

นิพนธ์ต้นฉบับ

สมดุลคาร์บอนในระดับเรือนยอดของป่าดิบแล้งสะแกราช
และป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองCanopy Carbon Balance of the Sakaerat Dry Evergreen
and the Maeklong Mixed Deciduous Forestsซาพิศ ดิลกสัมพันธ¹Sapit Diloksumpun¹ดุริยะ สถาพร²Duriya Staporn²¹ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Faculty of Forestry, Kasetsart University Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand E-mail: sapit.d@ku.ac.th

² สำนักวิจัยการจัดการป่าไม้และผลิตผลป่าไม้ กรมป่าไม้ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Royal Forest Department, Chatuchak, Bangkok, 10900, Thailand

รับต้นฉบับ 16 ธันวาคม 2551

รับลงพิมพ์ 18 กุมภาพันธ์ 2552

ABSTRACT

A study on canopy carbon balance, undertaken at the Sakaerat dry evergreen forest, Nakhon Ratchasima province, and the Maeklong mixed deciduous forest, Kanchanaburi province, aimed to determine gross canopy photosynthesis and compare the canopy carbon balance of the two contrasting forests. Diurnal courses of the leaf photosynthesis were simulated by modeling photosynthesis with related physiological parameters and climatic data inputs. The gross canopy photosynthesis and respiration of the two forests were then simulated through the relationship between diurnal courses of leaf photosynthesis and leaf area index. The canopy carbon balance of the two forests was also analyzed and compared.

Diurnal courses of simulated leaf photosynthesis varied daily and seasonally with changes in environmental factors. Leaf photosynthesis of all species studied was generally high in the wet season and decreased considerably in the dry season due to seasonal water limitations. The simulated values of leaf photosynthesis of all species in various seasons appeared to be more than 75% correlated with the observed ones. The monthly gross photosynthesis production of the two forests, simulated from a direct and diffuse light model, reflected seasonal changes in leaf physiological characteristics and climatic factors. The Sakaerat dry evergreen forest not only sequestered considerably greater CO₂, indicated by gross primary production (GPP), but also released larger amounts of CO₂ to the atmosphere through autotrophic respiration compared to the Maeklong mixed deciduous forest. Nevertheless, the findings suggest that the former had higher net primary production (NPP), indicating its greater potential for canopy CO₂ uptake.

Keywords: canopy photosynthesis, gross primary production, net primary production, dry evergreen forest, mixed deciduous forest

บทคัดย่อ

การศึกษาสมมูลคาร์บอนในระดับเรือนยอดซึ่งดำเนินการศึกษาในพื้นที่ป่าดิบแล้งสะแกราช จังหวัดนครราชสีมา และป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง จังหวัดกาญจนบุรีนั้น มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมและเปรียบเทียบสมมูลคาร์บอนในระดับเรือนยอดของป่าทั้งสองแห่ง โดยทำการประมาณค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบด้วยแบบจำลองการสังเคราะห์แสง โดยใช้ข้อมูลนำเข้าทางด้านสรีรวิทยาและข้อมูลภูมิอากาศ และประมาณค่าการสังเคราะห์แสงและการหายใจของเรือนยอดโดยอาศัยความสัมพันธ์ของการสังเคราะห์แสงของใบในแต่ละวันและค่าดัชนีพื้นที่ใบ ตลอดจนวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมมูลคาร์บอนในระดับเรือนยอดของป่าทั้งสองแห่ง

ผลการศึกษาพบว่า การสังเคราะห์แสงสุทธิของใบในรอบวันมีความผันแปรในแต่ละวันและตามฤดูกาล ตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ โดยอัตราการสังเคราะห์แสงของใบมีค่าสูงในช่วงฤดูฝนและลดลงในช่วงฤดูแล้ง เนื่องจากการขาดน้ำตามฤดูกาล และค่าการสังเคราะห์แสงสุทธิของใบของพรรณไม้ทั้ง 4 ชนิดที่ประเมินได้จากแบบจำลองในฤดูต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงมากกว่าร้อยละ 75 จากการประมาณค่าด้วยแบบจำลองการสังเคราะห์แสงของเรือนยอด พบว่าป่าทั้งสองชนิดมีการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดรวมแตกต่างกันไปในแต่ละเดือน เนื่องจากความผันแปรตามฤดูกาลของลักษณะทางสรีรวิทยาของใบและปัจจัยทางภูมิอากาศ โดยป่าดิบแล้งสะแกราชมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศได้มากกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง แต่ป่าทั้งสองแห่งมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากการหายใจของต้นไม้ใกล้เคียงกัน จึงทำให้ป่าดิบแล้งสะแกราชมีผลผลิตปฐมภูมิสุทธิสูงกว่า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับเรือนยอดที่สูงกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง

คำสำคัญ: การสังเคราะห์แสงของเรือนยอด ผลผลิตปฐมภูมิรวม ผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ ป่าดิบแล้ง ป่าผสมผลัดใบ

คำนำ

ศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของป่ามีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น โครงสร้างสังคมพืช (species composition) โครงสร้างของเรือนยอด (canopy structure) ศักยภาพของการสังเคราะห์แสงของใบ (leaf photosynthesis) ลักษณะทางชีวลักษณ์ของใบ (leaf phenology) ของพรรณไม้ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของป่า เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่มีอิทธิพลทั้งทางตรงและ ทางอ้อมต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แสงนับเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมสำคัญที่สุดปัจจัย

หนึ่งที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อ กระบวนการสังเคราะห์แสงของใบและ ศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของป่า ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการสังเคราะห์แสงและความเข้มแสง (photosynthetic light response) โดยใช้สมการรูปแบบต่างๆ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าว (Boote and Loomis, 1991; Long and Hällgren, 1993; Leuning, 1995) รวมทั้งการศึกษาในพรรณไม้ป่าดิบแล้งสะแกราช (คุริยะ, 2547; Rundel *et al.*, 1995) และป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง (ประนอม, 2542; คุริยะ, 2547; ลดาวัลย์, 2547) อย่างไรก็ตาม ความผันแปรตามฤดูกาลและความผันแปร

ในรอบวันของการสังเคราะห์แสงอันเนื่องมาจากความผันแปรของ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นนอกเหนือจากความเข้มแสง เช่น ความชื้นในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศ (leaf-to-air vapor pressure difference) เป็นต้น ถิ่นนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์แสง ส่วนใหญ่อัตราการสังเคราะห์แสงของใบมีค่าสูงในช่วงฤดูฝนเนื่องจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมมีความเหมาะสมสำหรับกิจกรรมการสังเคราะห์แสง แต่อัตราการสังเคราะห์แสงของใบมีค่าลดลงในช่วงฤดูแล้ง เนื่องจากภาวะเครียดจากการขาดน้ำทั้งปริมาณความชื้นในดินและความชื้นในอากาศ แต่การตอบสนองต่อการขาดน้ำดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของพรรณไม้ ลักษณะทางพันธุกรรม และสภาพแวดล้อมที่ได้รับ (สาพิศ, 2545; คุริยะ, 2547; ฤควัด, 2547)

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปการสังเคราะห์แสงของใบ (ประนอม, 2542; คุริยะ, 2547) ดังนั้นในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมของป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองด้วย แบบจำลองของการสังเคราะห์แสงของเรือนยอด (canopy photosynthesis model) โดยอาศัยความ สัมพันธ์ของการสังเคราะห์แสงและปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยัง

เปรียบเทียบสมดุลคาร์บอนในระดับเรือนยอดของป่าทั้งสองแห่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

ทำการศึกษาในป่าดิบแล้งสะแกราช บริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช ในเขตพื้นที่สงวนชีวมณฑลสะแกราช อำเภอวังน้ำเขียว จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งมีตะเคียนหิน (*Hopea ferrea*) เป็นพรรณไม้เด่นและมีความสำคัญทางนิเวศวิทยามากที่สุด (IVI=101) และป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง บริเวณสถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งมีประดู่ป่า (*Pterocarpus macrocarpus*, IVI=34.4) แดง (*Xylocarpus xylocarpa*, IVI=26.8) กาสำปอก (*Vitex peduncularis*, IVI=16.82) รัง (*Shorea siamensis*, IVI=8.3) เป็นต้น เป็นพรรณไม้ที่มีความสำคัญทางนิเวศวิทยา โดยป่าทั้งสองแห่งมีหอคอยความสูง 45 เมตร สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศ

แบบจำลองการสังเคราะห์แสงของใบ

ประเมินการสังเคราะห์แสงของใบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากความสัมพันธ์ระหว่างการสังเคราะห์แสงของใบและความเข้มแสง (photosynthetic-light model) ตามสมการความสัมพันธ์แบบ quadratic (Long and Hällgren, 1993) ดังสมการที่ (1)

$$P_n = \frac{\phi PPF D + P_{\max} - \left((\phi PPF D + P_{\max})^2 - 4\phi\Theta P_{\max} PPF D \right)^{0.5}}{2\Theta} - R_d \quad \text{.....(1)}$$

เมื่อ	P_n	คือ การสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthesis, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	PPFD	คือ ความเข้มแสง (photosynthetic photon flux density, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	P_{max}	คือ การสังเคราะห์แสงสูงสุด (light-saturated gross photosynthesis, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	ϕ	คือ quantum yield of photosynthesis เป็นค่าแสดงประสิทธิภาพของการใช้แสง
	Θ	คือ convexity เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์
	R_d	คือ การหายใจในที่มืด (dark respiration, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

คำนวณอัตราการสังเคราะห์แสงสูงสุดและค่าการหายใจในที่มืดเมื่อปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปแต่ละวัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการ

สังเคราะห์แสงของใบและความแตกต่างของความดันไอน้ำในใบและบรรยากาศ ดังสมการที่ (2) และความสัมพันธ์ระหว่างการหายใจในที่มืดและอุณหภูมิ ดังสมการที่ (3)

$$P_{max*} = P_{max} (a + bVPD) \quad \text{.....(2)}$$

เมื่อ	P_{max*}	คือ การสังเคราะห์แสงสูงสุดที่ค่าความดันไอน้ำใดๆ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	P_{max}	คือ การสังเคราะห์แสงสูงสุด (light-saturated gross photosynthesis, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	VPD	คือ ความแตกต่างของความดันไอน้ำในใบและบรรยากาศ (vapor pressure difference, kPa)
	a, b	คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์

$$R_{d*} = R_{d0} \left(Q_{10}^{\left(\frac{T_L}{10} \right)} \right) \quad \text{.....(3)}$$

เมื่อ	R_{d*}	คือ การหายใจในที่มืดที่อุณหภูมิใด ๆ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	R_{d0}	คือ ค่าการหายใจในที่มืดเริ่มต้นของความสัมพันธ์ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	Q_{10}	คือ respiratory quotient
	T_L	คือ อุณหภูมิใบ ($^{\circ}\text{C}$)

แบบจำลองการสังเคราะห์แสงของเรือนยอด

ใช้แบบจำลองสำหรับประมาณค่าการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดของ Forseth and Norman (1993) ซึ่งมีสมมุติฐานดังนี้ (1) แสงเป็น

ปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดความผันแปรของการสังเคราะห์แสงของเรือนยอด (2) การตอบสนองของการสังเคราะห์แสงต่อความเข้มแสงขึ้นอยู่กับตำแหน่งของใบที่อยู่ในเรือนยอด และ (3) การกระจายของใบ

ภายในเรือนยอดเป็นแบบสุ่ม (random distribution) โดยใบที่ได้รับแสงเต็มที่ได้รับแสงแบบ direct light และใบที่อยู่ในที่ร่มด้านในเรือนยอดได้รับแสงแบบ diffuse light ทำให้สามารถประมาณค่าอัตราการ

ดูดซึมน้ำของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยพื้นที่ได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการสังเคราะห์แสงเฉลี่ยของใบในแต่ละชั้นเรือนยอด และค่าดัชนีพื้นที่ใบได้ดังนี้

$$P_g = P_{sun}F_{sun} + P_{shade}(F - F_{sun}) \quad \text{-----}(4)$$

เมื่อ	P_g	คือ อัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดต่อหน่วยพื้นที่ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	P_{sun}	คือ อัตราการสังเคราะห์แสงเฉลี่ยของใบที่ได้รับแสงเต็มที่ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	P_{shade}	คือ อัตราการสังเคราะห์แสงเฉลี่ยของใบในที่ร่ม ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	F	คือ ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index) ทั้งหมดของเรือนยอด ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)
	F_{sun}	คือ ดัชนีพื้นที่ใบที่ได้รับแสงเต็มที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$F_{sun} = [1 - \exp(-kF / \cos \theta)] \cos \theta / k \quad \text{-----}(5)$$

เมื่อ	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับแสงของใบในเรือนยอด (foliar absorption coefficient)
	θ	คือ มุมที่ดวงอาทิตย์ทำกับแนวดิ่ง (zenith angle)

ทำการคำนวณอัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเป็นรายวัน รายเดือน และรายปี

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การวัดการตอบสนองของการสังเคราะห์แสงต่อความเข้มแสง

ทำการศึกษาการตอบสนองของการสังเคราะห์แสงต่อความเข้มแสงของพรรณไม้ที่มีความสำคัญทางนิเวศวิทยาของป่าทั้งสองชนิดในป่าดิบแล้งสะแกราชเก็บข้อมูลของตะเถียนหินซึ่งมีความสูงประมาณ 35 เมตร โดยเก็บข้อมูลที่เรือนยอด 2 ระดับคือ (1) ระดับที่ใบได้รับแสงเต็มที่ (ด้านบนสุดของเรือนยอด) หรือ layer 1 และ (2) ใบในที่ร่ม (ประมาณ 5 เมตร จากด้านบนของเรือนยอด) หรือ layer 2 และในป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองเก็บข้อมูลที่เรือนยอด 3 ระดับ ได้แก่

- (1) เรือนยอดของรังที่ความสูง 30 เมตร หรือ layer 1
- (2) เรือนยอดของแดงที่ความสูง 20 เมตร หรือ layer 2 และ (3) เรือนยอดของกาสามปีกที่ความสูง 15 เมตร หรือ layer 3 ในแต่ละชั้นเรือนยอดสุ่มเลือกใบที่เติบโตเต็มที่ (fully-expanded leaf) และมีลักษณะสมบูรณ์จำนวน 5 ใบ ทำการวัดการสังเคราะห์แสงสุทธิของใบด้วยเครื่อง LI-6400 Portable Photosynthesis System (LICOR Inc., USA) โดยใช้ leaf chamber ที่ติดตั้งแหล่งกำเนิดแสง (LED light source) กำหนดความเข้มแสงที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสงที่ระดับความเข้มแสงต่างๆ โดยเก็บข้อมูลในฤดูฝนและฤดูแล้ง ฤดูแล้ง 2 วัน และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของสมการที่ (1) และสมการที่ (3)

การวัดการสังเคราะห์แสงในรอบวัน

วัดการสังเคราะห์แสงสุทธิในรอบวันของพรรณไม้ที่ศึกษาข้างต้น ด้วยเครื่อง LI-6400 Portable Photosynthesis System เช่นเดียวกันแต่เชื่อมต่อกับ leaf chamber มาตรฐาน ที่ใช้ความเข้มแสงตามธรรมชาติ สุ่มเลือกใบตัวอย่างจำนวน 7 ใบต่อชนิด ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 7.00 -17.00 น. ในฤดูฝนและฤดูแล้ง ฤดูละ 2 วัน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการสังเคราะห์แสงและความแตกต่างของความดันไอในใบและบรรยากาศ ดังสมการที่ (2)

การวัดการสังเคราะห์แสงสูงสุด

วัดการสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของพรรณไม้ที่ศึกษาข้างต้น จำนวนใบตัวอย่างชนิดละ 7 ใบ โดยควบคุมระดับความเข้มแสงเท่ากับ $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งเป็นระดับความเข้มแสงที่เกินจุดอิ่มตัวของแสง ทำการวัดทุกๆ เดือน เดือนละ 1 วัน เป็นระยะเวลา 1 ปี (เมษายน 2546 ถึงเดือนมีนาคม 2547)

การเก็บข้อมูลภูมิอากาศ

ติดตั้ง quantum sensor จำนวน 9 ตำแหน่งที่หอคอยทั้งสองแห่ง ตั้งแต่ยอดหอคอยจนถึงที่ระดับ 2 เมตรเหนือพื้นดิน เพื่อเก็บข้อมูลความเข้มแสงในรอบวัน และ sensor อื่นๆ เพื่อวัดอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิใบ ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าความแตกต่างของความดันไอในใบและบรรยากาศ โดยเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เพื่อบันทึกข้อมูลทุกๆ นาที และเฉลี่ยข้อมูล ทุกๆ 30 นาที ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลในช่วงเดือนเมษายน 2546 ถึงเดือนมีนาคม 2549

การเก็บข้อมูลดัชนีพื้นที่ใบ

วิเคราะห์ข้อมูลดัชนีพื้นที่ใบของป่าทั้งสองแห่งทุกเดือนเป็นเวลา 3 ปี (เมษายน 2546 ถึงเดือนมีนาคม 2549) โดยอาศัยข้อมูลความเข้มแสงรายวัน และวิเคราะห์ตามหลักการของแสง ดังสมการที่ (6) โดยแบ่งชั้นเรือนยอดของป่าดิบแล้งสะแกราช และป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองออกเป็น 2 และ 3 ชั้นเรือนยอด ตามลำดับ อาศัยความแตกต่างของความเข้มแสงที่ส่องผ่านเรือนยอด

$$PPFD = PPFD_0 \exp(-kF) \quad \text{.....(6)}$$

เมื่อ	$PPFD$	คือ ความเข้มแสงที่ส่องผ่านเรือนยอดที่ระดับใดๆ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
	$PPFD_0$	คือ ความเข้มแสงด้านบนของเรือนยอด ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
	k	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับแสงของใบในเรือนยอด (foliar absorption coefficient)
	F	คือ ค่าดัชนีพื้นที่ใบของเรือนยอดที่ระดับใดๆ (accumulation of leaf area index, $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$)

การวิเคราะห์ข้อมูลนำเข้าของแบบจำลอง

จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามสามารถจำแนกข้อมูลนำเข้าสำหรับแบบจำลองออกได้เป็น

สองส่วน คือ ส่วนที่ (1) ข้อมูลทางด้านสรีรวิทยา ได้แก่ quantum yield การสังเคราะห์แสงสูงสุด ค่า convexity การหายใจในที่มืด พารามิเตอร์ของความสัมพันธ์

ระหว่างการสังเคราะห์แสงและความแตกต่างของความ
ดันไอในใบและบรรยากาศ และระหว่างการหายใจใน
ที่มีและอุณหภูมิใบ ค่าดัชนีพื้นที่ใบ ค่าสัมประสิทธิ์
ของการดูดซับแสงของใบในเรือนยอด โดยที่พารามิ
เตอร์ทางสรีรวิทยาต่างๆ ที่ใช้ในการประมาณค่าการ

ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของป่าทั้งสองแห่งมี
ความผันแปรตามฤดูกาล (Table 1.) และส่วนที่ (2)
ข้อมูลภูมิอากาศ ได้แก่ ความเข้มแสง อุณหภูมิอากาศ
อุณหภูมิใบ ความชื้นสัมพัทธ์ และค่าความแตกต่าง
ของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศ

Table 1. Physiological parameters of the canopy photosynthesis model for the Sakaerat dry evergreen forest (DEF) and the Maeklong mixed deciduous forest (MDF)

Parameters	DEF	MDF
Leaf area index (F)	2.50 - 3.29	1.46 - 2.38
Foliar absorption coefficient (k)	0.48 - 0.76	0.38 - 0.65
Light-saturated gross photosynthesis (P_{max} , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
Layer 1	5.18 - 14.66	12.01 - 17.29
Layer 2	2.93 - 8.75	12.15 - 14.68
Layer 3	-	12.47 - 15.03
Quantum yield (ϕ)		
Layer 1	0.03 - 0.06	0.03 - 0.05
Layer 2	0.04 - 0.06	0.05 - 0.07
Layer 3	-	0.05 - 0.06
Convexity (Θ)		
Layer 1	0.57 - 0.85	0.58 - 0.81
Layer 2	0.37 - 0.69	0.60 - 0.74
Layer 3	-	0.59 - 0.85
Dark respiration (R_d , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
Layer 1	0.36 - 1.13	0.66 - 0.80
Layer 2	0.30 - 0.67	1.12 - 1.63
Layer 3	-	1.09 - 1.30

Note: ¹ Each parameter, minimum and maximum values of the respective monthly data are presented.

² The DEF and MDF canopies were divided into 2 and 3 layers respectively, according to their vertical light penetrations.

ผลและวิจารณ์

การสังเคราะห์แสงของใบ

จากการประมาณค่าอัตราการสังเคราะห์
แสงสุทธิของใบในรอบวันด้วยแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ พบว่าการสังเคราะห์แสงของใบมี
ความผันแปรในแต่ละวันและตามฤดูกาล เนื่องจาก

ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมและลักษณะทาง
ชีวลักษณะของใบ อัตราการสังเคราะห์แสงของใบมี
ค่าสูงในช่วงฤดูฝนและลดลงในช่วงฤดูแล้ง เนื่องจาก
การขาดน้ำตามฤดูกาล ส่วนใหญ่แล้วตะเกียนหิน
มีอัตราการสังเคราะห์แสงของใบต่ำกว่าพรรณไม้
ในป่าผสมผลัดใบทั้ง 3 ชนิดทั้งในช่วงฤดูฝน
และต้นฤดูแล้ง แต่พรรณไม้ในป่าผสมผลัดใบ

ทั้ง 3 ชนิด มีการทิ้งใบในช่วงฤดูแล้ง (มกราคม-กุมภาพันธ์) ทั้งนี้ลักษณะทางชีวพลักษณ์ของใบที่แตกต่างกันทำให้พรรณไม้ของป่าทั้งสองชนิดมีการตอบสนองทางสรีรวิทยาที่แตกต่างกัน ตะเคียนหิน ซึ่งเป็นไม้ไม่ผลัดใบมีการตอบสนองทางสรีรวิทยาที่เรียกว่า “drought tolerating strategy” โดยพยายามรักษาใบไว้ด้วยการลดการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ โดยการปิดปากใบทำให้กิจกรรมการสังเคราะห์แสงของใบลดลงในช่วงฤดูแล้ง ในขณะที่รังแคงและกาสำปอก ซึ่งเป็นไม้ผลัดใบตอบสนองต่อการขาดน้ำโดยการทิ้งใบ หรือที่เรียกว่า “drought avoiding strategy” โดยใบที่เหลืออยู่ยังคงรักษา กิจกรรมการสังเคราะห์แสงให้อยู่ในระดับสูงได้จนถึงระดับหนึ่ง เมื่อภาวะขาดน้ำยังคงดำเนินต่อไป จะเกิดการทิ้งใบขึ้น (Ishida *et al.*, 2006)

จากผลการศึกษายังพบว่าค่าการสังเคราะห์แสงของใบที่ประเมินได้ส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์แสงของใบรังที่วัดในช่วงฤดูฝน (1 กรกฎาคม 2546) มีอัตราการสังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับความเข้มแสงในช่วงเช้าจนถึงก่อนเที่ยง ภายหลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิใบ และค่าความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลง (Figure 1.) ในขณะที่การสังเคราะห์แสงของใบตะเคียนหินที่วัดในช่วงฤดูแล้ง (24 กุมภาพันธ์ 2547) มีอัตราการสังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับความเข้มแสงในช่วงเช้าก่อน 10.00 น. เท่านั้น ภายหลังจากนั้นเมื่อค่าความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น อัตราการสังเคราะห์แสงเริ่มลดลง (Figure 1.) เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ประเมินได้กับค่าที่วัดได้จริงของพรรณไม้ที่ทำการศึกษาทั้ง 4 ชนิด ในฤดูกาลต่างๆ

พบว่าค่าที่ประเมินได้และค่าที่วัดได้จริงมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าร้อยละ 75 และเป็นที่สังเกตว่าอัตราการสังเคราะห์แสงที่ประเมินได้มีแนวโน้มใกล้เคียงค่าที่วัดจริงมากยิ่งขึ้น เมื่อค่าความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งในช่วงฤดูฝนและฤดูแล้ง จึงอาจพอสรุปในเบื้องต้นได้ว่านอกจากความเข้มแสงแล้ว ค่าความแตกต่างของความดันไอระหว่างใบและบรรยากาศเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของใบและควรนำมาเป็นปัจจัยร่วมในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงของใบของพรรณไม้ในเขตร้อน

การสังเคราะห์แสงและการหายใจของเรือนยอด

การประเมินการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดของป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบ ลุ่มน้ำแม่กลองในช่วง 3 ปี พบว่าอัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าทั้งสองแห่งมีความผันแปรไปในแต่ละเดือนตามการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางสรีรวิทยาของใบ (เช่น การสังเคราะห์แสงของใบ ดัชนีพื้นที่ใบ ค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดซับของใบในเรือนยอด เป็นต้น) และปัจจัยภูมิอากาศ (Figure 2.) โดยอัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าดิบแล้งมีค่าสูงในช่วงกลางฤดูฝนจนถึงปลายฤดูฝน (สิงหาคม - พฤศจิกายน) และมีค่าลดลงอย่างชัดเจน (มากกว่า ร้อยละ 70) ในช่วงฤดูแล้ง ในขณะที่อัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าผสมผลัดใบมีค่าสูงในช่วงกลางฤดูฝนจนถึงปลายฤดูฝนเช่นกัน และมีค่าลดลงในช่วงก่อน ที่ต้นไม้มักจะมีการทิ้งใบ (ธันวาคม - มกราคม) ทั้งนี้ พรรณไม้ในป่าผสมผลัดใบมีระยะการทิ้งใบโดยเฉลี่ยเป็นเวลาประมาณ

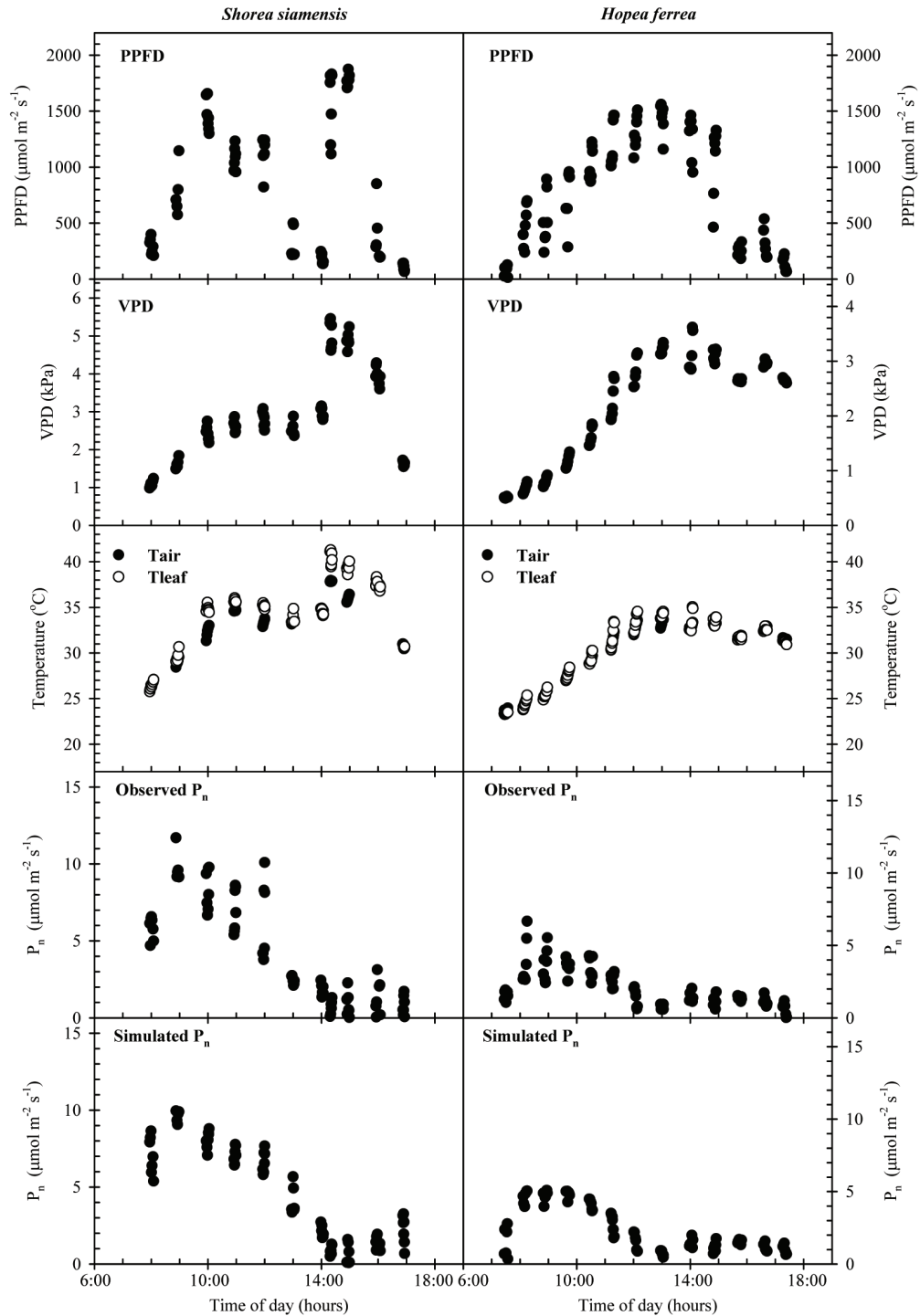


Figure 1. Diurnal courses of photosynthetic photon flux density (PPFD), vapor pressure difference (VPD), air and leaf temperature (T_{air} , T_{leaf}), observed leaf net photosynthesis (observed P_n) and simulated leaf net photosynthesis (simulated P_n) of *Shorea siamensis* and *Hopea ferrea*.

2 เดือน (เดือนกุมภาพันธ์ - มีนาคม) เมื่อเปรียบเทียบอัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าทั้งสองแห่ง พบว่า ป่าดิบแล้งมีอัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันสูงกว่าป่าผสมผลัดใบ โดยมี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.07 และ 20.73 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันตามลำดับ ความแตกต่างนี้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าดัชนีพื้นที่ใบซึ่ง

เป็นตัวแปรที่ บ่งบอกถึงความแตกต่างของลักษณะโครงสร้าง ของเรือนยอดมากกว่าที่จะเป็นผลมาจากความแตกต่างของอัตราการสังเคราะห์แสงของใบ เนื่องจากอัตราการสังเคราะห์แสงของใบของตะเคียนหินมีค่าต่ำกว่าพรรณไม้ที่เป็นตัวแทนของป่าผสมผลัดใบ (Figure 2.)

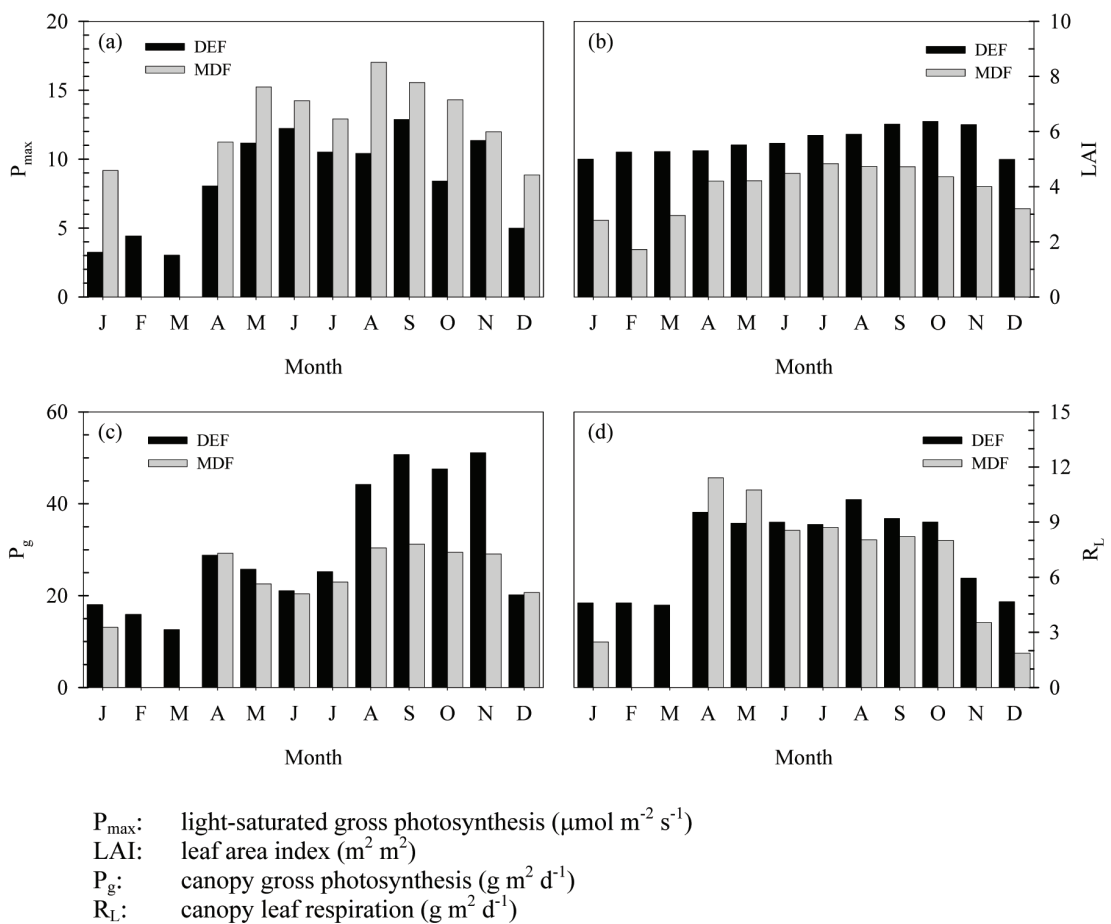


Figure 2. Leaf photosynthesis (a), leaf area index (b), canopy gross photosynthesis (c), and canopy leaf respiration (d) of the Sakaerat dry evergreen forest (DEF) and the Maeklong mixed deciduous forest (MDF). Each column represents monthly mean during April 2003 – March 2004 for leaf photosynthesis and during April 2003 – March 2006 for the others.

นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าดิบแล้งมีค่าสูงกว่าในป่าผสมผลัดใบอย่างชัดเจนในช่วงฤดูฝนทั้งที่อัตราการสังเคราะห์แสงต่อพื้นที่ใบของตะเคียนหินมีค่าต่ำกว่า (Figure 2.) ทั้งนี้ เป็นเพราะในช่วงฤดูฝนปริมาณแสงแบบ diffuse light ซึ่งเป็นแสงที่ส่องผ่านและถูกดูดซับโดยใบที่อยู่ภายในเรือนยอดมีสัดส่วนเป็นจำนวนมากในบรรยากาศทำให้ลักษณะโครงสร้างของเรือนยอด (ค่าดัชนีพื้นที่ใบ) มีอิทธิพลต่ออัตราการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดอย่างชัดเจน ในทางตรงข้ามในช่วงฤดูแล้งปริมาณแสงแบบ direct light ซึ่งเป็นแสงที่ตกกระทบโดยตรงมายังเรือนยอดมีสัดส่วนเป็นจำนวนมากในบรรยากาศ ทำให้ปัจจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของเรือนยอดมีความสำคัญลดลง Utsugi (1999) ได้แนะนำว่า การเรียงตัวของใบเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการประเมินการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดด้วยแบบจำลองที่ใช้ direct light และ diffuse light เพราะทำให้สามารถคำนวณสัดส่วนปริมาณแสงแบบ direct light และ diffuse light ที่ถูกดูดซับโดยเรือนยอดได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้น แต่การศึกษครั้งนี้ไม่ได้นำปัจจัยเรื่องการเรียงตัวของใบมาใช้ในการคำนวณสัดส่วนของปริมาณแสง

แบบจำลองการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดที่ทำการศึกษาในครั้งนี้สามารถประมาณค่าการหายใจของเรือนยอดเฉลี่ยรายวัน โดยพบว่าอัตราการหายใจของเรือนยอดเฉลี่ยรายวันของป่าดิบแล้งมีความแปรผันในแต่ละเดือนน้อยกว่าป่าผสมผลัดใบ ซึ่งมีอัตราการหายใจของใบเฉลี่ยรายวันสูงเมื่อต้นไม้เริ่มผลิใบใหม่ในช่วงเริ่มต้นของฤดูฝน (เดือนเมษายน) มีแนวโน้มลดลงในช่วงปลายฤดูฝน และลดลงอย่างชัดเจนในช่วงก่อนที่ต้นไม้จะเริ่มทิ้งใบ (Figure 2.) สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการที่ต้นไม้มีการทิ้งใบทำให้

ดัชนีพื้นที่ใบลดลง และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการหายใจของใบเฉลี่ยรายวันของป่าทั้งสองแห่ง พบว่าในฤดูฝนอัตราการหายใจของใบมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ช่วงต้นฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-มกราคม) นั้น ป่าดิบแล้งมีอัตราการหายใจของใบสูงกว่าป่าผสมผลัดใบ และเมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยทั้งปีป่าดิบแล้งมีอัตราการหายใจของใบสูงกว่าป่าผสมผลัดใบ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.37 และ 5.92 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันตามลำดับ

สมดุลของคาร์บอนในระดับเรือนยอด

การศึกษาสมดุลคาร์บอนของเรือนยอดในครั้งนี้เปรียบเทียบในรูปของผลผลิตปฐมภูมิรวม (gross primary production, GPP) ซึ่งเป็นปริมาณคาร์บอนทั้งหมดที่เป็นผลผลิตจากการสังเคราะห์แสงของเรือนยอดของต้นไม้ และผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ (net primary production, NPP) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างผลผลิตปฐมภูมิรวมและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยสู่บรรยากาศจากกระบวนการหายใจของพืช (autotrophic respiration, R_A) ได้แก่ การหายใจของใบ และการหายใจของส่วนอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง (non-photosynthetic part) เช่น ลำต้น และราก เป็นต้น ในการศึกษาครั้งนี้ทำการประมาณค่าผลผลิตปฐมภูมิรวมและการหายใจของใบได้โดยตรงจากแบบจำลองการสังเคราะห์แสงของเรือนยอด และประมาณค่าการหายใจของลำต้นและราก (stem and root respiration) จากความสัมพันธ์ของผลผลิตปฐมภูมิรวม (จากการศึกษานี้) และผลผลิตปฐมภูมิสุทธิซึ่งได้จากการศึกษาทางนิเวศวิทยาโดยอาศัยข้อมูลความเพิ่มพูนของมวลชีวภาพและผลผลิตซากพืชของป่าทั้งสองแห่งนี้ที่ศึกษาโดย สาทิสและคณะ (2549) ในช่วงเวลาเดียวกัน

จากการประเมินปริมาณการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมของป่า พบว่าผลผลิตปฐมภูมิรวมของป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสม ผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 109.49 และ 90.57 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 29.86 และ 24.70 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี ตามลำดับ (Table 2.) แสดงให้เห็นว่าป่าดิบแล้งสะแกราชมีศักยภาพในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้มากกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองเกือบร้อยละ

20 ความแตกต่างของศักยภาพในการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวนี้มีสาเหตุมาจากความแตกต่างของค่าดัชนีพื้นที่ใบเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างเรือนยอด และความแตกต่างของลักษณะทางชีวลักษณะของต้นไม้ที่เป็นองค์ประกอบของป่า ทั้งนี้ผลผลิตปฐมภูมิรวมของป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ค่าใกล้เคียงกับผลผลิตปฐมภูมิรวมของป่าดงดิบ (Ciais *et al.*, 2000) และป่าผลัดใบ (ลดาวัลย์, 2547) ที่เคยมีการศึกษาไว้

Table 2. Gross primary production (GPP), autotrophic respiration (R_A) and net primary production (NPP) of the Sakaerat dry evergreen forest (DEF) and the Maeklong mixed deciduous forest (MDF)

CO ₂ exchange parameters	DEF		MDF	
	(t CO ₂ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	(t C ha ⁻¹ yr ⁻¹)	(t CO ₂ ha ⁻¹ yr ⁻¹)	(t C ha ⁻¹ yr ⁻¹)
Gross primary production	109.49	29.86	90.57	24.70
Autotrophic respiration	64.61	17.62	63.73	17.38
Leaf respiration	27.01	7.37	21.70	5.92
Stem and root respiration	37.60	10.26	42.03	11.46
Net primary production¹	44.88	12.24	26.84	7.32

Note: ¹ Derived from Diloksumpun *et al.* (2006).

นอกจากนี้ยังพบว่า ป่าดิบแล้งและป่าผสมผลัดใบมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของใบทั้งหมดเท่ากับ 27.01 และ 21.70 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 7.37 และ 5.92 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการศึกษาการหายใจของลำต้นและรากโดยตรง แต่จากความสัมพันธ์ของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิและการหายใจของใบทำให้ทราบว่าป่าทั้งสองแห่งมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการหายใจของส่วนอื่นๆ

นอกเหนือจากใบ เท่ากับ 64.61 และ 63.73 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 17.62 และ 17.38 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี โดยป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากการหายใจของพืชทั้งหมดเท่ากับ 79.54 และ 75.28 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี หรือคิดเป็นปริมาณคาร์บอนเท่ากับ 21.69 และ 20.53 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี ตามลำดับ ทั้งนี้การหายใจของใบใน ป่าทั้งสองคิดเป็นร้อยละ 41.83 และ 34.06 ของการหายใจทั้งหมด

ของต้นไม้ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากค่าผลผลิตปฐมภูมิสุทธิพบว่าป่าดิบแล้งสะแกราช มีศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากบรรยากาศได้มากกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง นอกจากนี้สภาพดินและคณะ (2549) ทำการ ศึกษาผลผลิตคาร์บอนสุทธิของระบบนิเวศ (net ecosystem production, NEP) ซึ่งเป็นผลผลิตสุทธิที่เหลือจากการหายใจทั้งหมดของระบบนิเวศ (ecosystem respiration) ในป่าทั้งสองแห่งนี้ พบว่าผลผลิตคาร์บอนสุทธิของป่าดิบแล้งมีค่าสูงกว่าของป่าผสมผลัดใบ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าป่าดิบแล้งสะแกราชเป็นแหล่งกักเก็บหรือดูดซับคาร์บอน (carbon sink) ที่มีศักยภาพมากกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. ป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองเป็นป่าที่มีลักษณะ โครงสร้างป่าและโครงสร้างของเรือนยอดแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทำให้เกิดความแตกต่างของสมดุลของคาร์บอนในระดับเรือนยอด โดยป่าดิบแล้งสะแกราชมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากการหายใจของต้นไม้มากกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง แต่ยังคงมีผลผลิตปฐมภูมิสุทธิสูงกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง แสดงให้เห็นว่ามีศักยภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระดับเรือนยอดสูงกว่าป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลอง

2. การประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงของใบของพรรณไม้ในป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าผสมผลัดใบลุ่มน้ำแม่กลองโดยอาศัยความสัมพันธ์ของการสังเคราะห์แสงและความเข้มแสง ร่วมกับค่าความแตกต่างของความดันไอในใบและบรรยากาศ

ให้ความถูกต้องค่อนข้างสูงสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประเมินอัตราการสังเคราะห์แสงของใบของพรรณไม้ในเขตร้อนอื่นต่อไป

3. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของการเรียงตัวของใบในเรือนยอดและค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดซับแสงของใบในเรือนยอดเพิ่มเติมเพื่อนำมาใช้ในการประเมินการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของป่าด้วยแบบจำลองที่ใช้ direct light และ diffuse light ให้ความถูกต้องยิ่งขึ้น

คำนิยาม

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ผู้วิจัยขอขอบคุณ Dr. Moriyoshi Ishizuka และ Dr. Atsushi Ishida ผู้เชี่ยวชาญจาก Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI) แห่งประเทศญี่ปุ่น ที่ให้คำแนะนำในการพัฒนาแบบจำลองการสังเคราะห์แสง และขอขอบคุณคุณสำเร็จ ปานอุทัย หัวหน้าสถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง และ Dr. Minoru Gamo ผู้เชี่ยวชาญจาก National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) แห่งประเทศญี่ปุ่น ที่อนุญาตให้ใช้ข้อมูลภูมิอากาศสำหรับการศึกษานี้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

คูริยะ สถาพร. 2547. ความผันแปรตามฤดูกาลของดัชนีพื้นที่เรือนยอด และอัตราการสังเคราะห์แสงของพรรณไม้เด่นในป่าดิบแล้ง จังหวัดนครราชสีมา และป่าเบญจพรรณ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ประนอม ผาสุข. 2542. ความผันแปรตามฤดูกาลของโครงสร้างเรือนยอดและอัตราการสังเคราะห์แสงของพรรณไม้เด่น 3 ชนิดในป่าเบญจพรรณ จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ลดาวัลย์ พวงจิตร. 2547. สมดุลของคาร์บอนในระบบนิเวศป่าเขตร้อน, น. 156-184. ใน บุญวงศ์ ไทยอุดมสำห์ และลดาวัลย์ พวงจิตร, ผู้รวบรวม. การจัดการระบบนิเวศป่าเขตร้อนแบบผสมผสาน : ประสบการณ์จากสถานีวิจัยลุ่มน้ำแม่กลอง. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

สาพิศ ร้อยอัมแพง. 2545. ลักษณะโครงสร้างของเรือนยอดและความผันแปรของคุณสมบัติของใบที่อยู่ในเรือนยอดของลูกผสมตามธรรมชาติของกระดินเทพาและกระดินณรงค์, น.174-191. ใน รายงานนวนวัฒนวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2545. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, ธิดิ วิสารรัตน์, สำเร้ง ปานอุทัย, ภาณุมาศ ลาดปลาชะ, สิริรัตน์ จันทรมหเสถียร และศุภรัตน์ สำราญ.. 2549. วัฏจักรคาร์บอนในป่าดิบแล้งสะแกราชและป่าเบญจพรรณลุ่มน้ำแม่กลอง, น. 257-275. ใน รวมผลงานวิจัยการศึกษาวัฏจักรคาร์บอนในพื้นที่ป่าไม้. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

Boote, K. J. and R. S. Loomis 1991. The prediction of canopy assimilation, pp.109-139. In: K. J. Boote, and R. S. Loomis, eds. **Modeling Crop Photosynthesis from**

Biochemistry to Canopy. CSSA Special Publication No. 19. CSSA, Madison.

Ciais, P., W. Cramer, P. Jarvis, H. Kheshgi, C. Nobre, S. Semenov and W. Steffen. 2000. Global perspective. In: **IPCC Special on Report Land Use, Land Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press, Cambridge.

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. Bolhàr-Nordenkamp, R.C. Leegood, and S.P. Long, eds. **Photosynthesis and Productivity in a Changing Environment: A Field and Laboratory Manual.** Chapman and Hall, London.

Ishida, A., S. Diloksumpun, P. Ladpala, D. Staporn, S. Panuthai, M. Gamo, K. Yazaki, M. Ishizuka and L. Puangchit. 2006. Contrasting seasonal leaf habits of canopy trees between tropical dry-deciduous and evergreen forests in Thailand. **Tree Physiology** 26: 643-656.

Leuning, R. 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C_3 plants. *Plant, Cell and Environment* 18: 339-355.

Long S. P. and J. -E. Hällgren, 1993. Measurements of CO_2 assimilation by plants in the field and the laboratory, pp. 129-167. In: D. O.

- Hall, J. M. O Scurlock, H. R. Bolh r-Nordenkamp, R. C. Leegood, and S. P. Long, eds. **Photosynthesis and Productivity in a Changing Environment: A Field and Laboratory Manual**. Chapman and Hall, London.
- Rundel, P.W., K. Boonprakob, and M. Patterson. 1995. Photosynthetic response and heat tolerance in dry forest trees at the Sakaerat Environmental Research Station, Thailand, pp. 84-93. *In: Proceeding of the International Workshop on the Changes of Tropical Forest Ecosystems by El Niño and Others*. Kanchanaburi, Thailand, 7-10 February, 1995.
- Utsugi, H. 1999. Angle distribution of foliage in individual *Chamaecyparis obtusa* canopies and effect of angle distribution on diffuse light penetration. **Trees** **14**: 1-9.
-