ หรือดัชนีพื้นที่เรือนยอดของดินเปิดอายุ 3 ปี เท่ากับ 1.66, 1.22 และ 1.36 ที่ระดับความหนาแน่น 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ ตามลำดับ การใช้วิธีการถ่ายภาพเรือนยอดในการประมาณหาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบนี้ นอกจากจะได้ค่าดัชนีพื้นที่เรือนยอดแล้ว ยังสามารถคำนวณหาความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่ต้องผ่านเรือนยอด ซึ่งจะมีประโยชน์ในการศึกษาการสืบพันธุ์ตามธรรมชาติ หรือการเติบโตของพรรณไม้ภายใต้เรือนยอด ปริมาณความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่ส่องผ่านเรือนยอดนี้จะมีความสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับดัชนีพื้นที่ผิวใบ คือเมื่อดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่ามาก ปริมาณความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่ส่องผ่านเรือนยอดจะมีค่าน้อย ปริมาณความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่ส่องผ่านเรือนยอดดินเปิดอายุ 3 ปี ที่มีความหนาแน่น 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ มีค่าเท่ากับ 37.67, 32.69 และ 34.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 3)

การใช้เทคนิคการถ่ายภาพเรือนยอดเป็นวิธีการที่ทำให้สะดวก รวดเร็ว และไม่สิ้นเปลืองแรงงานมาก แต่ค่าที่วิเคราะห์ได้จะไม่ใช้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยตรง เนื่องจากได้รวมเอาส่วนที่เป็นกิ่ง ก้าน และลำต้น มาใช้ในการคำนวณด้วย จึงเหมาะแก่การศึกษาลักษณะโครงสร้างเรือนยอดมากกว่าพื้นที่ผิวใบ โดยตรง อย่างไรก็ตาม ผู้ศึกษาสามารถลบเอาส่วนที่เป็นลำต้นขนาดใหญ่ ซึ่งอาจทำให้การคำนวณผิดพลาดมากเกินไป

Table 3. Leaf area index and relative light intensity of 3-year-old *Alstonia sholaris* plantation planted under different densities at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province, estimated by using hemispherical photography technique

Density (tree/rai)	Leaf area index	Relative light intensity (%)
6,400	1.66 ± 0.04	35.01 ± 2.51
1,600	1.22 ± 0.18	50.85 ± 1.65
400	1.36 ± 0.19	46.86 ± 9.76
Average	1.41 ± 0.22	44.24 ± 8.24

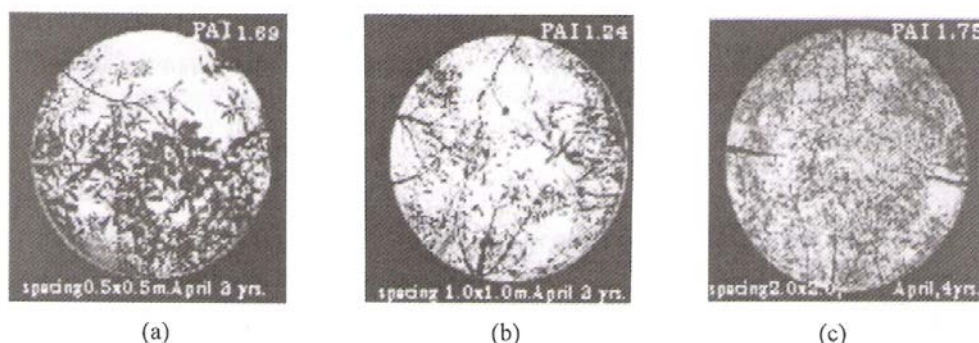


Figure 1. Hemispherical photographs of 3-year-old *Alstonia sholaris* plantation planted under different densities at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province, (a) 6,400 (b) 1,600 and (c) 400 trees per rai

ไปออกจากภาพได้ การใช้เทคนิคการถ่ายภาพเรือนยอด นอกจากจะสามารถประเมินหาดัชนีพื้นที่ผิวใบ (ดัชนีพื้นที่เรือนยอด) แล้ว ยังสามารถประเมินหาค่าปริมาณความเข้มแสงสัมพัทธ์ที่ต้องผ่านเรือนยอด ปริมาณความเข้มแสงในแต่ละตำแหน่งของเรือนยอด และปริมาณความเข้มแสงรวม เนื่องจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเป็นการใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับแสงมาคำนวณ ข้อดีอีกประการหนึ่งของการใช้เทคนิคการถ่ายภาพคือ สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเรือนยอดได้ เนื่องจากมีการบันทึกภาพไว้

ความคลาดเคลื่อนของผลการศึกษาจากการใช้เทคนิคการถ่ายภาพเรือนยอดอาจเกิดขึ้นได้ในหลายขั้นตอน

ทั้งนี้เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวเป็นวิธีการที่มีการดำเนินงานหลายขั้นตอน ตั้งแต่ขั้นตอนการถ่ายภาพ ขั้นตอนการวิเคราะห์ ตลอดจนโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการถ่ายภาพนั้น ควรจะถ่ายภาพในช่วงเช้าหรือเย็น ไม่ควรปล่อยให้แสงโดยตรงหรือแสงสะท้อนเข้ามาในภาพถ่ายมากเกินไป จะต้องวางกล้องให้อยู่ในแนวระนาบ และกำหนดแนวทิศเหนือให้เห็นได้ในภาพ หากกล้องไม่อยู่ในแนวระนาบ การคำนวณค่าอาจผิดพลาดได้ ในปัจจุบันมีกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัลที่มีความละเอียดสูง จึงสามารถใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพแทนการใช้ภาพสไลด์แบบเดิม ซึ่งจะต้องนำมาแปลงให้เป็นภาพดิจิทัล การกำหนดจุด

ถ่ายภาพควร จะให้มีการกระจายทั่วพื้นที่ ทั้งส่วนที่ใกล้เรือนยอดและไกลจากเรือนยอด หากจุดที่ถ่ายภาพไม่เป็นตัวแทนที่ดีของแปลงตัวอย่าง จะทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้ผิดจากความเป็นจริง ขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งคือการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งผู้วิเคราะห์จะต้องกำหนดจุดที่แสดงความแตกต่างระหว่างท้องฟ้าและเรือนยอด ซึ่งต้องอาศัยความชำนาญของผู้วิเคราะห์ การกำหนดค่าที่แตกต่างกัน จะทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกัน และการเลือกใช้โปรแกรมที่แตกต่างกันก็จะทำให้ผลที่ได้แตกต่างกันด้วย จะเห็นว่าเทคนิคการถ่ายภาพเรือนยอดเป็นวิธีการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยทางอ้อม ซึ่งแม้ว่าจะสะดวกและรวดเร็ว แต่ต้องมีประสิทธิภาพและความชำนาญในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน

การหาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer

เครื่อง Plant Canopy Analyzer โมเดล LAI 2000 ของบริษัท Licor เป็นเครื่องมือสำหรับวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ หรือดัชนีพื้นที่เรือนยอด ที่ใช้หลักการเช่นเดียวกับการถ่ายภาพเรือนยอด คืออาศัยทฤษฎีในเรื่องเรขาคณิตของแสง โดยมีเลนส์ตาปลาเป็นจุดรับแสงอยู่ตรงส่วนปลายของแกนวัด และมีระบบการบันทึกและประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ในส่วนที่เป็น data logger จึงสามารถอ่านค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบได้ทันที ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ได้ก็เป็นค่าที่รวมเอาพื้นที่ส่วนใบกิ่ง ก้าน และลำต้นด้วยเช่นเดียวกับการถ่ายภาพเรือนยอด เครื่อง Plant Canopy Analyzer เป็นเครื่องมือที่มีขนาดเล็ก สามารถนำเข้าไปใช้ในพื้นที่ได้โดยสะดวก

จากการศึกษาค่าดัชนีพื้นที่เรือนยอดของดินเปิดอายุ 3 ปี ที่ปลูกด้วยความหนาแน่น 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ โดยใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer พบว่ามีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบเท่ากับ 1.40, 0.82 และ 1.40

ตามลำดับ (Table 4) นอกจากจะได้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบแล้ว เครื่อง Plant Canopy Analyzer ยังสามารถคำนวณค่ามุมของใบและช่องว่างระหว่างเรือนยอดด้วย

การหาดัชนีพื้นที่ผิวใบด้วยเครื่อง Plant Canopy Analyzer มีความสะดวกและรวดเร็วกว่าการใช้เทคนิคการถ่ายภาพ เนื่องจากสามารถอ่านค่าได้ทันที แต่เครื่องมือดังกล่าวก็มีราคาแพง รวมทั้งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ เนื่องจากในการประมวลผลจะต้องวัดค่าของแสงในพื้นที่โล่งเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งการศึกษาในพื้นที่ป่านั้น การหาพื้นที่โล่งว่างที่มีขนาดอย่างน้อยสองเท่าของความสูงเรือนยอดเป็นเรื่องค่อนข้างยาก เครื่องมือดังกล่าวจึงเหมาะกับการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบของพืชเกษตรมากกว่าพืชป่าไม้ นอกจากนั้นสภาพอากาศในเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทยนั้น ในอากาศมักมีเมฆมาก ทำให้แสงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เครื่องมือดังกล่าวจึงเหมาะกับพื้นที่ในเขตอบอุ่นซึ่งมีสภาพอากาศท้องฟ้าแจ่มใสมากกว่าพื้นที่ในเขตศูนย์สูตรซึ่งมีเมฆมาก ข้อจำกัดต่างๆ ดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูลได้

การเปรียบเทียบค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธี

ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่วัดด้วยวิธีการต่างๆ 3 วิธี อันได้แก่ วิธีการตัดใบ วิธีการถ่ายภาพเรือนยอด และ การใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ในสวนป่าดินเปิดอายุ 3 ปี ที่ปลูกด้วยความหนาแน่นแตกต่างกัน คือ 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ บริเวณสถานีวิจัยวนเกษตรตราด อำเภอเมือง จังหวัดตราด ได้ผลดังแสดงใน Table 4 ซึ่งผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่วัดด้วยวิธีการต่างๆ ทั้ง 3 วิธี มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยปกติ ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของต้นไม้เพิ่มขึ้น แต่การศึกษาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของดินเปิดในการศึกษา

ครั้งนี้พบว่า ดัชนีพื้นที่ผิวใบของดินเปิดที่ระดับความหนาแน่น 400 ต้นต่อไร่ มีค่ามากกว่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของดินเปิดที่ระดับความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ ไม่ว่าจะใช้เทคนิคการวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบแบบใด ทั้งนี้ อาจเนื่องจากว่าที่ระดับความหนาแน่น 400 ต้นต่อไร่ เป็นระดับความหนาแน่นที่เหมาะสมต่อการเติบโตของดินเปิด เนื่องจากมีพื้นที่ว่างระหว่างเรือนยอดมากขึ้น ทำให้มีการสร้างผลผลิตของใบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการเติบโตของดินเปิดในตาราง

ที่ 1 คือที่ระดับความหนาแน่น 400 ต้นต่อไร่ มีการเติบโตดีที่สุด ดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่าสูงที่สุดในแปลงที่มีความหนาแน่น 6,400 ต้นต่อไร่ เท่ากับ 1.65, 1.66 และ 1.40 และมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบต่ำที่สุด ในแปลงที่มีความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ เท่ากับ 0.82, 1.22 และ 0.82 เมื่อใช้วิธีการตัดใบ วิธีการถ่ายภาพเรือนยอด และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ตามลำดับ

Table 4. Leaf area index of of 3-year-old *Alstonia scholaris* plantation planted under different densities at Trat Agroforestry Research Station, Muang District, Trat Province, estimated by different techniques

Density (trees per rai)	Leaf area index			F value
	Clip Method	Hemispherical Photography	Plant Canopy Analyzer	
6,400	1.65 ± 0.28	1.66 ± 0.04	1.40 ± 0.12	2.061 ^{ns}
1,600	0.82a ± 0.06	1.22b ± 0.18	0.82a ± 0.14	13.574**
400	1.30 ± 0.27	1.36 ± 0.19	1.40 ± 0.01	0.201 ^{ns}
Average	1.26 ± 0.42	1.41 ± 0.22	1.21 ± 0.33	
F value	10.03**	13.50**	31.67**	

Remarks : ns = not significant at p<0.05

** = significant at p<0.01

the same alphabet behind numeric data in each row indicating the non-significant at the 0.05 level of significance using Duncan's New Multiple Range Test

โดยปกติ ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบในสวนป่ามักจะ มีค่าต่ำกว่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าธรรมชาติ เนื่องจากต้นไม้ในป่าธรรมชาติจะมีหลายชั้นเรือนยอด ในขณะที่ต้นไม้ในสวนป่ามีเพียงชั้นเรือนยอดเดียว Forseth and Norman (1993) รายงานว่าป่าผลัดใบในเขตอบอุ่นจะมีค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบอยู่ระหว่าง 3-9 ในขณะที่ดัชนีพื้นที่ผิวใบของสวนป่ายูคาลิปตัสในประเทศออสเตรเลีย มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-1.9 (Anderson, 1964) Ogawa *et al.* (1965) ได้ศึกษาค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าชนิดต่างๆ ในประเทศไทยและรายงานค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่า

ดิบมีค่าเท่ากับ 10.8 ในขณะที่ดัชนีพื้นที่ผิวใบของป่าเต็งรังมีค่าเพียง 1.8 เท่านั้น ดัชนีพื้นที่ผิวใบของสวนป่าดินเปิดอายุ 3 ปี ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าใกล้เคียงกับดัชนีพื้นที่ผิวใบของสวนป่าสักอายุ 19 ปี ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.92-1.70 ในแปลงที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน (คมสัน, 2543)

เมื่อนำค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ได้จากการประมาณด้วยเทคนิคต่างๆ ทั้ง 3 รูปแบบ มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน พบว่า การประมาณดัชนีพื้นที่ผิวใบด้วยวิธีที่แตกต่างกันให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติในแปลงที่มีความหนาแน่น 6,400 และ 400

ทางสถิติในแปลงที่มีความหนาแน่น 6,400 และ 400 ต้นต่อไร่ แต่ในแปลงที่มีความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ การประมาณดัชนีพื้นที่ผิวใบด้วยการถ่ายภาพให้ค่าที่สูงกว่าวิธีการตัดใบและการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่า ดินเปิดที่ระดับความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ มีการเติบโตไม่ดก ทำให้การกระจายของใบไม่สม่ำเสมอ มีช่องว่างระหว่างเรือนยอดมาก การวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบจึงอาจคลาดเคลื่อนได้ เมื่อพิจารณาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของวิธีการวัดค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธี พบว่า วิธีการตัดใบจะให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงกว่าวิธีการถ่ายภาพ และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer เนื่องจากวิธีการตัดใบเป็นการสุ่มตัวอย่างต้นไม้แต่ละต้น ซึ่งทำให้มีความผันแปรมากกว่าอีก 2 วิธี ซึ่งการวัดในแต่ละครั้งเป็นค่าเฉลี่ยของต้นไม้ในแปลงจำนวนหลายๆ ต้น ทำให้ความผันแปรของข้อมูลในการวัดแต่ละครั้งน้อยกว่า

ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ได้จากวิธีการถ่ายภาพมีค่าสูงกว่าวิธีการตัดใบ และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายภาพเป็นค่าของดัชนีพื้นที่เรือนยอด ที่รวมเอาพื้นที่กิ่ง ก้าน และลำต้นเข้าไปด้วย อย่างไรก็ตาม หากจุดที่ทำการถ่ายภาพมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดมาก อาจทำให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริงได้ ดังนั้น การถ่ายภาพจึงควรมีหลายจุด และกระจายทั่วทั้งพื้นที่ สำหรับค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่วัดด้วย Plant Canopy Analyzer ในการศึกษาครั้งนี้มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการถ่ายภาพ แม้ว่าจะเป็นค่าของดัชนีพื้นที่เรือนยอดเช่นเดียวกับการถ่ายภาพ ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าในการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ผู้ศึกษามักจะเดินวัดในช่องว่างระหว่างแถวของต้นไม้ ทำให้มีพื้นที่ช่องว่างเข้ามาอยู่ในเลนส์ตาปามากกว่าการใช้วิธีการถ่ายภาพ นอกจากนั้น ในการวัดค่าพื้นที่นอกแปลง

เพื่อเป็นจุดเปรียบเทียบนั้น อาจได้รับผลกระทบจากต้นไม้ในแปลงข้างเคียง ซึ่งทำให้ค่าที่วัดเพื่อนำมาใช้ในการประมวลผลเกิดความคลาดเคลื่อนได้

สรุปผล

จากการเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ 3 วิธี คือ การตัดใบ การถ่ายภาพเรือนยอด และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ในสวนป่าดินเปิดอายุ 3 ปี ที่ระดับความหนาแน่นต่างๆ 3 ระดับ คือ 6,400, 1,600 และ 400 ต้นต่อไร่ ในสถานีวิจัยวนเกษตรตราด อำเภอเมือง จังหวัดตราด พบว่า วิธีการหาดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธีให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความหนาแน่น 6,400 และ 400 ต้นต่อไร่ แต่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความหนาแน่น 1,600 ต้นต่อไร่ โดยวิธีการถ่ายภาพจะให้ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบสูงที่สุด เนื่องจากค่าที่วัดได้จากการถ่ายภาพ และการใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer เป็นค่าของดัชนีพื้นที่เรือนยอด เพราะได้รวมเอาส่วนของกิ่ง ก้าน และลำต้น เข้าไปด้วย ค่าที่ได้จึงอาจจะสูงกว่าวิธีการตัดใบ ซึ่งเป็นค่าของดัชนีพื้นที่ผิวใบโดยตรง สำหรับการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบอาจเลือกใช้วิธีการใดก็ได้หากในแปลงที่ศึกษามีการกระจายของเรือนยอดสม่ำเสมอ ต่อเนื่อง และมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดน้อย แต่หากเรือนยอดไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างระหว่างเรือนยอดมาก วิธีการตัดใบอาจให้ค่าที่ถูกต้องมากที่สุด หากใช้วิธีการถ่ายภาพและใช้เครื่อง Plant Canopy Analyzer ก็ควรมีการสุ่มตัวอย่างให้กระจายทั่วทั้งพื้นที่ และเพิ่มจำนวนตัวอย่างที่ศึกษาให้มากขึ้น สำหรับวิธีการประมาณหาดัชนีพื้นที่ผิวใบทั้ง 3 วิธีดังกล่าว มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ผู้ใช้จึงควรพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสม

เอกสารอ้างอิง

- กรมป่าไม้. 2529. ไม้ดินเปิด. สำนักส่งเสริมการปลูกป่า, กรมป่าไม้. กรุงเทพฯ.
- คมสัน เรืองฤทธิ์สารกุล. 2543. ความผันแปรตามฤดูกาลของดัชนีพื้นที่ผิวใบ ความเข้มแสงสัมพัทธ์ และ sap flow ของไม้สักในสวนป่าสักอายุ 19 ปี ที่ผ่านการตัดสงขยาในระยะด้วยวิธีการต่างๆ ณ สวนป่าทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- สมภัทร คลังทรัพย์. 2544. การเติบโตและผลผลิตของไม้ดินเปิดอายุ 4 ปี ที่ปลูกด้วยความหนาแน่นต่างกัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Anderson, M.C. 1964. Studies of the woodland light climate I. The photographic computation light condition. *J. Ecol.* 52:27-41.
- Chazdon, R.L. and C.B. Field. 1987. Photographic estimation of photosynthetically active radiation: Evaluation of a computerized technique. *Oecologia* 73 : 525-532.
- Forseth, I.N. and J.M. Norman. 1993. Modelling of solar irradiance, leaf energy budget and canopy photosynthesis, pp. 207-219. *In*: D.O. Hall, J.M.O. Scurlock, H.R. Bolhur-Nordenkamp, R.C. Leegood and S.P. Long (eds.), *Photosynthesis and Production in a Changing Environment*. Chapman and Hall, London.
- Kozlowski, T.T., P.J. Kramer and S.G. Pallardy. 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press, Inc., New York.
- Larsen, D.R. and J.A. Kershaw. 1990. Leaf area measurements, pp. 465-476. *In*: J. P. Lassois and Hinckley (eds.), *Techniques and Approachs in Forest Tree Ecophysiology*. CRC Press, Florida.
- Norman, J.M. and G.S. Campbell. 1991. Canopy structure, pp. 301-325. *In*: R.E. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney and P.W. Rundel (eds.), *Plant Physiological Ecology : Field Methods and Instrumentation*. Chapman and Hall, London.
- Ogawa, H., K. Yoda, T. Kira, K. Ogino, T. Shidei, D. Ratanavongse and C. Apasutya. 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation of Thailand. I. Structure and floristic composition. *Nature and Life in SE Asia*.
- Rich, P.M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Rev.* 5 : 13-29.
- Steege, H.T. 1994. HEMIPHOT: A programme to analyze light, light quality and vegetation indices from hemispherical photographs. The Tropenbos Foundation Wageningen, Utrecht University, The Netherlands.
- Van Volkenburgh, E. and W. J. Davies. 1990. Measuring growth and development of leaves, pp. 453-464. *In*: J.P. Lassois and T.M. Hinckley (eds.), *Techniques and Approachs in Forest Tree Ecophysiology*. CRC Press, Florida.