



วิทยานิพนธ์

ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันระหว่างสายต้นที่ได้จาก
เนื้อเยื่อและต้นที่ได้จากเมล็ด

LEAF PHOTOSYNTHETIC POTENTIAL OF OIL PALM
(*ELAEIS GUINEENSIS* JACQ.) : A COMPARISON BETWEEN
TREES FROM TISSUE CULTURE AND SEED

นายพรชัย ไพบูลย์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2550



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร)

ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันระหว่างสายต้นที่ได้จากเนื้อเยื่อและต้นที่ได้จากเมล็ด

Leaf Photosynthetic Potential of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) : A Comparison between Trees from Tissue Culture and Seed

นางผู้วิจัย นายพรชัย ไพบูลย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์สุนทรี อังษ์ชาวลย์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์สุดเขตต์ นาคะเสถียร, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์สิริกุล วะสี, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์พงศ์เทพ อัครธนกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วันัย อาจคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 05 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันระหว่างสายต้นที่ได้จากเนื้อเยื่อและต้นที่ได้จาก
เมล็ด

Leaf Photosynthetic Potential of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) : A Comparison between
Trees from Tissue Culture and Seed

โดย

นายพรชัย ไพบูลย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร)

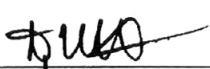
พ.ศ. 2550

พรัช ไพบูลย์ 2550: ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันระหว่างสายต้นที่ได้จากเนื้อเยื่อและต้นที่ได้จากเมล็ด ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร) สาขาเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา ประชานกรรมการที่ปรึกษา: ศาสตราจารย์สุนทรียังษ์ชาวลย์, Ph.D. 85 หน้า

ข้อมูลผลผลิตทะลายสดของปาล์มน้ำมัน บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) เฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2538-2546 ภายใต้สภาพการจัดการและการดูแลเดียวกัน แสดงว่า ผลผลิตมีระดับในช่วง 3-4 ตัน/ไร่ การศึกษานี้ต้องการสร้างข้อมูลด้านศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์ม โดยเลือกตัวอย่างจากสายต้น (clone) ที่ให้ผลผลิตสูง (Hi) ปานกลาง (Me) และต่ำ (Lo) และต้นที่ขยายพันธุ์จากเมล็ด (Sd, นำเข้าจากประเทศออสเตรเลีย) ต้นมีอายุ 14 ปี พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์และครรชนิกความเขียว ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII (Φ_{dark}) เส้นตอบสนองต่อแสง จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (Γ) และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (g_m) ของใบย่อยของทางใบที่ 13 และ 17 (นับจากใบยอดที่คลี่เต็มที่)

ปริมาณคลอโรฟิลล์และครรชนิกความเขียวของใบปาล์มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ทางใบที่ 1 และมีค่าสูงคงที่เมื่อถึงทางใบที่ 9 โดยมีค่าคลอโรฟิลล์รวมสูงสุด 1.2 g m^{-2} สัดส่วนระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อปีมีค่าอยู่ในช่วง 2.64 – 3.99 ค่าที่ต่ำกว่า 3 แสดงว่า ใบปาล์มเริ่มถูกบดบังแสงจากใบด้านบนตั้งแต่ทางใบที่ 25-30 เป็นต้นไป วัดศักยภาพการตอบสนองต่อแสงโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนแก๊ส กำหนดให้อากาศภายในกล่องบรรจุใบมีอุณหภูมิ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ 75-80% แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air}) ไม่เกิน 1 kPa เพื่อให้ปากใบเปิดได้เต็มที่ พบว่า ค่า Φ_{dark} ของใบปาล์มแต่ละตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันอยู่ในช่วง 0.80-0.83 กระบวนการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มถูกจำกัดเมื่อความเข้มแสงต่ำกว่า $1300 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ใบของสายต้น Hi มีศักยภาพการสังเคราะห์แสงสูงสุด พิจารณาจากค่านำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s, \text{max}}$) มีค่า $218 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (J_{max}) มีค่าอยู่ในช่วง $158-189 \mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ จึงส่งผลให้อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (P_m) ของใบสายต้น Hi มีค่าอยู่ในช่วง $20.3-22.5 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ในขณะที่สายต้น Lo มีศักยภาพการสังเคราะห์แสงต่ำสุด โดยมีค่า $g_{s, \text{max}}$ $135 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่า J_{max} $114-152 \mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ P_m $13.3-18.7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ในขณะที่กระบวนการด้าน carboxylation ช่วงของค่า Γ เท่ากับ $56-78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ และค่า g_m $60-106 \text{ mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ พารามิเตอร์ของศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันที่ได้ ทำให้กล่าวได้ว่าใบปาล์มน้ำมันมีอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิที่สูงมากเมื่อเทียบกับไม้ผลยืนต้น และมีความแตกต่างกันระหว่างตัวอย่างที่มีระดับผลผลิตทะลายสดต่างกัน

พรัช ไพบูลย์
ลายมือชื่อนิติ


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

29 / พค / 2550

Pornchai Paiboon 2007: Leaf Photosynthetic Potential of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) :
A Comparison between Trees from Tissue Culture and Seed. Master of Science (Agricultural
Biotechnology), Major Field: Agricultural Biotechnology, Interdisciplinary Graduate Program.
Thesis Advisor: Professor Suntaree Yingjajaval, Ph.D. 85 pages.

The fresh fruit bunch yield of oil palm of Chumporn Palm Oil Industry Public Company Limited, averaged during 1995-2003, ranged from 18.7-25.0 ton ha⁻¹ under the same management. This study wants to acquire data on photosynthesis capacity of oil palm, with the above materials selected based on their yields, namely, 3 clones of high (Hi), medium (Me) and low (Lo) and one seed line from Costa Rica (Sd). The trees are 14 years old. Parameters obtained from leaflets of fronds 13 and 17 include chlorophyll content and SPAD index, PSII quantum efficiency, light response, CO₂ compensation (Γ) and mesophyll conductance (g_m).

The chlorophyll content and SPAD index increase rapidly from the 1st frond and reach the plateau in the 9th frond. The maximum total chlorophyll content is 1.2 g m⁻². The ratio of chlorophyll a:b varies from 2.64-3.99. The 25th to 30th fronds with the ratio of less than 3 indicate that the fronds are shaded by the canopy. The photosynthesis potential is evaluated using gas exchange measurement system with the leaf chamber maintained at 28C, RH 75-80% and air vapor pressure deficit (VPD_{air}) not over 1 kPa to maximize stomatal opening. The maximum quantum efficiency (Φ_{dark}) is not different among the lines, being 0.80-0.83. Net photosynthesis rate is found to be limited by radiation of less than 1300 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Clone Hi has the best performance with the highest gross photosynthesis rate (P_m) of 20.3-22.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, resulting from having the highest stomatal conductance ($g_{s, max}$) of 218 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ and the highest rate of linear whole-chain electron transport (J_{max}) in the range of 158-189 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$. The clone Lo has the lowest capacity with P_m of 13.3-18.7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $g_{s, max}$ 135 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ and J_{max} 114-152 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$. On the carboxylation process of oil palm, the Γ is in the range of 56-78 $\mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{air}$ and g_m 60-106 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹. All the parameters show that oil palm has a high assimilation rate in comparison with other fruit trees and the high photosynthesis capacity is one of the factors contributing to the corresponding high yield.

Pornchai Paiboon

Student's signature

S. Yingjajaval

Thesis Advisor's signature

29 May 2007

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ ศ.ดร.สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้
สละเวลาให้คำปรึกษาและแนวทางในการเรียน การค้นคว้าวิจัย การตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จ
สมบูรณ์ ตลอดจนข้อเตือนใจในแนวทางการดำเนินชีวิต

กราบขอบพระคุณ ดร. สุตเขตต์ นาคะเสถียร กรรมการวิชาเอก ดร. สิริกุล วัชรี กรรมการ
วิชาการ ที่สละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้อง
สมบูรณ์ขึ้น และ รศ.ดร. รวี เสฐฐภักดี ผู้แทนบัณฑิต ที่ได้ให้คำแนะนำ และมีส่วนร่วมในการแก้ไข
วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ที่ได้ช่วยเหลือและ
สนับสนุนในด้านงบประมาณ สถานที่ และบุคลากร ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้
ด้วยดี บริษัท สยามฟอเรสทรี จำกัด ที่อนุเคราะห์ให้ยืมนั่งร้านเพื่อใช้ในการงานวิจัย ศูนย์เทคโนโลยี
ชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่อนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและ
อุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย ขอขอบคุณ ขอบใจ รุ่นพี่ รุ่นน้อง สมาชิกห้องปฏิบัติการนิเวศ-สรีรวิทยา
พืช ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร ในคำแนะนำ ความช่วยเหลือทั้งร่างกายและใจ สุดท้าย กราบ
ขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่ให้โอกาสในการศึกษาต่อระดับปริญญาโท
คอยสนับสนุน และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร โดยงบประมาณของ
โครงการย่อยบัณฑิตศึกษาและวิจัย สาขาเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร ภายใต้โครงการบัณฑิตศึกษา
และวิจัย สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

พรชัย ไพบูลย์
มีนาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	16
ผลและวิจารณ์	25
สรุป	75
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	76
ภาคผนวก	81
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1	ความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งระหว่างดัชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มน้ำมัน (Chl a = ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ, Chl b = ปริมาณคลอโรฟิลล์บี, Total Chl = ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด หน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร และ SPAD = ดัชนีความเขียว) ความสัมพันธ์ได้จากการวิเคราะห์ใบย่อย 1 ใบของแต่ละทางใบ ตั้งแต่ทางใบที่ 1 ถึงทางใบสุดท้าย (40-42 ทางใบ) ของแต่ละสายต้น
2	พื้นที่ใบทั้งหมดของแต่ละทางใบ (Area, m²) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ในหน่วย กรัมต่อตารางเมตร (g m⁻²) ของใบที่ได้จากทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ในแต่ละสายต้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในทางใบในหน่วยกรัม (g) เป็นผลคูณของพื้นที่ใบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อพื้นที่ใบ ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย±SE ที่ได้จากใบย่อยที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของทางใบจำนวน 3 ใบ จาก 1 ต้น, % คือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัมของทางใบที่ 17 เมื่อเทียบกับทางใบที่ 13
3	ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII (Φ_{dark}) ของใบปาล์มในทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 2 ชั่วโมง

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
4	พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น P_m คือ อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด, α คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์, θ คือ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ, I_c คือ ความเข้มแสงขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์, I_s คือ ความเข้มแสงที่ทำให้้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าสูงสุด, R_d คือ อัตราหายใจในความมืด และ $g_{s, max}$ คือค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำที่มีค่าสูงสุดขณะวัดการตอบสนองต่อแสง แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย$\pm$SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	43
5	พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น P_m คือ อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด, α คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์, θ คือ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ, I_c คือ ความเข้มแสงขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์, I_s คือ ความเข้มแสงที่ทำให้้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าสูงสุด, R_d คือ อัตราหายใจในความมืด และ $g_{s, max}$ คือค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำที่มีค่าสูงสุดขณะวัดการตอบสนองต่อแสง แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย$\pm$SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	45

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
6	พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น J_{max} คือ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ และ α_j คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย$\pm$SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	59
7	พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น J_{max} คือ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ และ α_j คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย$\pm$SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	60
8	พารามิเตอร์จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของใบปาล์ม ค่า dA/dJ คือความชันของเส้นกราฟ A-intercept คือ จุดตัดแกน A เมื่อ J มีค่าเท่ากับ 0 แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย$\pm$SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	64

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
9	พารามิเตอร์จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของใบปาล์ม ค่า dA/dJ คือความชันของเส้นกราฟ A-intercept คือ จุดตัดแกน A เมื่อ J มีค่าเท่ากับ 0 แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	65
10	พารามิเตอร์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบของใบปาล์ม Γ คือ จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และ g_m คือ ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	72
11	พารามิเตอร์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบของใบปาล์ม Γ คือ จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และ g_m คือ ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ	73
ตารางผนวกที่		
1	อัตราการเติบโตของต้นปาล์มน้ำมัน	82
2	อัตราสร้างผลผลิตปาล์มน้ำมัน	82

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ของใบปาล์ม a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd	26
2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเขียว (SPAD) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ตามลำดับของทางใบ แสดงแยกตามสายต้น a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd	28
3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับของทางใบปาล์มทั้ง 4 สายต้น แสดงแยกตามชนิดของคลอโรฟิลล์ a) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ b) ปริมาณคลอโรฟิลล์บี c) ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และ d) สัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี	29
4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส a) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ b) อัตราคายน้ำ c) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และ d) ค่าน้ำไหลปากใบสำหรับไอน้ำของใบปาล์มในทางใบที่ 13 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	41
5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส a) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ b) อัตราคายน้ำ c) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และ d) ค่าน้ำไหลปากใบสำหรับไอน้ำของใบปาล์มในทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	42
6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับค่าน้ำไหลปากใบสำหรับไอน้ำในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) และอัตราคายน้ำกับค่าน้ำไหลปากใบสำหรับไอน้ำในทางใบที่ 13 (c) และทางใบที่ 17 (d) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน a) ทางใบที่ 13 และ b) ทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	52
8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	53
9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน a) ทางใบที่ 13 และ b) ทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	56
10	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ ในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	63
11	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) และความสัมพันธ์ระหว่างจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าน้ำไหลเมสโซฟิลล์ในทางใบที่ 13 (c) และทางใบที่ 17 (d) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
1 ต้นปาล์มน้ำมัน สายต้น Hi	83
2 ต้นปาล์มน้ำมัน สายต้น Me	83
3 ต้นปาล์มน้ำมัน สายต้น Lo	84
4 ต้นปาล์มน้ำมันที่ปลูกด้วยเมล็ด (ต้น Sd)	84

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
A	Leaf net CO ₂ assimilation/Leaf net photosynthetic rate	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
A _{max}	Maximum leaf net CO ₂ assimilation/maximum leaf net photosynthetic rate	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
A/E	Ratio of leaf net photosynthetic rate to leaf transpiration rate (water use efficiency)	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$
Chl a	Chlorophyll a content	g m^{-2}
Chl b	Chlorophyll b content	g m^{-2}
Chl a:b	Ratio of Chl a to Chl b	fraction
Ci	Intercellular CO ₂ concentration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$
Ci/Ca	Ratio of intercellular to air CO ₂ concentration	fraction
CO ₂ R	Air (Reference cell) CO ₂ concentration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$
CO ₂ S	Leaf chamber (Sample cell) CO ₂ concentration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$
E	Leaf transpiration rate	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
F _m	Maximal fluorescence in dark-adapted leaf, all PSII closed	relative
F _m '	Maximal fluorescence in illuminated leaf, , all PSII closed	relative
F _o	Minimal fluorescence in dark-adapted leaf, all PSII open	relative
F _s	Steady-state fluorescence at any light level, some PSII closed	relative
F _v	Variable fluorescence in dark-adapted leaf, $F_v = F_m - F_o$, caused by closure of PSII due to saturating flash in darkness	relative
g _m	Mesophyll conductance; Carboxylation efficiency	$\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
g _s	Stomatal conductance	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
g _{s, max}	Maximum stomatal conductance	$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Ic	Light compensation point	$\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Is	Light saturation point	$\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
J	Rate of linear whole-chain electron transport	$\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
J _{max}	Maximum rate of linear whole-chain electron transport	$\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
LHCII	Light harvesting complex of Photosystem II	
P	Leaf gross photosynthetic rate	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
P_m	Maximum leaf gross photosynthetic rate	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
PPF	Photosynthetic photon flux	$\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
PSII	Photosystem II	
R_d	Dark respiration	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
RH	Relative humidity	%
RH_R	Reference relative humidity	%
RH_S	Sample relative humidity	%
r_d	CO ₂ diffusion resistance	s m^{-1}
r_x	Carboxylation resistance	s m^{-1}
VPD_{air}	Air vapor pressure deficit	kPa
$\text{VPD}_{\text{leaf-air}}$	Leaf to air vapor pressure deficit	kPa
T_{air}	Air temperature inside leaf chamber	C
T_{leaf}	Leaf temperature	C
Total Chl	Total chlorophyll content	g m^{-2}
α	Maximum quantum efficiency of CO ₂ assimilation	$\text{mol CO}_2 \text{ mol PPF}^{-1}$
α_j	Maximum quantum efficiency of linear whole-chain electron transport	$\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$
θ	Curvature factor	fraction
θ_j	Curvature factor	fraction
Φ_{dark}	Maximum quantum efficiency of PSII electron transport in dark adapted leaf, $\Phi_{\text{dark}} = F_v/F_m$	fraction
Φ_{PSII}	Quantum efficiency of PSII electron transport in illuminated leaf, $\Phi_{\text{PSII}} = (F_m' - F_s)/F_m'$	fraction
Γ	CO ₂ compensation point	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$

ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันระหว่างสายต้นที่ได้จากเนื้อเยื่อและต้นที่ได้จากเมล็ด

Leaf Photosynthetic Potential of Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) :

A Comparison between Trees from Tissue Culture and Seed

คำนำ

ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม และเป็นน้ำมันที่มีคุณค่าทางโภชนาการ เนื่องจากประกอบ ด้วยกรดไขมันหลายชนิด อุดมด้วยวิตามินเอและวิตามินอี น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่เหมาะสมในการประกอบอาหารประเภททอด นอกจากนี้น้ำมันปาล์มที่สกัดได้ยังเป็นวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมของว่างและขนมขบเคี้ยว อุตสาหกรรมนมข้นหวานและนมจืด อุตสาหกรรมครีมเทียม อุตสาหกรรมเนยขาวและเนยเทียม อุตสาหกรรมสบู่ และอุตสาหกรรมเพื่อการอุปโภคอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมพลาสติก เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น ยางรถยนต์ เป็นต้น ตลอดจนใช้เป็นส่วนผสมของน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนของประเทศ เมื่ออุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้มีการขยายตัวมากขึ้น ความต้องการใช้น้ำมันปาล์มในการผลิตก็เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ในปี พ.ศ. 2547 รัฐบาลได้กำหนดยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันระยะ 25 ปี (ปี 2547-2572) เพื่อมุ่งสู่การเป็นผู้ผลิตและส่งออกน้ำมันปาล์มเคียงคู่ผู้นำระดับโลก อย่างมาเลเซียและอินโดนีเซีย รวมทั้งนโยบายกำหนดให้ปาล์มน้ำมันเป็นแหล่งพลังงานทดแทนของประเทศ โดยตั้งเป้าหมายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั่วประเทศ ซึ่งมีพื้นที่ปลูกประมาณ 2.04 ล้านไร่ในปัจจุบัน ให้ได้ 10 ล้านไร่ในปี 2572 โดยจะส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดีในเขตนาร้าง ไร่ร้าง ปลูกทดแทนต้นปาล์มน้ำมันที่มีอายุมากซึ่งให้ผลตอบแทนไม่คุ้มค่า ตลอดจนปลูกทดแทนยางพาราในพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมต่อการปลูกยางพารา ปัญหาสำคัญของอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันไทยในปัจจุบัน คือ การขาดแคลนพันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ดี ซึ่งเป็นปัญหาอุปสรรคขั้นพื้นฐานประการหนึ่ง เพราะส่งผลต่อการได้ผลผลิตทะลาย (fresh fruit bunch, FFB, yield) และเปอร์เซ็นต์น้ำมัน (oil yield) ในช่วงที่ผ่านมาเมล็ดพันธุ์ที่เกษตรกรใช้ปลูกเกือบทั้งหมดต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ เช่น ประเทศปาปัวนิวกินี คอสตาริกา ซาอีร์ อินโดนีเซียและมาเลเซีย ซึ่งไม่มีการทดสอบความสามารถในการปรับตัวเข้ากับ

สภาพแวดล้อมของไทยมาก่อน รูปแบบการนำเข้าเมล็ดพันธุ์มีทั้งที่ดำเนินการอย่างถูกต้องและไม่ถูกต้องตามกฎหมาย ก่อให้เกิดปัญหาการปลอมปนของเมล็ดพันธุ์ขึ้น เกษตรกรส่วนหนึ่งได้เก็บเมล็ดปาล์มน้ำมันที่ร่วงหล่นใต้ต้นปาล์มพันธุ์ดีไปปลูกต่อ ทำให้เกิดปัญหาการแยกตัวของยีนที่ควบคุมความหนาของกะลาขึ้น อีกทั้งยังขาดการจัดการและการดูแลสวนที่ดี เป็นผลให้ผลผลิตต่อไร่และเปอร์เซ็นต์การให้น้ำมันต่ำ ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตปาล์มน้ำมันของไทย โดยทำให้มีระดับสูงกว่ามาเลเซียเกือบเท่าตัว ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มของไทยมีน้อยมากเมื่อเทียบกับมาเลเซียและอินโดนีเซีย โดยผลิตได้เพียง 0.69 ล้านตัน ขณะที่มาเลเซียและอินโดนีเซียผลิตได้ถึง 15.0 และ 14.1 ล้านตัน ในปี 2548 ตามลำดับ (Food and Agriculture Organization [FAO], 2007) นอกจากนี้ ประเทศไทยยังขาดองค์ความรู้ บุคลากร หน่วยงาน ตลอดจนแหล่งเงินทุนสนับสนุนงานวิจัยในด้านต่างๆ ที่จะเข้ามารองรับแผนยุทธศาสตร์อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน เช่น การศึกษาข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาของปาล์มน้ำมัน การศึกษาความเหมาะสมของพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ การปรับปรุงและการผลิตพันธุ์ปาล์มน้ำมันที่มีคุณภาพ เป็นต้น

จากข้อมูลผลผลิตเฉลี่ย (ตัน/ไร่) ในช่วงปี พ.ศ. 2538-2546 ของปาล์มน้ำมันที่ได้จากเนื้อเยื่อและเมล็ดของบริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ภายใต้สภาพการจัดการและการดูแลเดียวกัน พบว่า ผลผลิตทะลายสดเฉลี่ยของปาล์มน้ำมันหลายสายต้นสูงกว่าต้นที่ขยายพันธุ์จากเมล็ดอย่างชัดเจน จึงเป็นที่มาของคำถามว่า ทำไมผลผลิตเฉลี่ยของปาล์มน้ำมันที่ได้จากเนื้อเยื่อและเมล็ดถึงแตกต่างกัน ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มเป็นปัจจัยต่อการให้ผลผลิตที่แตกต่างกันระหว่างสายต้นหรือไม่ อย่างไร ซึ่งจะเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับใช้ในแผนการปรับปรุงพันธุ์ต่อไปได้

วัตถุประสงค์

ประเมินศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันของต้นที่เติบโตจากเนื้อเยื่อและเมล็ด เพื่อพิจารณาว่าเป็นปัจจัยต่อการให้ผลผลิตที่แตกต่างกันระหว่างสายต้นอย่างไร และสร้างฐานข้อมูลด้านสรีรวิทยาประจำสายต้นปาล์มน้ำมัน พารามิเตอร์ที่ศึกษาเปรียบเทียบ ได้แก่

1. ธรรมชาติความเขียวของใบและปริมาณคลอโรฟิลล์ (Leaf SPAD index and chlorophyll content)
2. ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ Photosystem II (quantum efficiency) โดยวัดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (Chlorophyll fluorescence)
3. เส้นตอบสนองต่อแสง (Light response function)
4. จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (CO_2 compensation and mesophyll conductance)

การตรวจเอกสาร

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) จัดอยู่ในวงศ์ปาล์ม (Palmae หรือปัจจุบันเปลี่ยนเป็น Arecaceae) มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา แถบบริเวณชายฝั่งตะวันตกและตอนกลางของทวีป ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นพุ่มข้ามอายุยาว มีโครโมโซม 16 คู่ (diploid number, $2n=32$) ให้ผลผลิตทะลายตลอดทั้งปี พื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันส่วนใหญ่ของประเทศไทยอยู่ทางภาคใต้ของประเทศ ได้แก่ จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล และตรัง เป็นต้น ปัจจุบันมีการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันไปยังภาคกลาง เช่น จังหวัดชลบุรี ภาคตะวันออก เช่น จังหวัดระยอง จันทบุรี และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น จังหวัดสระแก้ว เป็นต้น

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

รายละเอียดทางพฤกษศาสตร์และการดูแล มีการรวบรวมเสนอในหนังสือ The Oil Palm (Corley, 2003)

1. ระบบราก

มีระบบรากแบบรากฝอย ประกอบด้วยรากชุดต่างๆ ประมาณ 4 ชุด รากชุดแรกที่อยู่ในระดับแนวนอนยาว 3-4 เมตรจากต้น ส่วนที่อยู่ในระดับแนวตั้งยาว 1-2 เมตรจากผิวดิน รากชุดที่สอง สาม และสี่ จะเกิดเรียงตามลำดับ โดยทั่วไปรากจะเกิดมากและสามารถดูดซับน้ำและธาตุอาหารได้ดีที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 30-50 เซนติเมตร

2. ลำต้น

มีลำต้นตั้งตรง ไม่มีกิ่งแขนง ประกอบด้วยข้อและปล้องที่ถี่มาก แต่ละข้อมีหนึ่งทางใบเกิดเวียนรอบลำต้น การเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมันในช่วง 2-3 ปีแรก จะเข้าไปในด้านกว้าง หลังจากนั้นจึงมีการเจริญทางด้านความสูง ประมาณ 25-50 เซนติเมตร ต่อปี ต้นปาล์มที่แก่มาก (อายุมากกว่า 20 ปี) อาจมีความสูงถึง 15-18 เมตร มีเนื้อเยื่อเจริญเฉพาะตรงปลายยอดของลำต้น ซึ่งมีจุดกำเนิดตาใบอยู่มาก

3. ทางใบ

ทางใบประกอบด้วย แกนทางใบ (rachis) ก้านใบ (petiole) และใบย่อย (leaflet) ซึ่งเกิดจากการพัฒนาของเนื้อเยื่อเจริญปลายยอดของลำต้น บริเวณดังกล่าวมีจุดกำเนิดตาใบอยู่มาก ปาล์มน้ำมันมีอัตราการสร้างทางใบต่ำ ในช่วงอายุ 2-4 ปีหลังจากปลูกลงแปลง ปาล์มน้ำมันจะมีการสร้างทางใบ 30-40 ทางใบต่อปี หลังจากนั้น อัตราการสร้างทางใบจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามอายุ และจะเริ่มคงที่ในช่วงอายุ 8-12 ปี โดยมีอัตราการสร้างทางใบ 20-25 ทางใบต่อปี (Corley and Tinker, 2003) ในแต่ละทางใบประกอบด้วยใบย่อยประมาณ 250-300 ใบ การเก็บตัวอย่างใบในการวิเคราะห์ธาตุอาหารเพื่อใช้อ้างอิงในการแนะนำการใช้ปุ๋ยในปาล์มน้ำมัน จะเลือกเก็บตัวอย่างใบจากทางใบที่ 17 เนื่องจากพบว่าปริมาณธาตุอาหารในใบจากทางใบที่ 17 มีความสัมพันธ์กับผลผลิตทะลายน้ำมันของปาล์มน้ำมันมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบปาล์มที่เก็บจากทางใบอื่นๆ (Corley, 2003)

4. ช่อดอก

ช่อดอกของปาล์มน้ำมันเกิดจากตาดอกที่อยู่บริเวณซอกทางใบที่ติดกับดิน การพัฒนาของช่อดอกตั้งแต่ระยะตาดอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยวทะลายน้ำมันได้ ใช้ระยะเวลานานประมาณ 42 เดือนหรือประมาณ 3 ปีครึ่ง ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว มีปัจจัยสภาพแวดล้อมเข้ามาเกี่ยวข้องกับการสร้างผลผลิตทะลายน้ำมันหลายปัจจัย เช่น ปริมาณและการกระจายตัวของฝน อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ จำนวนชั่วโมงที่ได้รับแสงในแต่ละวัน เป็นต้น ปัจจัยดังกล่าวมีผลอย่างมากต่อการกำหนดเพศ การพัฒนาและการฝ่อของช่อดอก การผสมติด และการสร้างผลผลิตทะลายน้ำมันของปาล์มน้ำมัน (Chan, 1999) โดยช่อดอกที่เกิดขึ้นมีโอกาสที่จะเกิดเป็นช่อดอกเพศผู้ ช่อดอกเพศเมีย หรือช่อดอกแบบกระเทย คือมีทั้งดอกเพศผู้และดอกเพศเมียอยู่ในช่อดอกเดียวกันก็ได้ สัดส่วนเพศของช่อดอกมีความสำคัญต่อการกำหนดจำนวนทะลายน้ำมัน

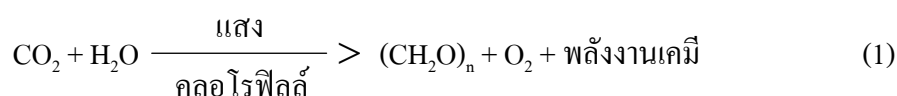
5. ผลและเมล็ด

การพัฒนาของผลปาล์มเกิดขึ้นหลังจากที่ช่อดอกตัวเมียได้รับการผสมกับเกสรตัวผู้เรียบร้อยแล้ว และผลปาล์มในทะลายจะเริ่มสุกพร้อมเก็บเกี่ยวได้ประมาณ 4.5-6 เดือนหลังจากวันผสมเกสร การสุกของผลจะเริ่มจากฐานช่อดอกขึ้นมา ผลปาล์มน้ำมันจัดเป็นผลที่มีเมล็ดแข็ง

(drupe) ประกอบด้วยเปลือกผลชั้นนอก (exocarp) เนื้อผลชั้นนอก (mesocarp) ซึ่งเป็นส่วนที่มีน้ำมันอยู่ ชั้นในสุดเป็นกะลา (endocarp) ถัดจากกะลา เป็นส่วนของเมล็ด ซึ่งประกอบด้วยเนื้อในเมล็ด (kernel) ซึ่งมีน้ำมันอยู่เช่นกัน และส่วนของคัพภะ (embryo) ปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตทะลายตลอดทั้งปี โดยเริ่มให้ผลผลิตทะลายตั้งแต่ปาล์มมีอายุประมาณ 2 ปีครึ่งหลังจากปลูกลงแปลง และสามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทะลายได้นานกว่า 25 ปี ต้นปาล์มที่มีอายุน้อยจะมีจำนวนทะลาย (bunch number) ต่อดัน ต่อบี มาก โดยมีจำนวนทะลายสูงสุดในช่วงอายุ 6-10 ปี แต่มีน้ำหนักทะลายปาล์ม (bunch weight) น้อย เมื่อต้นปาล์มมีอายุมากขึ้น จำนวนทะลายจะลดลง แต่มีน้ำหนักทะลายเพิ่มขึ้น

ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของพืช

การสังเคราะห์แสง เป็นกระบวนการสำคัญที่พืชสีเขียวนำพลังงานแสงเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการสร้างอาหารจากโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ไปเป็นคาร์โบไฮเดรต คือ แป้งและน้ำตาล รวมทั้งมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมา ดังสมการ



กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน มีหลายขั้นตอนและเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีในรูปของ ATP และรีดิวซ์เอเจนท์ในรูป NADPH การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาภายนอกผ่านปากใบเข้าไปยังศูนย์กลางการสังเคราะห์แสงในคลอโรพลาสต์ของพืช กระบวนการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์โบไฮเดรตโดยใช้พลังงานเคมีในรูปของ ATP และ NADPH ตลอดจนกระบวนการขนย้ายคาร์โบไฮเดรตที่สังเคราะห์ขึ้นได้ไปสะสมยังส่วนต่างๆ (sink) ของพืช พืชที่มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูง ย่อมจะต้องมีระบบการลำเลียงและการถ่ายทอดที่สังเคราะห์ขึ้นได้ดีด้วย

พืชแต่ละชนิดมีศักยภาพในการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกัน หรือแม้แต่พืชชนิดเดียวกัน แต่คนละสายพันธุ์ ก็อาจมีศักยภาพในการสังเคราะห์แสงที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปัจจัยที่เกี่ยวกับพืชเอง เช่น ลักษณะทางพันธุกรรม อายุและตำแหน่งใบ ลักษณะเรือนพุ่ม และปัจจัยแวดล้อม เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำในดิน (soil water content) ธาตุอาหารในดินและในพืช เป็นต้น การประเมินศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมันในครั้ง

นี้จะศึกษากระบวนการสังเคราะห์แสงทั้งระบบ ตั้งแต่การประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สัมพันธ์กับค่าดัชนีความเขียวของใบ ประเมินประสิทธิภาพการใช้แสง (light reaction) และอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ โดยศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงและคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ และประเมินประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 reduction) โดยการศึกษาจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์และก่าน้ำไหลเมสโซฟิลล์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. ปริมาณคลอโรฟิลล์และดัชนีความเขียวของใบ (chlorophyll content and Leaf SPAD index)

ส่วนสีเขียวของพืชจะมีคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี เป็นสารสี (pigment) ที่ทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานแสง พืชแต่ละชนิดจะมีการสร้างคลอโรฟิลล์ในใบในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะสร้างในปริมาณเท่าที่จำเป็นต้องใช้ (สุนทรี และคณะ, 2543ก) ในขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ต่ำกว่าปกติ เป็นตัวบ่งชี้ที่ดีถึงสภาวะการขาดธาตุไนโตรเจน และธาตุอาหารที่เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เช่น แมกนีเซียม (Mg) การที่สามารถประเมินเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องทำลายใบ (non-destructive method) เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ในห้องปฏิบัติการ จะช่วยในการตรวจสอบสภาพต้นว่ามีความสมบูรณ์เพียงใด อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องมีข้อมูลเบื้องต้นเพียงพอที่จะทราบความสัมพันธ์ก่อนว่า แต่ละพันธุ์ ภายใต้สภาพการดูแลหนึ่งๆ และที่อายุต่างๆ ควรมีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ระดับอ้างอิงเท่าใด โดยประเมินความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ

ดัชนีความเขียว (SPAD index) ของใบ สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง portable chlorophyll meter รุ่น SPAD-502 ของบริษัท Minolta Camera ประเทศญี่ปุ่น ตัวเครื่องมีหัววัดที่ใช้หนีบใบ มีจุดให้แสงจากขาของหัวหนีบด้านล่าง แสงที่ให้มี 2 ช่วงคลื่น คือ ช่วงคลื่นที่ 650 นาโนเมตร (red LED) เป็นช่วงคลื่นที่คลอโรฟิลล์สามารถดูดกลืนได้ และอีกช่วงคลื่นหนึ่งที่ 940 นาโนเมตร (infrared LED) ซึ่งใช้เป็นตัวตรวจเทียบภายในของเครื่อง โดยที่ขาหนีบด้านบนมีหัว ตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านใบ (transparency light) จากนั้นเครื่องจะคำนวณดัชนีความเขียวของใบ โดยอาศัยหลักการดูดกลืนแสงของใบพืช ซึ่งค่านี้ผันแปรกับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืช (Anonymous, 1989) ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืช สามารถสกัดได้ด้วยสารละลาย DMF (N,N-Dimethylformamide) และวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่สกัดได้ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) คำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ตามวิธีของ Moran (1982)

2. เส้นตอบสนองต่อแสง (Light response function)

เส้นตอบสนองต่อแสง เป็นเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสง (photosynthetic photon flux, PPF) กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) ของใบ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการอธิบายประสิทธิภาพการใช้แสง ภายใต้สภาพอ้างอิงหนึ่งๆ ของพืชได้ (สุนทรี และคณะ, 2543ข) ลักษณะของเส้นตอบสนองต่อแสง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง เป็นส่วนที่อัตราสังเคราะห์แสงผันแปรโดยตรงกับความเข้มแสง ตั้งแต่ช่วงที่ยังไม่มีแสง เป็นช่วงที่ไม่มีการสร้างสารประกอบคาร์บอนหรือไม่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงในพืช และมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา เนื่องจากกระบวนการหายใจที่เกิดขึ้นในไมโทคอนเดรียของเซลล์พืช ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเป็นลบ เมื่อเริ่มมีความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าลบจนเท่ากับศูนย์ ความเข้มแสง ณ จุดนี้ เรียกว่า จุดชดเชยแสง (light compensation point, I_c) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด เมื่อเพิ่มความเข้มแสงให้สูงกว่าจุดชดเชยแสง ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ มักมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงหนึ่ง เนื่องจาก แสงเป็นปัจจัยจำกัดของกระบวนการสังเคราะห์แสง ความชันของความสัมพันธ์ที่ได้ เรียกว่า ค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (quantum or photochemical efficiency, α) เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรึงได้ต่อหนึ่งหน่วยความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น (Taiz and Zeiger, 2002) ค่านี้ผันแปรไปกับอุณหภูมิและระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อสัดส่วนของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน โดย เอนไซม์รูบิสโก (Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase, RUBISCO) พืช C₃ มีค่าประสิทธิภาพการใช้แสงค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ $0.052 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ ภายใต้สภาพอ้างอิงคือ ที่อุณหภูมิ 30°C ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $330 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ และ ออกซิเจน 21% เชิงปริมาตร (Evans, 1987)

ส่วนที่สอง เป็นส่วนที่อัตราสังเคราะห์แสงเริ่มเข้าสู่ระยะอิ่มตัว (saturation) ความเข้มแสง ณ จุดที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเริ่มมีค่าคงที่ เรียกว่า จุดอิ่มตัวแสง (light saturation point, I_s) เมื่อเพิ่มความเข้มแสงให้สูงขึ้นกว่าจุดอิ่มตัวแสง จะไม่มีผลทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเพิ่มขึ้นตาม แสดงให้เห็นว่า ณ จุดนี้ แสงไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัด แต่มีปัจจัยอื่นๆ เช่น ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ค่านำไหลของการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปากใบ

ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เมสโซฟิลล์และคลอโรพลาสต์ กระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของตัวรับส่งอิเล็กตรอนต่างๆ ที่อยู่ในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ของคลอโรพลาสต์ (electron transport reactions) และกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์รูบิสโก เข้ามาเป็นปัจจัยจำกัดแทน

สมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการประเมินอัตราสังเคราะห์แสงของพืช C3 คือ สมการ non-rectangular hyperbola เนื่องจาก ค่าอัตราสังเคราะห์แสงของใบที่ได้จากการประเมินด้วยสมการ non-rectangular hyperbola นี้ มีค่าที่ใกล้เคียงค่าอัตราสังเคราะห์แสงจริงของใบ (Thornley and Johnson, 1990)

สมการ non-rectangular hyperbola เกิดขึ้นเมื่อ ค่าความคุ่มความโค้งของเส้นกราฟ (convexity parameter, θ) มีค่า $0 \leq \theta \leq 1$ โดยมีรูปแบบสมการ เป็นดังนี้

$$A = \frac{1}{2\theta} \left[\alpha I + P_m - \sqrt{(\alpha I + P_m)^2 - 4\theta \alpha I P_m} \right] - R_d \quad (2)$$

เมื่อ A	= อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthetic rate), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
I	= ความเข้มแสงที่ใบพืชได้รับ (photon flux density, PPF), $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
P_m	= อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (maximum gross photosynthetic rate), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
R_d	= อัตราหายใจในความมืด (dark respiration rate), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
α	= ประสิทธิภาพการใช้แสงที่ความเข้มแสงต่ำ (quantum or photochemical efficiency), $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$
θ	= ค่าความคุ่มความโค้งของเส้นกราฟ (Curvature factor) มีความหมายว่าเป็นสัดส่วน คำนวณหาผลของการแพร่เทียบกับคำนวณหาผลของการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีความหมายเท่ากับ

$$\theta = \frac{g_c}{g_d + g_c} \quad (3)$$

เมื่อ g_d	= คำนวณหาผลรวมสำหรับการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ จากบรรยากาศผ่านชั้นบาง ติดผิวใบและปากใบจนถึงคลอโรพลาสต์, $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
g_c	= คำนวณหาผลของการกระบวนการ carboxylation, $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

จากการศึกษาของ Dufrene and Saugier (1993) พบว่าอัตราสังเคราะห์แสงของใบย่อยในทางใบเดียวกันของปาล์มน้ำมัน ไม่มีความแตกต่างกัน แต่อัตราสังเคราะห์แสงของใบย่อยคนละทางใบจะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอายุของทางใบ (frond age) และเมื่อศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงของใบย่อยในทางใบที่ 8 และทางใบที่ 9 ซึ่งมีอายุประมาณ 4 เดือน จากปาล์มน้ำมัน 8 ต้น พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยพบว่า อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด (A_{max}) มีค่าอยู่ในช่วง $20-24 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และจุดอิ่มตัวแสง (I_c) มีค่าประมาณ $800 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการศึกษาของ Henson (1995) ส่วนจุดชดเชยแสง (I_0) มีค่าเท่ากับ $41 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เมื่อวิเคราะห์ความชันที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับความเข้มแสงในช่วงต่ำ พบว่า ค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (α) มีค่าเท่ากับ $0.051 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$

3. คลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ (Chlorophyll fluorescence)

พืชสีเขียวมีสารสี (pigment) คือ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี ทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานแสง โดยช่วงความยาวคลื่นที่พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงจะอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร เรียกแสงช่วงนี้ว่า Photosynthetically active radiation (PAR) หรือ Photosynthetic photon flux (PPF) เมื่อสารสีดูดกลืนพลังงานแสงที่ส่องลงมากกระทบใบพืชแล้ว พลังงานแสงจะแยกอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำ แล้วส่งผ่านระบบรับส่งอิเล็กตรอนของระบบแสงสอง (photosystem II, PSII) ทำให้ตัวรับส่งอิเล็กตรอนที่สำคัญ คือ พลาสโตควิโนน (plastoquinone, PQ) อยู่ในสภาพรีดิวซ์ คืออยู่ในสภาพปิด ไม่สามารถรับอิเล็กตรอนเพิ่มได้อีก ทำให้พลังงานแสงที่พืชได้รับในช่วงนี้ กลายเป็นพลังงานส่วนเกิน เพราะอิเล็กตรอนไม่สามารถถ่ายทอดต่อไปได้ พืชจะมีการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาด้วย 2 วิธีใหญ่ๆ คือ ปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของความร้อน (Thermal dissipation as heat, H) ทำให้อุณหภูมิใบพืชเพิ่มสูงขึ้น และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปรังสีฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence, F) ทำให้ปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้จึงมีค่าสูง สำหรับพลังงานแสงที่ใช้ในระบบ PSII เมื่อพลาสโตควิโนน ส่งถ่ายอิเล็กตรอนไปยังตัวรับส่งอิเล็กตรอนตัวต่อไปแล้ว พลาสโตควิโนนนี้จะกลับมาอยู่ในสภาพออกซิไดซ์ใหม่ ซึ่งเป็นสภาพเปิด สามารถรับอิเล็กตรอนเข้ามาได้อีก รังสีฟลูออเรสเซนซ์ก็จะลดต่ำลงสลับกัน การลดระดับของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในรูปนี้ เป็นการลดโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงที่เรียกว่า photochemical quenching (qP) ส่วนการลดระดับของรังสีฟลูออเรสเซนซ์โดยวิธีอื่นทั้งหมด เรียกว่า non-photochemical quenching (qN)

รังสีฟลูออเรสเซนซ์เป็นแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 690-730 nm ซึ่งเป็นแสงสีแดงที่มีพลังงานต่ำ รังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมาไม่เกินร้อยละ 3 ของแสงทั้งหมดที่ส่องผ่านใบ (Rosenqvist and Kooten, 2003) การวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพการใช้แสงและอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในระบบรับแสงได้

การวัด fluorescence yield จะวัดใบพืชที่ผ่านสภาพที่มีดสนิทเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้แน่ใจว่าได้มีการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนผ่านระบบ PSII เสร็จสิ้นแล้ว คือให้พลาสติกวีนอนอยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ เครื่องวัดจะให้แสงที่ความเข้มแสงต่ำก่อน ซึ่งจะทำให้อ่านค่าแรกคือ F_o (minimum, quasi-dark fluorescence yield) หลังจากนั้น เครื่องจะให้แสงที่ความเข้มแสงสูงมาก (saturating light pulse) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเต็มกำลังของระบบ PSII คือให้ศูนย์กลางปฏิกิริยาอยู่ในสภาพปิดทั้งหมด ทำให้เกิดการแผ่รังสีฟลูออเรสเซนซ์ออกมาได้อย่างเต็มที่ ซึ่งจะอ่านเป็นค่า F_m (maximum total fluorescence yield) ผลต่างของค่าทั้งสอง เรียกว่า F_v (variable fluorescence, $F_v = F_m - F_o$) โดยที่สัดส่วนระหว่าง F_v / F_m แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII ค่าสัดส่วนนี้ เรียกว่า maximum quantum efficiency ดังสมการ

$$P_{\text{dark}} = \Phi_{\text{dark}} = \frac{F_m - F_o}{F_m} = \frac{F_v}{F_m} \quad (4)$$

เมื่อ P_{dark} = สัดส่วนของโฟตอนที่ PSII ใช้ในกระบวนการ photochemistry เทียบกับจำนวนโฟตอนทั้งหมดที่ใบดูดกลืนไว้ เป็นค่าสูงสุดที่วัดได้หลังจากให้ใบอยู่ในความมืดนานพอ (Anonymous, 2002) เมื่อวัดที่อุณหภูมิ 77K พบว่าค่านี้มีค่าค่อนข้างคงที่ในใบพืชที่มีระบบท่อลำเลียง คือมีค่าประมาณ 0.832 ± 0.004 แสดงว่าใบเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานแสงที่สูงมาก กล่าวคือ พลังงานแสงที่ใบดูดกลืนไว้ จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้สูงถึง 83.2% ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมที่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ PSII จะมีผลทำให้ค่า quantum efficiency ลดลง (Bjorkman and Demmig, 1987)

ในสภาพทั่วไปที่ใบได้รับแสงธรรมชาติ การวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ของใบ ให้ค่าปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงหนึ่ง ๆ (steady state fluorescence, F_s) และค่าปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดในขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงที่สูงมาก (F_m' , maximal fluorescence during a saturating light flash) ค่า F_s และ F_m' ที่ได้นำไปใช้ในการคำนวณ

ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (quantum efficiency of PSII electron transport in illuminated leaf, $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$) ซึ่งพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่า Φ_{dark} เนื่องจากศูนย์กลางปฏิกิริยาไม่ได้อยู่ในสภาพที่เปิดเต็มที่ และมีค่าลดลงเมื่อความเข้มแสง (photosynthetic photon flux, PPF) เพิ่มขึ้น

$$P_{light} = \Phi_{PSII} = \frac{F_m' - F_s}{F_m'} \quad (5)$$

เมื่อวัด quantum efficiency ของใบเดียวกันทั้งที่ผ่านสภาพมืดและในสภาพมีแสง จะสามารถประเมินสัดส่วนการลดลงของระดับรังสีฟลูออเรสเซนซ์ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์แสง (photochemical quenching, $qP = (F_m' - F_s) / (F_m' - F_0')$) และที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอื่นๆ ซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง (non-photochemical quenching, $qN = (F_m - F_m') / (F_m - F_0')$) โดยที่ F_s คือรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้ขณะที่ใบได้รับแสงขณะนั้น (steady state fluorescence)

การลดลงของระดับรังสีฟลูออเรสเซนซ์ประการหลังที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสง เป็นเรื่องที่น่าสนใจในการศึกษาพืชภายใต้สภาพเครียด เพราะเมื่ออัตราสังเคราะห์แสงถูกกระทบจากสภาพที่ไม่เหมาะสม พลังงานแสงที่ส่องมายังคลอโรพลาสต์จะมีค่าสูงเกินกว่าที่จะใช้ได้หมด ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งเป็นอันตรายต่อองค์ประกอบของเซลล์เกิดขึ้น พลังงานส่วนเกินนี้พืชจะระบายออกไปในรูปของความร้อน แต่หากพืชได้รับพลังงานแสงที่สูงเกินไป ติดต่อกันเป็นเวลานาน จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นในศูนย์กลางปฏิกิริยาของ PSII ในส่วนของโปรตีน D1 หากกระบวนการซ่อมแซมเกิดขึ้นไม่ทันกับความเสียหายที่เกิดขึ้น จะทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง (photoinhibition) ได้ (Buchanan *et al.*, 2000)

ค่าที่ได้จากการวัดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ในช่วงกลางวัน ใช้คำนวณอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (rate of linear whole-chain electron transport, J) จากสมการ

$$J = I \times \alpha_{leaf} \times f \times \Phi_{PSII} \quad (6)$$

เมื่อ I	= ความเข้มแสง, $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
α_{leaf}	= ค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของใบ (light absorption of leaves) มีค่าเท่ากับ 0.85 (Anonymous, 2002)
f	= สัดส่วนของพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนโดยระบบ PSII พีช C3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 (Anonymous, 2002)

ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบมีรูปฟังก์ชันเป็น non-rectangular hyperbola มีพารามิเตอร์หลายค่า และมีรูปฟังก์ชันลักษณะคล้ายคลึงกับเส้นตอบสนองต่อแสงโดยมีรูปแบบสมการ เป็นดังนี้

$$J = \frac{1}{2\theta_j} \left[\alpha_j I + J_{\max} - \sqrt{(\alpha_j I + J_{\max})^2 - 4\theta_j \alpha_j I J_{\max}} \right] \quad (7)$$

เมื่อ J	= อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (rate of linear whole-chain electron transport), $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
I	= ความเข้มแสงที่ใบพืชได้รับ (photon flux density, PPF), $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$J_{\max}$	= อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum rate of linear whole-chain electron transport), $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
α_j	= ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum quantum efficiency of linear whole-chain electron transport, $\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
θ_j	= ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (Curvature factor)

4. จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (CO₂ compensation point and mesophyll conductance)

การศึกษาถึงกระบวนการทางชีวเคมีภายในเซลล์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์ของเซลล์นั้น พบว่าในช่วงที่ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยๆ ลดต่ำลงจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = g_m (C_i - \Gamma) \quad (8)$$

- เมื่อ A = อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 g_m = ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (mesophyll conductance), $\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 C_i = ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในใบ (internal CO₂ concentration), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$
 Γ = จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ compensation point), $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะให้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ค่า พารามิเตอร์ตัวแรก คือ ค่าจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (Γ) เป็นระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์ของเซลล์ ในขณะที่อัตราหายใจมีค่าเท่ากับอัตราสังเคราะห์แสงรวม หรือขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์ เป็นค่าเบื้องต้นอีกค่าหนึ่งที่ใช้บอกถึงดุลการสังเคราะห์แสงกับการหายใจ ค่านี้ยิ่งมีค่าต่ำมากเท่าใด ก็จะทำให้เกิดความแตกต่างของระดับความเข้มข้นระหว่างในใบกับในอากาศได้มากขึ้นเท่านั้น กล่าวคือ ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนของคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ใบได้มากขึ้น และสามารถใช้น้ำเป็นค่าอ้างอิงของใบพืชปกติชนิดใดชนิดหนึ่งได้ พืช C3 มีจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ในช่วง 50-100 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ ในขณะที่พืช C4 จะมีจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงศูนย์ หากพืชถูกกระทบด้วยปัจจัยใดๆ ที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงจริงลดลง และ/หรือ กระบวนการหายใจเพิ่มขึ้น จะทำให้ระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในใบเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น ค่านี้จึงเป็นค่าที่ใช้บ่งบอกถึงความเสียหายของกระบวนการหลักภายในพืชได้ดี และพารามิเตอร์ตัวที่สอง คือ ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ เป็นค่าที่ได้จากค่าความชันของความสัมพันธ์ดังกล่าว ($g_m = dA / dC_i$) ค่านำไหลเมสโซฟิลล์นี้ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเคลื่อนที่ของคาร์บอนไดออกไซด์จากภายในช่องว่างใบ ผ่าน

เยื่อหุ้มเซลล์เมสโซฟิลล์ เยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์ เข้าสู่จุดที่เกิดปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ใน สโตรมาของคลอโรพลาสต์ โดยเอนไซม์รูบิสโก ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (carboxylation efficiency) ของเอนไซม์นี้ในวัฏจักรคัลวิน (Calvin-Benson cycle) ที่เปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นคาร์โบไฮเดรต ตลอดจนถึงอัตราการขนย้ายคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate transport) ในรูปซูโครส และ/หรือ ในรูปแป้งที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงออกจากคลอโรพลาสต์ไปยังแหล่งสะสม (sink) ต่างๆ เช่น ผล, รากสะสมอาหาร เป็นต้น เพื่อรักษาระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลายทาง (ในคลอโรพลาสต์) ให้มีค่าต่ำกว่าต้นทาง (ช่องว่างภายในใบ) ซึ่งก่อให้เกิดแรงขับเคลื่อนของคาร์บอนไดออกไซด์ให้แพร่เข้าสู่เซลล์ (สุนทรี และคณะ, 2543ค)

พืชที่มีอัตราสังเคราะห์แสงสูง ควรจะมีอัตราการขนย้ายของคาร์โบไฮเดรต ในอัตราที่สูงด้วย มิฉะนั้น อาจทำให้เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์แสงของใบพืช เมื่อมีคาร์โบไฮเดรตสะสมอยู่ที่ใบในปริมาณมาก โดยทั่วไปอัตราการเคลื่อนย้ายของคาร์โบไฮเดรต จะช้ากว่าอัตราสังเคราะห์แสง (Salisbury and Ross, 1985)

อุปกรณ์และวิธีการ

แผนดำเนินงานในการศึกษาศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมัน มีดังนี้ คัดเลือกสายต้น (clone) ปาล์มน้ำมันและต้นปาล์มที่ใช้เป็นตัวแทนของสายต้นนั้น โดยใช้ข้อมูลผลผลิตทะลายสดเฉลี่ย (ตัน/ไร่) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณา จากนั้นคัดเลือกทางใบโดยอ้างอิงข้อมูลการศึกษาพื้นฐานทางสรีรวิทยาของปาล์มน้ำมันในส่วนของศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มในแต่ละทางใบก่อนหน้านี้โดยสุนทรและคณะ (ไม่เผยแพร่) เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาเปรียบเทียบศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบ โดยวัดดัชนีความเขียวของใบและปริมาณคลอโรฟิลล์ (Leaf SPAD index and chlorophyll content) ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ Photosystem II ในสภาพมืด (maximum quantum efficiency of PSII electron transport in dark adapted leaves) เส้นตอบสนองต่อแสง (light response) จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์และค่านำไพลเมสโซฟิลล์ (CO_2 compensation and mesophyll conductance) พารามิเตอร์ที่ได้จากเส้นตอบสนองต่อแสง จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์และค่านำไพลเมสโซฟิลล์ นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรมทางสถิติ

พืชที่ศึกษา (Plant material)

ปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นต้นที่ปลูกในสวนปาล์มของบริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ต.คลองวังช้าง อ.ปะทิว จ.ชุมพร ($10^\circ 46' 45.2'' \text{ N}$, $99^\circ 20' 53.0'' \text{ E}$) ซึ่งได้มีการเก็บบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลการเติบโตและผลผลิตในแต่ละปีตั้งแต่เริ่มปลูกจนแปลง ได้แก่ ความสูงของลำต้นที่เพิ่มขึ้น จำนวนทางใบที่สร้างขึ้นใหม่ จำนวนและน้ำหนักทะลาย (ตารางผนวกที่ 1) การศึกษาในครั้งนี้ จะใช้ข้อมูลผลผลิตทะลายสดเฉลี่ย (average fresh fruit bunch; ตัน/ไร่) ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2538-2546 เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาคัดเลือกสายต้นและต้นที่ใช้เป็นตัวแทนในการศึกษา โดยเลือกสายต้นปาล์มน้ำมันที่ได้จากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจำนวน 3 สายต้น ได้แก่

สายต้น Hi มีผลผลิตทะลายสดเฉลี่ยมากกว่า 4.0 ตันต่อไร่

สายต้น Me มีผลผลิตทะลายสดเฉลี่ย 3.5-4.0 ตันต่อไร่

สายต้น Lo มีผลผลิตทะลายสดเฉลี่ย 3.0-3.5 ตันต่อไร่

และต้นปาล์มน้ำมันที่ได้จากการเพาะเมล็ด (seed, Sd) ที่มีผลผลิตทะลายสดเฉลี่ย 3.0-4.0 ตันต่อไร่

ปาล์มน้ำมันทั้งหมดมีอายุ 14 ปี อยู่ภายใต้สภาพการจัดการและการดูแลต้นที่เหมือนกัน คือ มีการให้น้ำจากระบบน้ำหยดในช่วงแล้งและมีการกำหนดอัตราปุ๋ยเคมีตามกำลังผลผลิตประจำปี

ศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบ

เลือกศึกษาใบย่อยที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 (ใบยอดที่เริ่มคลี่จะนับเป็นทางใบที่ 1) เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาพื้นฐานทางสรีรวิทยาของปาล์มน้ำมัน ในส่วนของศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มในแต่ละทางใบก่อนหน้านี้ พบว่าศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มในทางใบที่ 13 มีค่าสูงที่สุด โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับค่า P_m และพารามิเตอร์อื่นๆ ประกอบ (สุนทรีและคณะ, ไม่เผยแพร่) ส่วนทางใบที่ 17 เป็นทางใบที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุอาหารเพื่อใช้อ้างอิงในการแนะนำการใส่ปุ๋ยให้ต้นปาล์มน้ำมัน เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารของทางใบที่ 17 มีความสัมพันธ์กับผลผลิตทะลายสดของปาล์มน้ำมันมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับใบปาล์มที่เก็บจากทางใบอื่นๆ (Corley, 2003) เนื่องจากทางใบอยู่สูง จึงตั้งนั่งร้านสูง 5-9 เมตร ตามระดับความสูงของทางใบ วัดศักยภาพการสังเคราะห์แสงระหว่างวันที่ 15 มิถุนายน – 14 กรกฎาคม 2548 ตรงกับช่วงต้นฤดูฝนของภาคใต้ วัดค่าในช่วงเวลา 9-13 น. ของแต่ละวัน เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่สภาพอากาศไม่แห้งรุนแรงมาก ปากใบยังเปิดได้กว้างอยู่ พารามิเตอร์ใช้ประเมินศักยภาพการสังเคราะห์แสง คือ ดรรชนีความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ Photosystem II ในสภาพมืด การตอบสนองต่อแสงจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์และค่านำไหลเมสโซฟิลล์

1. ดรรชนีความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ (SPAD index and chlorophyll content)

ศึกษาใบย่อยบริเวณกึ่งกลางของทางใบตั้งแต่ทางใบที่ 1 ถึงทางใบสุดท้าย (ทางใบที่ 40-42) ในแต่ละต้น ระหว่างวันที่ 16-27 มกราคม 2549 โดยวัดดรรชนีความเขียว (SPAD index) ด้วยเครื่อง chlorophyll meter รุ่น SPAD-502 (บริษัท Minolta Camera ประเทศญี่ปุ่น) วัดค่า 5 จุดทั่วทั้งใบย่อย แล้วบันทึกค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างใบบริเวณที่วัดโดยเจาะใบเป็นวงกลม มีพื้นที่ 0.25 ตารางเซนติเมตร นำตัวอย่างใบแช่ในสารละลาย DMF (N,N-Dimethyl formamide) ปริมาตร 4

มิลลิเมตรที่บรรจุในขวดแก้ว นำไปเก็บในที่มืดที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อป้องกันไม่ให้โมเลกุลของคลอโรฟิลล์ที่สกัดได้ถูกทำลายด้วยแสงแดด ที่ไว้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้คลอโรฟิลล์ถูกสกัดออกจากใบจนหมด (สังเกตได้จากใบสีขาวไม่มีสีเขียว) เมื่อสกัดคลอโรฟิลล์ออกจากใบหมดแล้ว จึงนำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbant, A) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (รุ่น Spectronic GENESYS 10 UV-Vis บริษัท Thermo Electron Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ความยาวคลื่น 647 และ 664 นาโนเมตร โดยใช้สารละลาย DMF บริสุทธิ์เป็นตัวตั้งค่าศูนย์ (blank) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปคำนวณปริมาณต่อหน่วยพื้นที่ใบ (g m^{-2}) ของคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี ส่วนคลอโรฟิลล์ทั้งหมด เป็นผลบวกของคลอโรฟิลล์เอและบี ตามสมการ (ดัดแปลงจาก Moran, 1982)

$$\text{Chl a} = (-2.99A_{647} + 12.6A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{area} \times 100) \quad (9a)$$

$$\text{Chl b} = (23.26A_{647} - 5.60A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{area} \times 100) \quad (9b)$$

$$\text{Total Chl} = (20.27A_{647} + 7.04A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{area} \times 100) \quad (9c)$$

เมื่อ	Chl a	= ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ, g m^{-2}
	Chl b	= ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี, g m^{-2}
	Total Chl	= ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด
		= ผลรวมระหว่างคลอโรฟิลล์เอและคลอโรฟิลล์บี, g m^{-2}
	A_{647}	= ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 647 nm, ค่าสัดส่วน
	A_{664}	= ค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 nm, ค่าสัดส่วน
	Vol	= ปริมาตรของ DMF ที่ใช้สกัด, ml
	X	= สัดส่วนการเจือจางสารละลาย (เท่ากับปริมาตรสารละลายเริ่มต้นหารด้วย ปริมาตรสารละลายหลังจากมีการเจือจางแล้ว ใช้เมื่อสารสกัดครั้งแรกมีความเข้มข้นสูงเกินไปจนอ่านค่าดูดกลืนแสงเกิน 0.8)
	area	= พื้นที่ใบที่ใช้สกัด, cm^2

นอกจากนี้ได้วัดพื้นที่ใบย่อยทั้งหมดของทางใบที่ 13 และ 17 ของแต่ละสายต้น ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ใบ (รุ่น LI3000 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) เพื่อประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ในแต่ละทางใบ (ผลคูณของปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบกับพื้นที่ใบมีหน่วยเป็นกรัม)

2. ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII ในสภาพมืด

ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII ในสภาพมืด (maximum quantum efficiency of PSII electron transport in dark adapted leaves, Φ_{dark} , F_v/F_m) ประเมินได้จากการวัดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 LCF บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) โดยใช้หัววัดแบบ leaf chamber fluorometer (LCF) ซึ่งเป็นหัววัดที่มีอุปกรณ์เสริมที่ให้แสง (LED light source) ที่ความเข้มแสงสูงมาก (มากกว่า $7000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ได้ และมีตัววัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ (fluorescence detector) ที่เรืองออกมาจากใบได้ วัดในช่วงเวลา 8-9 น. ในใบย่อยที่อยู่บริเวณกึ่งกลางทางใบที่ 13 และ 17 ก่อนวัดเส้นตอบสนองต่อแสง โดยวัด 2 ชั่วโมง ปรับอุณหภูมิของกล่องบรรจุใบให้คงที่ที่ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงประมาณ 75-80% ซึ่งทำให้แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (air vapor pressure deficit, VPD_{air}) มีค่าไม่เกิน 1 kPa เพื่อให้ปากใบเปิดได้เต็มที่ กำหนดระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของอากาศที่เข้ากล่องบรรจุใบคงที่ที่ระดับ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{air}$ เพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ผันแปรมากนักในขณะทำการทดลอง โดยเฉพาะที่เกิดจากลมหายใจของผู้ทำการทดลอง จึงต่อสายยางดึงอากาศเข้าเครื่องจากถังพลาสติกขนาด 20 ลิตร ที่ใช้เป็นถังพัก (buffer) เพื่อให้อากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ก่อนวัดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์ จะใช้ dark adapting clip (บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานร่วมกับหัววัดแบบ LCF หนีบใบบริเวณกึ่งกลางใบย่อย เพื่อให้ใบผ่านการปรับตัวในสภาพมืดอย่างน้อย 20 นาที จากนั้นนำหัววัดแบบ LCF หนีบลงบน dark adapting clips หัววัดจะให้แสงสีแดง (ศูนย์กลางความยาวคลื่นประมาณ 630 nm) ที่มีความเข้มแสงต่ำ (measuring light) ที่ไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง (light reaction) ขึ้นในใบ และเนื่องจากการให้ความเข้มแสงระยะเวลาสั้นมาก พลังงานแสงไม่ได้ถ่ายเทในรูปพลังงานความร้อนที่มีผลให้อุณหภูมิใบเพิ่มสูงขึ้น การให้แสงนี้ จึงทำให้พลังงานแสงถูกถ่ายเทในรูปรังสีฟลูออเรสเซนซ์ทั้งหมด วัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เรืองออกมาจากใบ บริเวณที่วัดเป็นรูปวงกลมครอบคลุมใบเป็นพื้นที่ 2 cm^2 เมื่อระดับรังสีฟลูออเรสเซนซ์เริ่มคงที่ (ค่า $dF/dt < 5$) เครื่องบันทึกค่ารังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ได้เป็นค่าปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ต่ำที่สุดของใบที่ผ่านการปรับตัวในสภาพมืด (F_0 , minimal fluorescence, สะท้อนถึงปริมาณคลอโรฟิลล์เอนในระบบ PSII ที่สามารถถ่ายเทพลังงานแสงส่วนหนึ่งในรูปรังสีฟลูออเรสเซนซ์) ในขณะนี้ตัวรับอิเล็กตรอนที่สำคัญของระบบ PSII (quinone acceptor molecules, Q_A , Q_B และ PQ) อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ (fully oxidized) หลังจากนั้น หัววัดจะให้แสงสีแดงที่ความเข้มแสงสูงมาก (มากกว่า $7000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$, saturating flashes) ในช่วง

เวลาสั้นๆ (ประมาณ 0.8 วินาที) ซึ่งเป็นความเข้มแสงที่สูงมากเกินพอให้เกิดการแยกอิเล็กตรอนจากคลอโรฟิลล์เอ ที่เป็น PSII reaction center ซึ่งจะทำให้ RCII เป็น oxidizing agent แสงพอที่จะไปแยกอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำอีกทีหนึ่ง ทำให้อิเล็กตรอนไหลจาก RCII ส่งต่อไป quinone acceptor จนอยู่ในสภาพรีดิวซ์ทั้งหมด (fully reduced) ซึ่งทำให้ RCII อยู่ในสภาพปิด ไม่สามารถปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้อีก พลังงานแสงที่ยังถูกส่งต่อไป RCII จะถูกใบปลดปล่อยในรูปรังสีฟลูออเรสเซนซ์ออกมาเต็มที่ เครื่องบันทึกค่ารังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้ เป็นค่าปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่สูงที่สุดของใบ (F_m , maximal fluorescence) ค่า F_0 และ F_m ที่ได้ใช้คำนวณประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII ในสภาพมืด กล่าวคือ $\Phi_{dark} = (F_m - F_0) / F_m = F_v/F_m$ (สมการที่ 4)

3. การตอบสนองต่อแสง (light response)

วัดการตอบสนองต่อแสง ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 LCF บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ชุดเดียวกันและสภาพแวดล้อมภายในกล่องบรรจุใบให้คงที่ เช่นเดียวกันกับที่ใช้ประเมิน Φ_{dark} ก่อนหน้านี้ คือ อุณหภูมิกล่องบรรจุใบ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 75-80% ($VPD_{air} \leq 1$) ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของอากาศที่เข้ากล่องบรรจุใบ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ บริเวณที่วัดเป็นรูปวงกลมครอบคลุมใบเป็นพื้นที่ 2 cm^2 วัดเส้นตอบสนองต่อแสงของใบย่อยใบเดียวกันกับที่ใช้ประเมินค่า Φ_{dark} ก่อนหน้านี้ ในช่วงเวลา 9-13 น. หลังจากประเมินค่า Φ_{dark} แล้ว โดยเลือกหนีบใบคนละตำแหน่งกันกับที่ใช้ประเมิน Φ_{dark} แต่เป็นบริเวณที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากตำแหน่งใบที่ใช้ประเมิน Φ_{dark} ผ่านการให้แสงสีแดงที่ความเข้มแสงสูงมาก (มากกว่า $7000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 0.8 วินาที) มาก่อน อาจทำให้ระบบแสงยังส่งต่อพลังงานแสงไม่เสร็จสิ้น ปรับความเข้มแสงในกล่องบรรจุใบให้ใบได้รับความเข้มแสงสูงสุดที่ $2000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ นานประมาณ 10 นาที เพื่อให้ใบปรับตัวต่อสภาพแสงและกระตุ้นให้ปากใบเปิดเต็มที่ บันทึกค่าที่ได้ หลังจากนั้นจึงลดความเข้มแสงลงเป็นลำดับ จนถึง $0 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ โดยให้ใบได้รับแสงแต่ละความเข้มแสงนาน 3-5 นาที จนค่าอัตราสังเคราะห์แสง-สุทธิที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ของค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนรวม (%Total CV) ที่ระดับน้อยกว่า 1% จึงบันทึกค่า วัด 3 ซ้ำ

เส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เข้ารูป non-rectangular hyperbola มีพารามิเตอร์หลายค่า (สมการที่ 2) สำหรับค่า α (initial slope) ประเมินก่อนโดยนำ

ข้อมูลอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิที่ระดับความเข้มแสงต่ำ คือ ที่ความเข้มแสง 0-100 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ มาเข้ารูปฟังก์ชันเส้นตรง ซึ่งมีรูปสมการว่า

$$A = \alpha (\text{PPF}) + \beta \quad (10)$$

เมื่อ

- A = อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthetic rate, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
 α = ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์
 (maximum quantum efficiency of CO_2 assimilation, $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)
 PPF = ความเข้มแสง (light intensity, $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
 β = ค่าคงที่ (y-intercept, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

ส่วนพารามิเตอร์อื่นที่เหลือ ได้แก่ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (θ) อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (gross photosynthetic rate, P_m) อัตราหายใจในความมืด (dark respiration, R_d) คำนวณโดยใช้วิธี nonlinear least-square ด้วยคำสั่ง solver ในโปรแกรม Microsoft Excel กำหนดให้โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า residual sum of square ซึ่งเป็นค่าผลต่างกำลังสองของค่าที่ประมาณได้กับค่าที่วัดได้จริงมีค่าน้อยที่สุด สำหรับจุดชดเชยแสง (light compensation point, I_c) หรือความเข้มแสงที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงรวมเท่ากับอัตราหายใจ คำนวณได้จากสมการ non-rectangular hyperbola โดยกำหนดให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเท่ากับ 0 ส่วนจุดอิ่มตัวแสง (light saturation, I_s) หรือความเข้มแสงที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าสูงสุดและคงที่ คำนวณได้โดยกำหนดให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเท่ากับ 85% ของ P_m

การวัดเส้นตอบสนองต่อแสง โดยใช้ห้ววัดแบบ leaf chamber fluorometer ทำให้สามารถวัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เรืองออกมาจากใบได้ในเวลาเดียวกัน เครื่องจะวัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในขณะที่ใบได้รับความเข้มแสง ค่าที่ได้ เรียกว่า steady state fluorescence (F_s) หลังจากนั้น ห้ววัดจะให้แสงสีแดงที่ความเข้มแสงสูงมาก (saturating flashes) ในช่วงเวลาสั้นๆ (ประมาณ 0.8 วินาที) เพื่อให้ตัวรับอิเล็กตรอนของระบบ PSII ได้แก่ quinone acceptor molecules, Q_A , Q_B และ PQ อยู่ในสภาพรีดิวซ์ทั้งหมด ทำให้ RCII อยู่ในสภาพปิด รังสีฟลูออเรสเซนซ์จะเรืองออกมาจาก RCII เต็มที่ ค่าที่ได้คือ ระดับรังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดในขณะที่ใบได้รับความเข้มแสง

ที่สูงมาก (F_m' , maximal fluorescence during a saturating light flash) จน RCII ไม่สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนได้ จำนวนประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (quantum efficiency of PSII electron transport in illuminated leaf) ได้ว่า $\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s) / F_m'$ (สมการที่ 5) และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (rate of linear whole-chain electron transport, $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) จำนวนได้ว่า $J = PPF \times \alpha_{leaf} \times f \times \Phi_{PSII}$ (สมการที่ 6) เมื่อ α_{leaf} คือค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของใบ (light absorption of leaves) เท่ากับ 0.85 ค่า f คือสัดส่วนของพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนโดยระบบ PSII ของพืช C3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 คือถือว่าแสงตกสู่ระบบ PSII เท่ากับตกสู่ระบบ PSI (Anonymous, 2002)

ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบมีรูปฟังก์ชันเป็น non-rectangular hyperbola มีพารามิเตอร์หลายค่า (สมการที่ 7) และมีรูปฟังก์ชันลักษณะคล้ายคลึงกับเส้นตอบสนองต่อแสง สำหรับค่า α_J (initial slope) ประเมินก่อนโดยนำข้อมูลอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (J) ที่ระดับความเข้มแสงต่ำ คือ ที่ความเข้มแสง 0-100 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ มาเข้ารูปฟังก์ชันเส้นตรง ซึ่งมีรูปสมการว่า

$$J = \alpha_J (PPF) + \beta_J \quad (11)$$

เมื่อ

- J = อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (rate of linear whole-chain electron transport, $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- α_J = ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum quantum efficiency of linear whole-chain electron transport, $\text{mol E mol}^{-1} \text{PPF}$)
- PPF = ความเข้มแสงที่ใบได้รับ (light intensity, $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
- β_J = ค่าคงที่ (y-intercept, $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

ส่วนพารามิเตอร์อื่นที่เหลือ ได้แก่ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (θ_J) และอัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum rate of linear whole-chain electron transport, J_{max}) จำนวนได้โดยใช้วิธี nonlinear least-square ด้วยคำสั่ง solver ในโปรแกรม Microsoft Excel

กำหนดให้โปรแกรมหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดโดยพิจารณาจากค่า residual sum of square ซึ่งเป็นค่าผลต่างกำลังสองของค่าที่ประมาณได้กับค่าที่วัดได้จริงมีค่าน้อยที่สุด

วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance, ANOVA) ของพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสง เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1988)

4. จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 compensation) และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (mesophyll conductance)

วัดโดยใช้เครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) อีกชุดหนึ่ง ซึ่งมีอุปกรณ์เสริมที่ให้แสง (LED light source) โดยศึกษาพร้อมกันกับการวัดเส้นตอบสนองต่อแสงบริเวณกึ่งกลางใบในใบย่อยเดียวกันแต่คนละฝั่งของเส้นกลางใบ เพื่อลดระดับการรบกวนของแต่ละการศึกษา กำหนดระดับความเข้มแสงให้ใบได้รับแสงสูงสุดคงที่ที่ระดับ $2000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ปรับอุณหภูมิของกล่องบรรจุใบให้คงที่ที่ 28°C ความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงประมาณ 75-80% ($\text{VPD}_{\text{air}} \leq 1$) เมื่อกำหนดปัจจัยต่างๆ ให้ประมาณคงที่แล้ว จึงปรับระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของอากาศที่เข้ากล่องบรรจุใบให้ลดลงเป็นระดับขึ้น โดยปรับลดจากระดับ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{air}$ จนถึง $0 \mu\text{mol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{air}$ ซึ่งเครื่องจะปรับลงตามขั้นที่ตั้งไว้ล่วงหน้าอัตโนมัติ บันทึกอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิที่ได้ วัด 3 ชั่วโมง

ข้อมูลที่ได้นำมาสร้างความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) กับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สภายในช่องว่างใบ (C_i) (linear function) ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel (สมการที่ 8)

จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (Γ) เป็นค่า C_i ขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) เป็น 0 และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (g_m) คือค่าความชันของเส้นความสัมพันธ์ระหว่าง A กับ C_i ($g_m = dA/dC_i$)

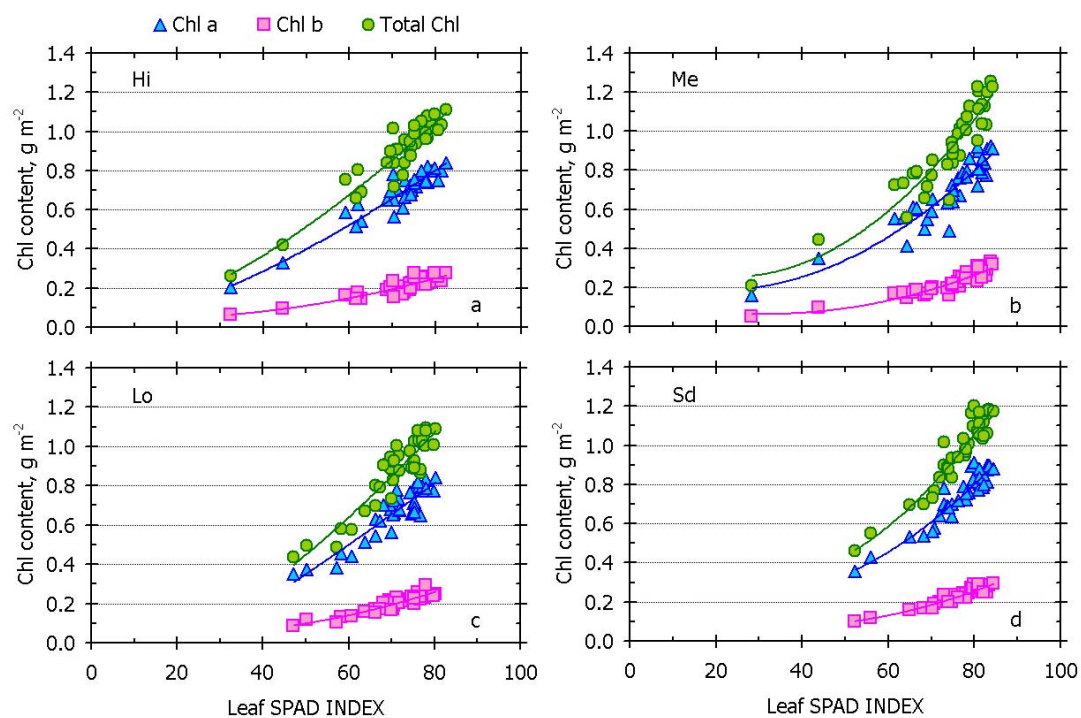
วิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way Analysis of Variance, ANOVA) ของพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาจุดดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และค่าน้ำไหลเมสโซฟิลล์ เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและตรวจสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1988)

ผลและการวิจารณ์

1. ครรชนีความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์

วัดค่าครรชนีความเขียวของทุกตัวอย่างใบก่อนสกัดวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ จึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 1 รูปแบบความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบ polynomial ($Y=aX^2+bX+c$) โดยมีค่าคงที่แสดงในตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ที่ได้สามารถใช้คำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มในแต่ละสายต้นในภายหลังเมื่อวัดค่าครรชนีความเขียว

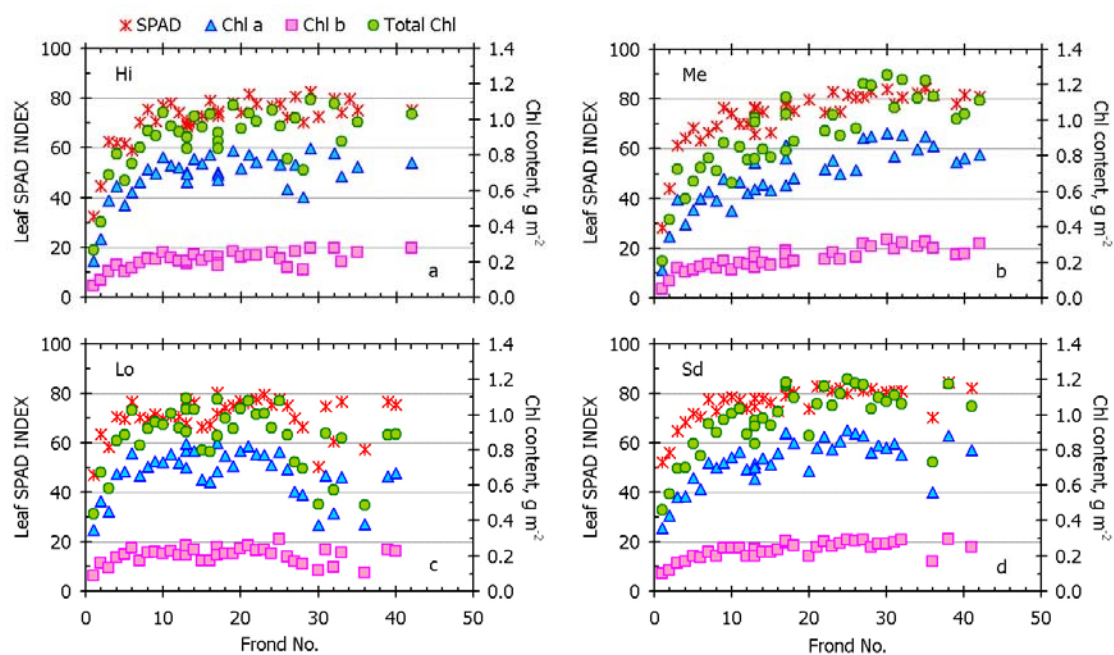
ผลการวัดของใบปาล์มตั้งแต่ทางใบที่ 1 จนถึงทางใบสุดท้าย (ทางใบที่ 40-42) แสดงแยกตามสายต้นในภาพที่ 2 และแยกตามชนิดของคลอโรฟิลล์ในภาพที่ 3 ครรชนีความเขียวของใบปาล์มที่วัดได้ทั้ง 4 สายต้นมีค่าอยู่ในช่วง 28.2 – 84.5 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย DMF ที่ใช้ในการสกัดคลอโรฟิลล์ (สมการที่ 9) มีค่าอยู่ในช่วง 0.158 – 0.926 กรัมต่อตารางเมตร คลอโรฟิลล์บีมีปริมาณต่ำกว่า คือมีค่าอยู่ในช่วง 0.049-0.276 กรัมต่อตารางเมตร และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบปาล์มมีค่าอยู่ในช่วง 0.207-1.257 กรัมต่อตารางเมตร (ภาพที่ 2) สัดส่วนระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อปริมาณคลอโรฟิลล์บีมีค่าอยู่ในช่วง 2.64 – 3.99 (ภาพที่ 3d) สัดส่วนที่ได้ใกล้เคียงกับที่พบในพืช C3 ในกลุ่มไม้ผลยืนต้น เช่น มะม่วง น้ำดอกไม้ ส้มเขียวหวาน (สุนทรีและคณะ, 2543ก.; 2544ก.) ส้มเขียวหวาน มะม่วง และทุเรียน (พูนพิภพ และคณะ, 2537) ที่มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3 ต่อ 1 ซึ่งเป็นค่าที่พบในใบพืชปกติทั่วไป (Anderson, 1986)



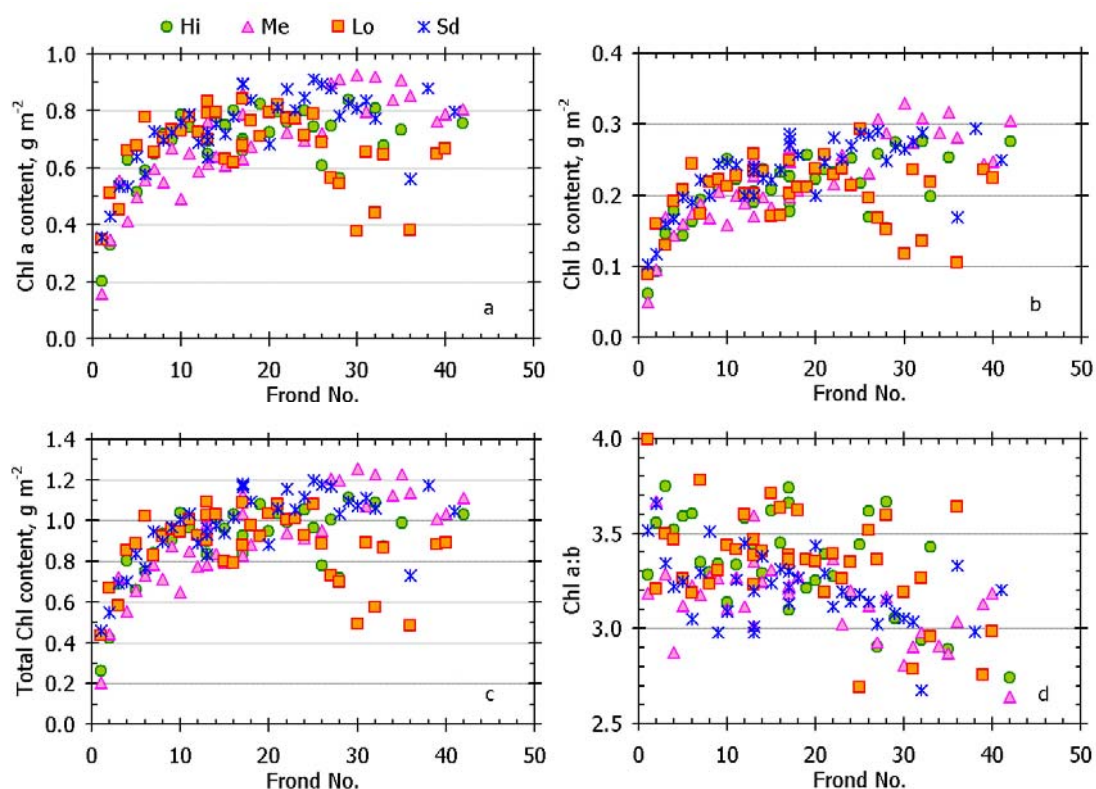
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ของใบปาล์ม a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งระหว่างครรชนีความเขียวกับปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบ
 ปาล์มน้ำมัน (Chl a = ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ, Chl b = ปริมาณคลอโรฟิลล์บี, Total Chl =
 ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด หน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร และ SPAD = ครรชนีความ
 เขียว) ความสัมพันธ์ได้จากการวิเคราะห์ไบน้อย 1 ใบของแต่ละทางใบ ตั้งแต่ทางใบที่ 1
 ถึงทางใบสุดท้าย (40-42 ทางใบ) ของแต่ละสายต้น

สายต้น	รูปความสัมพันธ์		ค่าสหสัมพันธ์	d.f.
Hi	[Chl a]	$= 0.00005(\text{SPAD})^2 + 0.0061(\text{SPAD}) - 0.0104$	0.94	33
	[Chl b]	$= 0.00003(\text{SPAD})^2 + 0.0003(\text{SPAD}) + 0.0112$	0.86	33
	[Total Chl]	$= 0.00008(\text{SPAD})^2 + 0.0064(\text{SPAD}) + 0.0008$	0.93	33
Me	[Chl a]	$= 0.00020(\text{SPAD})^2 - 0.0065(\text{SPAD}) + 0.2459$	0.86	33
	[Chl b]	$= 0.00008(\text{SPAD})^2 - 0.0053(\text{SPAD}) + 0.1454$	0.86	33
	[Total Chl]	$= 0.00028(\text{SPAD})^2 - 0.0118(\text{SPAD}) + 0.3913$	0.87	33
Lo	[Chl a]	$= 0.00010(\text{SPAD})^2 + 0.0020(\text{SPAD}) + 0.0161$	0.87	37
	[Chl b]	$= 0.00005(\text{SPAD})^2 - 0.0014(\text{SPAD}) + 0.0364$	0.89	37
	[Total Chl]	$= 0.00015(\text{SPAD})^2 + 0.0006(\text{SPAD}) + 0.0525$	0.89	37
Sd	[Chl a]	$= 0.00020(\text{SPAD})^2 - 0.0101(\text{SPAD}) + 0.3549$	0.89	35
	[Chl b]	$= 0.00008(\text{SPAD})^2 - 0.0056(\text{SPAD}) + 0.1632$	0.90	35
	[Total Chl]	$= 0.00028(\text{SPAD})^2 - 0.0157(\text{SPAD}) + 0.5181$	0.90	35



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเขียว (SPAD) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ตามลำดับของทางใบ แสดงแยกตามสายต้น a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับของทางใบปาล์มทั้ง 4 สายต้น แสดงแยกตามชนิดของคลอโรฟิลล์ a) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ b) ปริมาณคลอโรฟิลล์บี c) ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และ d) สัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี

เมื่อพิจารณาพัฒนาการสร้างปริมาณคลอโรฟิลล์ของทางใบ (ภาพที่ 2) พบว่า ธรรมชาติความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ทางใบที่ 1 และมีค่าเกือบสูงสุดเมื่อถึงทางใบที่ 9 แสดงว่าพัฒนาการสร้างคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มถึงระดับสูงสุดที่ทางใบที่ 9 (ใบอายุประมาณ 4-5 เดือน ถ้าประเมินว่ามีอัตราสร้างทางใบ 2 ทางต่อเดือน) ทางใบที่มีอายุน่าจะมีค่าธรรมชาติความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มสูงขึ้นได้อีกเล็กน้อยหรือคงที่ จนถึงทางใบที่ 36 จึงมีค่าเริ่มลดต่ำลง ยกเว้น สายต้น Lo ที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดต่ำลงอย่างชัดเจนตั้งแต่ทางใบที่ 25 เป็นต้นไป ในสภาพแปลงสายต้นนี้มีลักษณะผิดปกติ แสดงให้เห็นชัดเจนว่าทางใบอายุน่าจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แสดงการเสื่อมสภาพของใบ (leaf senescence) เร็วกว่าสายต้นอื่น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับในรายงานของ Suresh และ Nagamani (2006) ที่พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัมต่อกิโลกรัมของใบปาล์ม ที่ปลูกอยู่ทางตอนใต้ของประเทศอินเดีย ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน อายุ 6 ปี มีค่าต่ำสุดในทางใบที่ 1 และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจนมีค่าสูงสุดในทางใบที่ 25 และมีค่าลดต่ำลงในทางใบที่ 33 สัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อคลอโรฟิลล์บีมี่มีค่าลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องตามลำดับของทางใบ (ภาพที่ 3d) ค่าสัดส่วนที่ต่ำกว่า 3 ของทางใบที่ 30 เป็นต้นไป แสดงว่า ทางใบที่อยู่ทางด้านล่างของทรงพุ่มได้รับความเข้มแสงน้อยลง เนื่องจากการบดบังแสงจากทางใบที่อยู่ทางด้านบน

เมื่อพิจารณาข้อมูลรวมสายต้น แต่แยกพิจารณาตามชนิดของคลอโรฟิลล์ ดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์ตามลำดับของทางใบในแต่ละสายต้นมีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้น สายต้น Lo ที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าอย่างชัดเจนตั้งแต่ทางใบที่ 25 จนถึงทางใบสุดท้าย แต่ไม่ได้มีผลทำให้สัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อคลอโรฟิลล์บีมี่แตกต่างจากสายต้นอื่น

ปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบในหน่วยกรัมต่อตารางเมตร ในแต่ละสายต้นมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อพื้นที่ใบทั้งหมดในหน่วยกรัม ในทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 พบว่ามีค่าแตกต่างกัน (ตารางที่ 2) โดยพบว่า สายต้น Hi มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อคลอโรฟิลล์บีมี่ และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายต้นอื่น โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 มีค่าเพียง 6.75 และ 7.46 กรัมตามลำดับ ในขณะที่สายต้นอื่นมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 อยู่ในช่วง 9.24-11.86 กรัม เนื่องจากสายต้น Hi มีพื้นที่ใบย่อยรวมทั้งหมดในทางใบที่ 13 และ 17 ต่ำกว่าสายต้นอื่นอย่างชัดเจน โดยมีพื้นที่ใบเพียง 7.65 และ 8.45 ตารางเมตร ตามลำดับ ในขณะที่สายต้นอื่นมีพื้นที่ใบอยู่ในช่วง 10.01-11.95 ตารางเมตร

พืชจะสร้างโมเลกุลคลอโรฟิลล์ในปริมาณเท่าที่จำเป็นต้องใช้ในการดูดกลืนพลังงานเท่านั้น เนื่องจากการสังเคราะห์โมเลกุลคลอโรฟิลล์ต้องใช้พลังงานในการสังเคราะห์มาก เนื่องจากโมเลกุลคลอโรฟิลล์เป็นไขมันชนิดหนึ่ง การที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในหน่วยกรัมของสาหร่าย *Hi* ต่ำกว่าสาหร่ายอื่น แสดงให้เห็นว่า ระบบรับแสงของสาหร่าย *Hi* น่าจะมีประสิทธิภาพในการรับแสงได้ดีกว่าสาหร่ายอื่น

ความสัมพันธ์ระหว่างครชนิกความเขียวและปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มในตารางที่ 1 ทำให้สามารถประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบปาล์มแต่ละสาหร่ายได้อย่างรวดเร็วในภายหลัง โดยไม่ต้องเจาะทำลายใบและนำสารละลายเคมีมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างครชนิกความเขียว ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด กับลำดับของทางใบ (ภาพที่ 2) ทำให้ทราบว่า ใบปาล์มพัฒนาเต็มที่ในทางใบที่ 9 และสัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี (ภาพที่ 3d) ทำให้ทราบว่า การบดบังแสงในทรงพุ่มปาล์มน้ำมันเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ทางใบที่ 30 เป็นต้นไป

ตารางที่ 2 พื้นที่ใบทั้งหมดของแต่ละทางใบ (Area, m²) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์บี (Chl b) และคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (Total Chl) ในหน่วยกรัมต่อตารางเมตร (g m⁻²) ของใบที่ได้จากทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ในแต่ละสายต้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในทางใบในหน่วยกรัม (g) เป็นผลคูณของพื้นที่ใบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อพื้นที่ใบ ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย±SE ที่ได้จากใบย่อยที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของทางใบจำนวน 3 ใบจาก 1 ต้น, % คือ เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัมของทางใบที่ 17 เมื่อเทียบกับทางใบที่ 13

สายต้น	ทางใบ	Area m ²	Chl a g m ⁻²	Chl b g m ⁻²	Total chl g m ⁻²	Chl a g	Chl b g	Total chl g	Chl a %change	Chl b %change	Total chl %change	Chl a:b
Hi	13	7.65	0.682±0.014	0.200±0.004	0.882±0.019	5.22±0.11	1.53±0.03	6.75±0.14				3.41±0.01
	17	8.45	0.685±0.010	0.197±0.013	0.882±0.022	5.79±0.09	1.67±0.11	7.46±0.19	+10.91	+ 9.10	+10.51	3.50±0.17
Me	13	10.01	0.712±0.043	0.217±0.021	0.929±0.063	7.13±0.43	2.17±0.21	9.30±0.63				3.32±0.15
	17	11.11	0.761±0.059	0.237±0.018	0.998±0.077	8.46±0.65	2.64±0.20	11.09±0.85	+18.59	+21.45	+19.26	3.21±0.01
Lo	13	10.05	0.776±0.034	0.232±0.014	1.008±0.048	7.80±0.34	2.33±0.14	10.13±0.49				3.36±0.06
	17	11.95	0.732±0.048	0.217±0.013	0.949±0.061	8.74±0.57	2.60±0.16	11.34±0.73	+12.07	+11.63	+11.97	3.36±0.01
Sd	13	10.14	0.686±0.023	0.225±0.011	0.911±0.034	6.96±0.23	2.28±0.11	9.24±0.34				3.06±0.06
	17	10.09	0.897±0.001	0.279±0.004	1.176±0.005	9.05±0.01	2.81±0.04	11.86±0.05	+29.93	+23.40	+28.32	3.22±0.04

2. ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII

ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII (F_v/F_m , Φ_{dark}) ที่ได้จาก การวัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่ต่ำที่สุด (F_0) และปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่สูงที่สุด (F_m) ที่เรืองออกมาจากใบปาล์มที่ผ่านการปรับตัวในสภาพมืดอย่างน้อย 20 นาที เพื่อให้ระบบ PSII อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ แสดงในตารางที่ 3

F_v/F_m เป็นค่าที่แสดงถึงประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคแสงที่ได้รับระหว่างระบบรับแสง (light harvesting complex of Photosystem II, LHCII) กับศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบ Photosystem II (reaction center of PSII) ในขณะที่ระบบ PSII อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ พารามิเตอร์นี้ไวต่อความคงสภาพ (intactness) ของ PSII/LHCII complex (กลุ่มโปรตีนเชิงซ้อนที่ฝังอยู่ในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์) เป็นอย่างมาก แต่ไม่ไวต่ออุณหภูมิ (Rosenqvist and Kooten, 2003) สามารถนำมาใช้ติดตามความคงสภาพของเยื่อหุ้มไทลาคอยด์และส่วนต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ (Öquist *et al.*, 1992; Tijskens *et al.*, 1994; DeEll *et al.*, 1999)

ค่า F_v/F_m เฉลี่ยของใบปาล์มมีค่าอยู่ในช่วง 0.795 – 0.830 หมายความว่าเมื่อระบบ PSII ของใบปาล์มอยู่ในสภาพออกซิไดซ์พร้อมเปิดรับอิเล็กตรอนเต็มที่ พลังงานแสงที่ถูกกลืนโดยโมเลกุลคลอโรฟิลล์จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการ photochemistry ได้สูงสุด 79.5 – 83.0% เมื่อเปรียบเทียบค่า F_v/F_m เฉลี่ยในแต่ละสายต้นและในแต่ละทางใบพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยที่สายต้น Hi มีค่าสูงที่สุด และทางใบที่ 17 ของต้น Sd มีค่าต่ำที่สุด ทางใบที่ 17 มีค่า F_v/F_m สูงกว่าทางใบที่ 13 ยกเว้นต้น Sd ค่า F_v/F_m เฉลี่ยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่า F_v/F_m ของใบพืช C3 ปกติที่ไม่ได้อยู่ภายใต้สภาวะเครียด จำนวน 37 species ที่มีค่าเฉลี่ย $\pm$ SE เท่ากับ 0.832 ± 0.004 (ภายใต้สภาพอ้างอิงคือ วัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เรืองออกมาจากระบบ PSII ที่ความยาวคลื่น 692 nm จากผิวใบบน และที่อุณหภูมิ 77K) (Björkman and Demmig, 1987) ดังนั้น ค่า F_v/F_m เฉลี่ยที่ได้น่าจะเป็นค่าอ้างอิงของใบปาล์มในสภาพปกติได้

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของระบบ PSII (Φ_{dark}) ของใบปาล์มในทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 2 ชั่วโมง

สายต้น	ทางใบ	F_o	F_m	$F_v/F_m (\Phi_{\text{dark}})$	$T_{\text{leaf}}, ^\circ\text{C}$
Hi	13	132	777	0.830	29.3
Me	13	142	787	0.820	29.1
Lo	13	131	760	0.827	29.6
Sd	13	134	767	0.826	29.4
Hi	17	133	811	0.836	29.2
Me	17	140	800	0.826	29.3
Lo	17	145	852	0.830	29.7
Sd	17	154	748	0.795	29.3

3. การตอบสนองต่อแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิของใบปาล์มน้ำมันทั้ง 4 สายต้น แสดงในภาพที่ 4a สำหรับทางใบที่ 13 และภาพที่ 5a สำหรับทางใบที่ 17 ความสัมพันธ์ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ความเข้มแสงเป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสง ในช่วงนี้เป็นช่วงที่มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่สำคัญหลายค่า ได้แก่ อัตราหายใจในความมืด (dark respiration, R_d), จุดชดเชยแสง (light compensation, I_c) และประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (maximum quantum efficiency of CO_2 assimilation, α)

ในช่วงแรกที่มีความเข้มแสงต่ำมาก (ช่วง $0-20 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (net photosynthetic rate, A) ของใบปาล์มมีค่าติดลบ กล่าวคือ อัตราสังเคราะห์แสงรวม (gross photosynthetic rate, P) มีค่าต่ำกว่าอัตราหายใจซึ่งเป็นผลรวมของอัตราหายใจในแสง (photorespiration) และอัตราหายใจในความมืด (dark respiration rate, R_d) เมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้นจนอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์ หรืออัตราสังเคราะห์แสงรวมเท่ากับอัตราหายใจ ความเข้มแสงที่จุดนี้ เรียกว่า จุดชดเชยแสง (light compensation, I_c) ค่า I_c เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีอยู่ในช่วง $18.7-66.9 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ตารางที่ 4) หมายความว่า ใบปาล์มต้องการความเข้มแสงในระดับที่สูงกว่าช่วงนี้ จึงเพียงพอให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเป็นบวกได้ ค่า I_c แตกต่างกันตามชนิด (species) ของพืชและสภาพแวดล้อมที่พืชได้รับ ค่า I_c ของพืชในแดด (sun plants) มีค่าอยู่ในช่วง $10-20 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ I_c ของพืชในร่ม (shade plants) มีค่าอยู่ในช่วง $1-5 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่า I_c ของพืชในร่มมีค่าต่ำกว่าพืชในแดด เนื่องจากอัตราหายใจของพืชในร่มมีค่าต่ำมาก (เพราะ substrate น้อย) (Taiz and Zeiger, 2002) เมื่อเปรียบเทียบ I_c เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 4) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 13 โดย I_c เฉลี่ยของสายต้น Lo มีค่าสูงที่สุด ($66.9 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) ในขณะที่ I_c เฉลี่ยของสายต้น Hi Me และ Sd ไม่แตกต่างกัน ($30.1-45.4 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) แสดงให้เห็นว่า ใบปาล์มของสายต้น Lo ต้องใช้พลังงานแสงสูงกว่าสายต้นอื่นเพื่อกระตุ้นให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าเป็นบวกได้ และเมื่อเปรียบเทียบ I_c เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสายต้น Hi และ Lo โดย I_c เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าต่ำกว่าของทางใบที่

ค่า α

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบกับความเข้มแสงในช่วงที่แสงเป็นปัจจัยจำกัดในช่วง 0-100 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าความชันที่ได้แสดงถึงปริมาณ CO_2 ที่ตรึงได้ต่อหนึ่งหน่วยของแสง (maximum quantum efficiency of CO_2 assimilation, α) ค่า α เฉลี่ยของใบปาล์มน้ำมันมีค่าอยู่ในช่วง 0.019-0.046 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ (ตารางที่ 4) ค่าที่ได้ต่ำกว่า α ในทางทฤษฎีของพืช C3 ที่มีค่าเท่ากับ 0.125 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ (Farquhar *et al.*, 1980) (กระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมลต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสง 8 โมล) เนื่องจากค่า α ในทางทฤษฎีจะเป็นจริงต่อเมื่อพลังงานแสงที่ใบดูดกลืนถูกถ่ายทอดไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบแสงได้ 100% (Rosenqvist and Kooten, 2003) และไม่เกิดกระบวนการหายใจในแสง (photorespiration) (Eric *et al.*, 2001) และเป็นค่าต่ำกว่า α ของใบพืช C3 จำนวน 40 species ที่วัดได้ในสภาพบรรยากาศปกติ (21% O_2) ที่ Eric ได้รวบรวมจากผลงานตีพิมพ์ต่างๆ ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.053 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ (27%CV) เมื่อเปรียบเทียบ α เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 13 โดย α เฉลี่ยของสายต้น Me มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.046 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ และ α เฉลี่ยของสายต้น Lo มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.019 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$ แสดงให้เห็นว่า ในช่วงที่แสงเป็นปัจจัยจำกัด ใบของสายต้น Lo มีประสิทธิภาพในการใช้แสงเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำมาก โดยในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมลต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงสูงถึง 53 โมล ในขณะที่ใบของสายต้น Me ใช้พลังงานจากอนุภาคแสงเพียง 22 โมล เมื่อพิจารณาค่า F_v/F_m ในทางใบที่ 13 ของสายต้น Lo พบว่าไม่แตกต่างจากสายต้นอื่น แสดงว่าระบบแสง (PSII/LHCII complex) ยังคงสภาพที่สมบูรณ์และทำงานได้เป็นปกติ ดังนั้น α เฉลี่ยของสายต้น Lo ที่มีค่าต่ำน่าจะเป็นผลมาจากกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ พิจารณาได้จากค่านำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s, \max}$) และประสิทธิภาพของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (carboxylation efficiency, g_m) (ตารางที่ 10) ที่มีค่าต่ำ และเมื่อเปรียบเทียบ α เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะสายต้น Me เท่านั้น โดย α เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ α เฉลี่ยของทางใบที่ 13

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ความเข้มแสงไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสง และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) เริ่มมีค่าสูงคงที่ ในช่วงนี้เป็นช่วงที่มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่สำคัญหลายค่า ได้แก่ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (curvature factor, θ), จุดอิ่มตัวแสง (light saturation, I_s) และอัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (maximum gross photosynthetic rate, P_m)

ค่า θ

ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (curvature factor, θ) เป็นค่าที่แสดงถึงความเร็วในการเปลี่ยนจากระยะที่ความเข้มแสงเป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสงเข้าสู่ระยะที่ความเข้มแสงไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัด โดยมีความหมายทางกายภาพ คือ เป็นค่าสัดส่วนระหว่างความต้านทานของการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างอากาศภายนอกกับบริเวณที่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงในคลอโรพลาสต์ (diffusion resistance, r_d , $s\ m^{-1}$) กับความต้านทานรวมทั้งหมด ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างความต้านทานของการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (r_d) กับความต้านทานของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 จับกับ RuBP) (carboxylation resistance, r_x , $s\ m^{-1}$) กล่าวคือ $\theta = r_d / (r_d + r_x)$ θ ในทางทฤษฎีมีค่าอยู่ในช่วง 0-1 โดย $\theta = 0$ เมื่อ $r_d = 0$ หมายความว่า ความต้านทานของการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสง และ $\theta = 1$ เมื่อ $r_x = 0$ หรือ $r_x \ll r_d$ หมายความว่า ความต้านทานของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสง (Thornley and Johnson, 1990) θ ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.23-0.79 (ตารางที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบ θ เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 13 โดย θ เฉลี่ยของสายต้น Me มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.79 แสดงว่า ความต้านทานของการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (r_d) มีบทบาทสำคัญในการจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบในสายต้น Me เมื่อเทียบกับความต้านทานทั้งหมด (r_x มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ r_d) และ θ เฉลี่ยของต้น Sd มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 0.23 แสดงว่า ความต้านทานของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ มีบทบาทสำคัญในการจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบ เมื่อเทียบกับความต้านทานทั้งหมด (r_x มีค่ามากเมื่อเทียบกับ r_d) และเมื่อเปรียบเทียบ θ เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะต้น Sd เท่านั้น โดย θ เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับ θ เฉลี่ยของทางใบที่ 13

ค่า I_s

ความเข้มแสงในช่วงที่อัตราสังเคราะห์แสงเริ่มมีค่าสูงคงที่ เรียกว่า จุดอิ่มตัวแสง (light saturation, I_s) I_s เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 700-1300 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ตารางที่ 4) กล่าวคือ ใบปาล์มน้ำมันต้องการความเข้มแสงในระดับปานกลาง ถึงสูง โดยความเข้มแสงที่ต่ำกว่า 700 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เป็นปัจจัยจำกัดอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบปาล์มน้ำมัน และความเข้มแสงที่สูงกว่า 1300 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ไม่ได้เป็นปัจจัยที่มีผลในการเพิ่มอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบให้สูงขึ้น หากแต่ปัจจัยตัวอื่น ได้แก่ อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน กิจกรรมของเอนไซม์รูบิสโก (Rubisco activity) หรือเมตาโบลิซึมของ triose phosphate เข้ามามีบทบาทจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสงแทน (Taiz and Zeiger, 2002) เมื่อเปรียบเทียบ I_s เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 13 โดย I_s เฉลี่ยของสายต้น Lo มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 1327 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ แสดงว่า ใบของสายต้น Lo ต้องการความเข้มแสงที่สูงมาก เพื่อให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) มีค่าสูงสุด สอดคล้องกับ α เฉลี่ยของใบปาล์มในสายต้น Lo ที่มีค่าต่ำมาก และ I_s เฉลี่ยของสายต้น Me มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 662 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ แสดงว่า ใบของสายต้น Me ต้องการความเข้มแสงต่ำกว่าที่จะทำให้ A มีค่าสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบ I_s เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสายต้น Lo และ Sd โดย I_s เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าต่ำกว่าของทางใบที่ 13

ค่า P_m

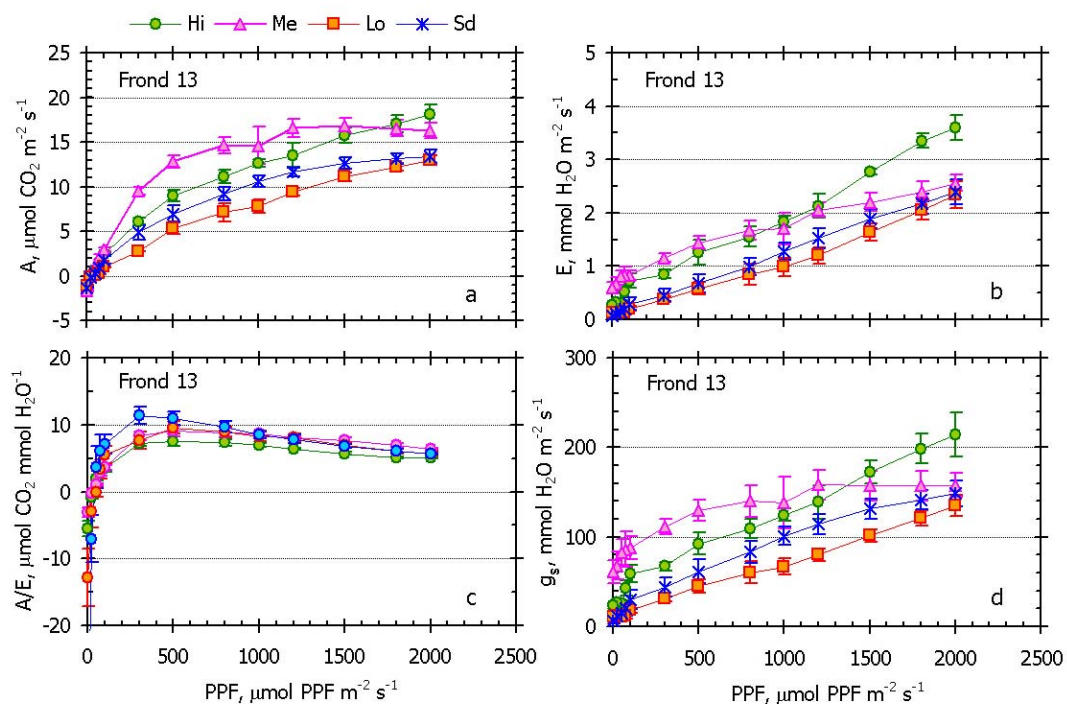
อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (maximum gross photosynthetic rate, P_m) ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 13.30-22.54 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ยกเว้น P_m เฉลี่ยของทางใบที่ 17 ของสายต้น Me ที่มีค่าต่ำผิดปกติ โดยมีค่าเพียง 9.83 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ตารางที่ 4) ค่า P_m เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้ ใกล้เคียงกับที่พบในรายงานก่อนหน้านี้โดย Corley และคณะ (1973) ที่ได้ศึกษาอัตราสังเคราะห์แสงของใบปาล์มในทางใบที่ 2 ของต้นกล้าปาล์ม (DxD) อายุ 1 ปี ที่ได้จากการผสมพันธุ์แบบพหุกันหมด (diallel cross) ระหว่างปาล์ม Deli Dura 4 สายพันธุ์ ที่ปลูกในประเทศมาเลเซีย ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นสารกัมมันตรังสี ($^{14}\text{CO}_2$) พบว่าค่า P_m เฉลี่ยที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสง โดยนำข้อมูลมาเข้าสมการในรูป rectangular hyperbola มีค่าอยู่ในช่วง 19.4-42.4 $\text{mgCO}_2 \text{dm}^{-2} \text{h}^{-1}$ (คำนวณได้เท่ากับ 12.25-26.77 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) และใกล้เคียงกับในรายงานของ Haniff (2006) ที่พบว่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ

(A) ของใบปาล์มในทางใบที่ 1, 9 และ 17 ของต้นปาล์ม (DxP) อายุ 6 ปี ที่ปลูกอยู่ในประเทศ มาเลเซีย มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $13.72-14.57 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ภายใต้สภาพอ้างอิง คือ ความเข้มแสง $1000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ อุณหภูมิ กล้องบรรจุใบ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 60%

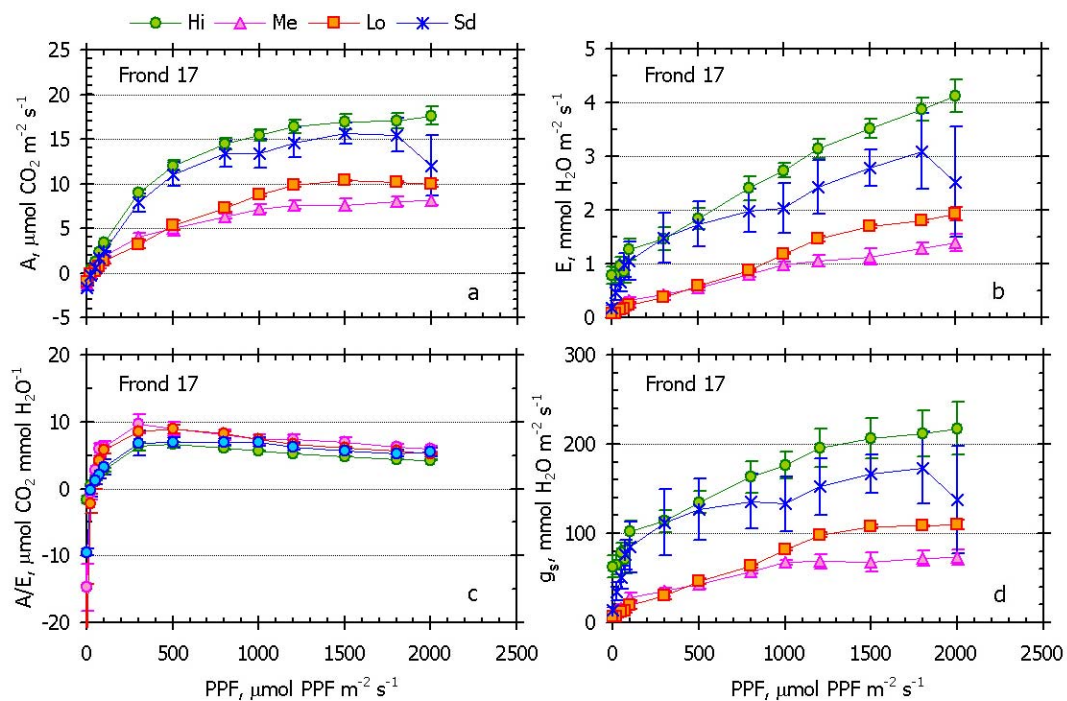
เมื่อเปรียบเทียบ P_m เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 4) พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันในทางใบที่ 13 แต่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 17 โดย P_m เฉลี่ยของทางใบที่ 17 ของสายต้น Hi มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $20.34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และสายต้น Me มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ $9.83 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ขณะที่สายต้น Lo มีค่าเท่ากับ $13.30 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่า P_m เฉลี่ยของทางใบที่ 17 ของสายต้น Me ที่มีค่าต่ำผิดปกติ เนื่องจาก 1) การแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในใบถูกจำกัด พิจารณาได้จากค่าน้ำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s, \text{max}}$) มีค่าต่ำมาก โดยมีค่าเพียง $76.3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งไม่อาจบอกได้ในที่นี้ว่าเกิดจากสาเหตุอะไร (ตารางที่ 4) 2) ระบบแสง (PSII/LHCII complex) บางส่วนได้รับความเสียหายเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการลดต่ำลงของประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII (Φ_{PSII}) (ภาพที่ 7b) และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบสูงสุด (J_{max}) (ตารางที่ 6) ลดต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบ P_m เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่า ค่า P_m ในทางใบที่ 13 สูงกว่าทางใบที่ 17 โดยมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสายต้น Me และ Lo แสดงว่า กระบวนการสังเคราะห์แสงของใบในสายต้น Me และ Lo น่าจะลดต่ำลงตามอายุใบเร็วกว่าสายต้น Hi และ Sd สอดคล้องกับผลการทดลองของสุนทรและคณะ (ไม่เผยแพร่) ที่พบว่า อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด (A_{max}) ของใบปาล์มตามลำดับทางใบในหลายสายต้นที่ปลูกในสวนปาล์มน้ำมัน บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จ.ชุมพร ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน อายุ 8 ปี มีค่าอยู่ในช่วง $0.1-21.0 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ โดยมีค่าสูงสุดในทางใบที่ 13 และ A_{max} ค่อยๆ ลดต่ำลงตามลำดับของทางใบที่มีอายุมากขึ้น ภายใต้สภาพอ้างอิงคือ ความเข้มแสง $2000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ อุณหภูมิกล้องบรรจุใบ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 70-80% วัด A_{max} ในช่วงเวลา 09.00-18.00 น. และมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับในรายงานของ Suresh และ Nagamani (2006) ที่วัดค่า A ของใบปาล์ม ที่ปลูกอยู่ทางตอนใต้ของประเทศอินเดีย ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน อายุ 6 ปี ในช่วงเวลา 10.00-11.30 น. ที่ความเข้มแสงสูงกว่า $1400 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ พบว่าค่า A มีค่าสูงสุดในทางใบที่ 9 อยู่ที่ $9.18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ หลังจากทางใบที่ 9 ค่า A ลดต่ำลงตามลำดับของทางใบ

ค่า R_d

อัตราหายใจในความมืด (dark respiration, R_d) ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $0.79-1.53 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ตารางที่ 4) เมื่อเปรียบเทียบ R_d เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า ระดับความต้องการพลังงานที่ได้จากกระบวนการหายใจ เพื่อนำไปใช้สำหรับการเติบโตและซ่อมแซมส่วนที่เสียหายของแต่ละสายต้นไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบ R_d เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่าเฉพาะสายต้น Hi เท่านั้นที่มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย R_d เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ R_d เฉลี่ยของทางใบที่ 13 R_d เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกับพืช C3 ในกลุ่มไม้ยืนต้น เช่น มะม่วงน้ำดอกไม้ ที่มีค่าเท่ากับ $1.15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (สุนทรี และคณะ, 2543) แต่ต่ำกว่ายูคาลิปตัสที่มีค่า $1.29 - 2.35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (สุนทรี และคัทลียา, 2547)



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส a) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ b) อัตราคายน้ำ c) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และ d) ค่าน้ำไหลปากใบสำหรับไอน้ำของใบปาล์มในทางใบที่ 13 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการศึกษาอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส a) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ b) อัตราคายน้ำ c) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และ d) คำนวณไหลปากใบสำหรับไอน้ำของใบปาล์มในทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm \text{SE}$ ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น P_m คือ อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด, α คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์, θ คือ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ, I_c คือ ความเข้มแสงขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์, I_s คือ ความเข้มแสงที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าสูงสุด, R_d คือ อัตราหายใจในความมืด และ $g_{s, \max}$ คือ คำน่าไหลปากใบสำหรับไอน้ำที่มีค่าสูงสุดขณะวัดการตอบสนองต่อแสง แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	22.54 $\pm$ 3.02	0.037 $\pm$ 0.004 ^{ab}	0.37 $\pm$ 0.06 ^b	44.1 $\pm$ 9.3 ^b	1108 $\pm$ 112 ^b	1.53 $\pm$ 0.23	214.0 $\pm$ 49.5
Me	13	19.09 $\pm$ 1.71	0.046 $\pm$ 0.005 ^a	0.79 $\pm$ 0.06 ^a	30.1 $\pm$ 5.3 ^b	662 $\pm$ 89 ^c	1.35 $\pm$ 0.21	165.3 $\pm$ 27.1
Lo	13	18.68 $\pm$ 1.97	0.019 $\pm$ 0.001 ^c	0.29 $\pm$ 0.09 ^{bc}	66.9 $\pm$ 7.8 ^a	1327 $\pm$ 39 ^a	1.20 $\pm$ 0.15	135.3 $\pm$ 23.8
Sd	13	18.32 $\pm$ 1.41	0.030 $\pm$ 0.009 ^b	0.23 $\pm$ 0.05 ^c	45.4 $\pm$ 16.6 ^b	1151 $\pm$ 116 ^{ab}	1.21 $\pm$ 0.17	148.7 $\pm$ 28.6
P-value		ns	*	*	*	*	ns	ns
CV (%)		10.76	16.23	14.99	22.77	8.86	14.49	20.38

ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	17	20.34±3.09 ^a	0.044±0.005	0.58±0.27	18.7± 3.7	833±205	0.79±0.09	218.0±58.9 ^a
Me	17	9.83±1.58 ^c	0.030±0.001	0.57±0.22	36.1±10.2	715±191	1.02±0.29	76.3±15.3 ^c
Lo	17	13.30±1.35 ^{bc}	0.031±0.011	0.36±0.11	38.3±10.2	974±189	1.06±0.23	112.7± 6.7 ^{bc}
Sd	17	17.80±4.02 ^{ab}	0.041±0.006	0.72±0.11	35.1±11.7	736± 90	1.45±0.64	186.7±76.7 ^{ab}
P-value		*	ns	ns	ns	ns	ns	*
CV (%)		17.89	18.72	34.12	29.46	21.46	34.31	33.06

ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น P_m คือ อัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด, α คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์, θ คือ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ, I_c คือ ความเข้มแสงขณะที่อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิเป็นศูนย์, I_s คือ ความเข้มแสงที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิมีค่าสูงสุด, R_d คือ อัตราหายใจในความมืด และ $g_{s, \max}$ คือค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำที่มีค่าสูงสุดขณะวัดการตอบสนองต่อแสง แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	22.54 $\pm$ 3.02	0.037 $\pm$ 0.004	0.37 $\pm$ 0.06	44.1 $\pm$ 9.3 ^a	1108 $\pm$ 112	1.53 $\pm$ 0.23 ^a	214.0 $\pm$ 49.5
Hi	17	20.34 $\pm$ 3.09	0.044 $\pm$ 0.005	0.58 $\pm$ 0.27	18.7 $\pm$ 3.7 ^b	833 $\pm$ 205	0.79 $\pm$ 0.09 ^b	218.0 $\pm$ 58.9
P-value		ns	ns	ns	*	ns	*	ns
CV (%)		14.25	11.97	40.54	22.46	17.02	15.03	25.19

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Me	13	19.09 $\pm$ 1.71 ^a	0.046 $\pm$ 0.005 ^a	0.79 $\pm$ 0.06	30.1 $\pm$ 5.3	662 $\pm$ 89	1.35 $\pm$ 0.21	165.3 $\pm$ 27.1 ^a
Me	17	9.83 $\pm$ 1.58 ^b	0.030 $\pm$ 0.001 ^b	0.57 $\pm$ 0.22	36.1 $\pm$ 10.2	715 $\pm$ 191	1.02 $\pm$ 0.29	76.3 $\pm$ 15.3 ^b
P-value		*	*	ns	ns	ns	ns	*
CV (%)		11.37	9.13	23.95	24.56	21.60	21.34	18.19

ตารางที่ 5 (ต่อ)

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Lo	13	18.68±1.97 ^a	0.019±0.001	0.29±0.09	66.9± 7.8 ^a	1327± 39 ^a	1.20±0.15	135.3±23.8
Lo	17	13.30±1.35 ^b	0.031±0.011	0.36±0.11	38.3±10.2 ^b	974±189 ^b	1.06±0.23	112.7± 6.7
P-value		*	ns	ns	*	*	ns	ns
CV (%)		10.55	31.71	30.10	17.21	11.84	17.04	14.09

สายต้น	ทางใบ	P_m ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ PPF}$)	θ	I_c ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	I_s ($\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	$g_{s, \max}$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Sd	13	18.32±1.41	0.030±0.009	0.23±0.05 ^b	45.4±16.6	1151±116 ^a	1.21±0.17	148.7±28.6
Sd	17	17.80±4.02	0.041±0.006	0.72±0.11 ^a	35.1±11.7	736± 90 ^b	1.45±0.64	186.7±76.7
P-value		ns	ns	*	ns	*	ns	ns
CV (%)		16.69	20.15	18.01	35.67	11.01	34.96	34.52

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

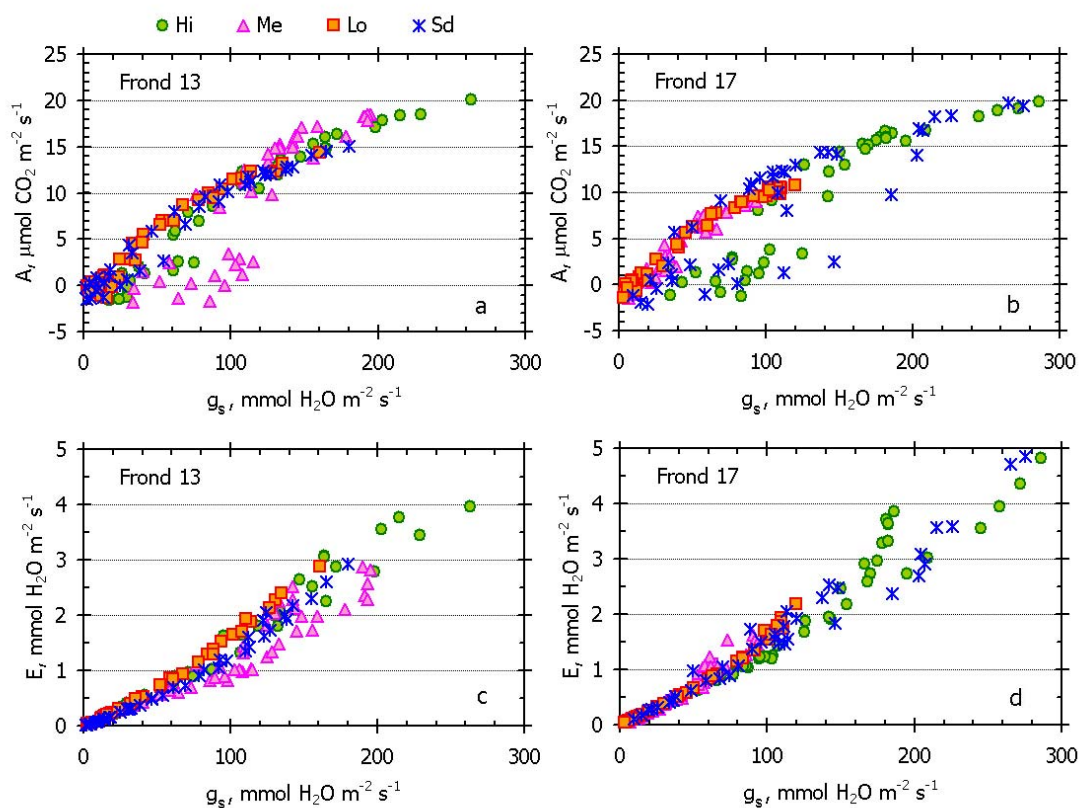
ค่า g_s

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำ (stomatal conductance, g_s) (ภาพที่ 4d และ 5d) พบว่า ในช่วงที่ความเข้มแสงต่ำกว่าจุดชดเชยแสง ($I_c = 60 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) g_s เฉลี่ยของแต่ละสายต้นมีการตอบสนองต่อความเข้มแสงต่างกัน โดย g_s เฉลี่ยในทางใบที่ 13 ของสายต้น Hi และ Me กับ g_s เฉลี่ยในทางใบที่ 17 ของสายต้น Hi และ Sd ตอบสนองต่อความเข้มแสงในช่วงนี้มาก ทำให้ g_s มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเข้มแสง เมื่อความเข้มแสงสูงกว่าจุดชดเชยแสง (สูงกว่า $60 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) g_s ของใบปาล์มทุกใบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเพิ่มเกือบเป็นเส้นตรงในทางใบที่ 13 แต่เมื่อความเข้มแสงสูงกว่า $1000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่านำไหลปากใบเริ่มขึ้นถึงระดับสูงสุดคงที่ในบางสายต้น ค่าสูงสุด ($g_{s, \text{max}}$) ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $76.3\text{--}218.0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ตารางที่ 4) ค่าสูงสุดที่ได้ยังต่ำกว่าที่เสนอในรายงานของ Haniff (2006) ที่พบว่าค่านำไหลปากใบ (g_s) ของใบปาล์มในทางใบที่ 1, 9 และ 17 ของต้นปาล์ม (DxP) อายุ 6 ปี ที่ปลูกอยู่ในประเทศมาเลเซีย มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง $286.8\text{--}308.9 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เมื่อวัดภายใต้สภาพอ้างอิง คือ ความเข้มแสง $1000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ $400 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{air}$ อุณหภูมิกลองบรรจุใบ 30°C และความชื้นสัมพัทธ์ 60%

เมื่อเปรียบเทียบค่านำไหลปากใบสูงสุด ($g_{s, \text{max}}$) เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 4) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 17 โดย $g_{s, \text{max}}$ เฉลี่ยของสายต้น Hi มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $218.0 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และ $g_{s, \text{max}}$ เฉลี่ยของสายต้น Me มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ $76.3 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และเมื่อเปรียบเทียบ $g_{s, \text{max}}$ เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 5) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเฉพาะใบของสายต้น Me เท่านั้น โดย $g_{s, \text{max}}$ เฉลี่ยของใบในทางใบที่ 17 มีค่าลดต่ำลงมากเมื่อเทียบกับ $g_{s, \text{max}}$ เฉลี่ยของใบในทางใบที่ 13 อาจเนื่องจากระบบแสง (PSII/LHCII complex) บางส่วนได้รับความเสียหายเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น พิจารณาได้จากค่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (Φ_{PSII}) (ภาพที่ 8) ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิลดต่ำลง ดังนั้นจึงลดค่านำไหลปากใบลง เพื่อลดอัตราการคายน้ำ (ภาพที่ 5b)

ค่านำไหลปากใบเป็นค่าที่แสดงถึงความยากง่ายของเส้นทางการแพร่โมเลกุลแก๊สผ่านปากใบ ค่าที่มากแสดงว่าการแพร่โมเลกุลแก๊สทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำผ่านปากใบเกิดขึ้นได้ดี (ความเร็วในการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ช้ากว่าไอน้ำ 1.6 เท่า) ค่านำไหลปากใบจึงมี

บทบาทสำคัญในการควบคุมอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สในใบพืช โดยอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) ผันแปรตามค่าน้ำไหลปากใบช่วงหนึ่ง (ภาพที่ 6a และ 6b) แสดงว่า ปากใบควบคุมการแพร่ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในใบ หลังจากนั้น A ผันแปรตามค่าน้ำไหลปากใบน้อยลง แสดงว่าในช่วงนี้ปากใบมีบทบาทน้อยกว่ากระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (carboxylation) และอัตราคายน้ำ (E) ของใบปาล์มผันแปรตามค่าน้ำไหลปากใบ (ภาพที่ 6c และ 6d) แสดงถึงค่าแรงดึงคายน้ำจากใบสู่อากาศ ($VPD_{leaf-air}$) ที่สูงคงที่ ทำให้ปากใบเป็นตัวกำหนดอัตราคายน้ำ ผลการทดลองของ Smith (1989) พบว่า อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบจากสายต้นปาล์มที่ปลูกในอเมริกาใต้ ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน มีค่าสูงคงที่เมื่อ g_s มีค่าประมาณ $200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ภายใต้ความเข้มแสงสูงกว่า $500 \text{ } \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิกับค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) และอัตราการคายน้ำกับค่านำไหลปากใบสำหรับไอน้ำในทางใบที่ 13 (c) และทางใบที่ 17 (d) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง

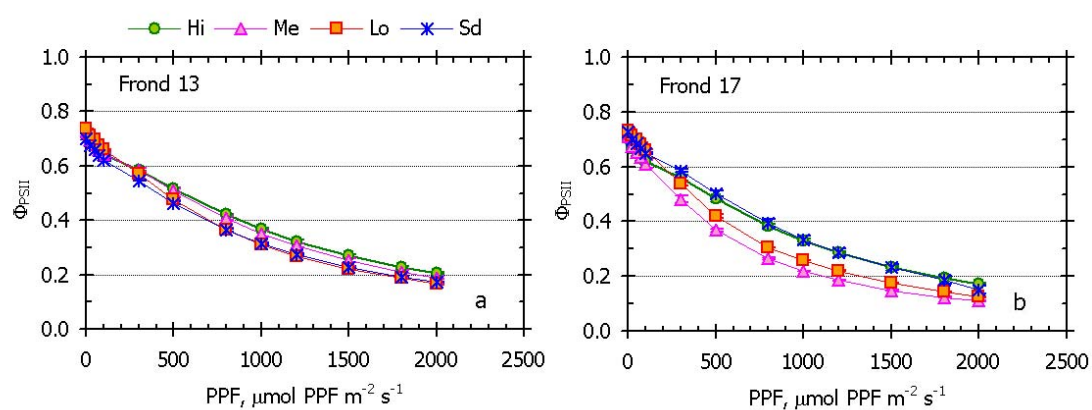
ค่า Φ_{PSII}

ห้ววัดแบบ leaf chamber fluorometer สามารถวัดปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์ที่เรืองออกมาจากใบเมื่อใบได้รับความเข้มแสงหนึ่งๆ ซึ่งจะทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (quantum efficiency of PSII electron transport, Φ_{PSII}) และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (linear whole-chain electron transport rate, J) ได้ ผลที่ได้แสดงในภาพที่ 7 8 และ 9 เมื่อความเข้มแสงภายในกล่องบรรจุใบมีค่าเป็นศูนย์ Φ_{PSII} จะมีค่าสูงที่สุด เนื่องจากตัวรับอิเล็กตรอนที่สำคัญของระบบ PSII (quinone acceptor molecules, Q_A , Q_B และ PQ) อยู่ในสภาพออกซิไดซ์ คือ เปิดเต็มที่ในการรับอิเล็กตรอน ทำให้สัดส่วนจำนวนโมเลกุลของ quinone acceptor ที่อยู่ในสภาพที่ถูกรีดิวซ์ เทียบกับจำนวนโมเลกุลของ quinone acceptor ทั้งหมด, $Q_A^- / Q_A + Q_A^-$, มีค่าเท่ากับศูนย์ (Rosenqvist and Kooten, 2003) ในสภาพรีดิวซ์ โมเลกุล quinone acceptor ได้รับอิเล็กตรอนแล้ว และไม่สามารถรับอิเล็กตรอนเพิ่มได้อีกจนกว่าจะเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลตัวรับอิเล็กตรอนตัวถัดไป Φ_{PSII} สูงสุดของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.702-0.735 หมายความว่า พลังงานแสงที่ใบดูดกลืนถูกถ่ายทอดไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยาและนำไปใช้ในกระบวนการ photochemistry ได้ 70-74% ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าสูงสุดที่วัดใบในสภาพมืด ($\Phi_{dark} = F_v/F_m$) ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษาก่อนหน้านี้ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.795-0.830 เนื่องจากในสภาพสว่าง มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (configuration) ในส่วนของ LHCII เกิดขึ้น จากรูปที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคแสงเข้าสู่ศูนย์กลางปฏิกิริยาของระบบ PSII ไปอยู่ในรูปที่ทำหน้าที่ถ่ายเทพลังงานจากอนุภาคแสงไปเป็นความร้อน เพื่อควบคุมระดับของพลังงานกระตุ้นที่เข้าสู่ระบบ PSII (Horton *et al.*, 1996) การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ LHCII สูญเสียความสามารถในการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในรูปของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ ผลที่ตามมา คือ ปริมาณรังสีฟลูออเรสเซนซ์สูงสุดในสภาพสว่าง (F_m') ที่ใช้คำนวณ Φ_{PSII} ลดต่ำลง (Rosenqvist and Kooten, 2003)

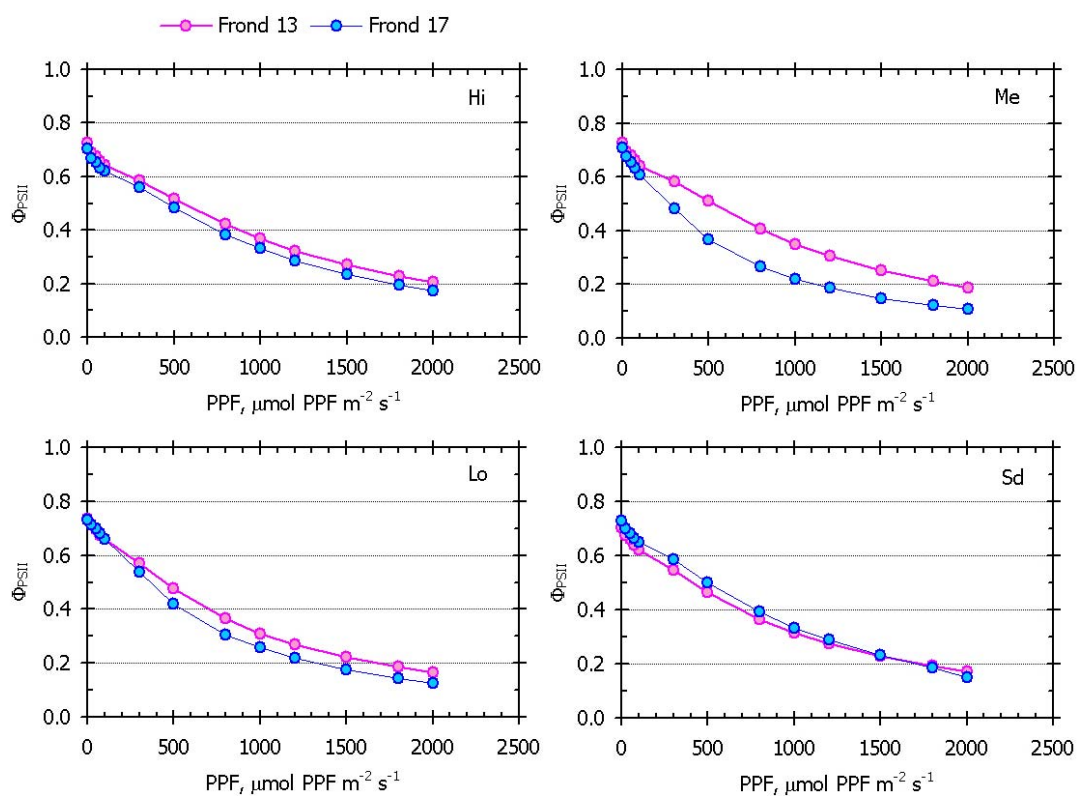
เมื่อเพิ่มความเข้มแสงภายในกล่องบรรจุใบให้สูงขึ้น Φ_{PSII} จะมีค่าลดต่ำลง เนื่องจาก quinone acceptor บางส่วนรับอิเล็กตรอนและอยู่ในสภาพที่ถูกรีดิวซ์ ($Q_A^- / Q_A + Q_A^-$ มีค่ามากกว่าศูนย์) ทำให้พลังงานแสงส่วนเกินที่ใบได้รับไม่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการ photochemistry ขณะที่ความเข้มแสงเท่ากับช่วงจุดอิ่มตัวแสง (I_s มีค่าในช่วง $700-1300 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่า Φ_{PSII} มีค่าลดต่ำลงประมาณ 50% เมื่อเทียบกับ Φ_{PSII} สูงสุด และที่ความเข้มแสง $2000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่า Φ_{PSII} ลดต่ำลงมากที่สุด โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.10-0.20 กล่าวคือ ที่ความเข้มแสง $2000 \mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$

พลังงานแสงที่ใบได้รับถูกถ่ายทอดไปยังศูนย์กลางปฏิกิริยาและนำไปใช้ในกระบวนการ photochemistry ได้เพียง 10-20%

เมื่อเปรียบเทียบระบบใช้แสงระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ภาพที่ 7) พบว่าเส้นตอบสนองต่อความเข้มแสงของ Φ_{PSII} ของใบในสายต้น Hi อยู่ในระดับสูงกว่าสายต้นอื่นทั้ง 2 ทางใบ และการตอบสนองต่อความเข้มแสงของ Φ_{PSII} ของใบในสายต้น Lo มีค่าต่ำทั้ง 2 ทางใบ เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองต่อความเข้มแสงของ Φ_{PSII} ระหว่างทางใบในสายต้นเดียวกัน (ภาพที่ 8) พบว่า ค่า Φ_{PSII} ของใบในทางใบที่ 17 ของสายต้น Me ลดต่ำลงจากทางใบที่ 13 มากเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน แสดงว่า ระบบแสง (PSII/LHCII complex) บางส่วนในทางใบนี้ได้รับความเสียหายเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน a) ทางใบที่ 13 และ b) ทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน a) สายต้น Hi b) สายต้น Me c) สายต้น Lo และ d) ต้น Sd ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ครั้ง

ค่า J

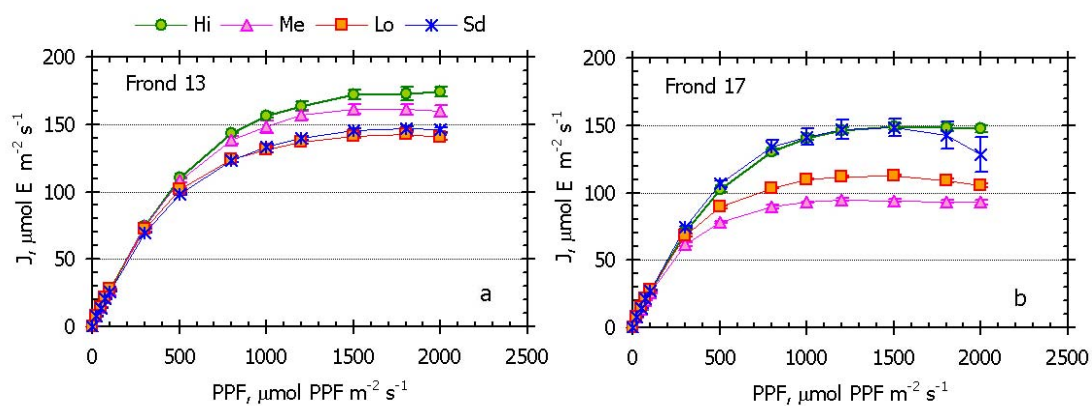
ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (rate of linear whole-chain electron transport, J) ของใบปาล์มน้ำมันทั้ง 4 สายต้น แสดงในภาพที่ 9 ความสัมพันธ์มีลักษณะที่คล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (ภาพที่ 4a และ 5a) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ด้วยสมการ non-rectangular hyperbola (สมการที่ 7) โดยแบ่งความสัมพันธ์ได้เป็น 2 ช่วง ดังนี้

ค่า α_j

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ความเข้มแสงเป็นปัจจัยจำกัดอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน เมื่อความเข้มแสงที่ใบได้รับเท่ากับศูนย์ อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์มมีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะอิเล็กตรอนถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของโมเลกุลน้ำ (photo-oxidation of water) และกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนผ่านตัวรับส่งอิเล็กตรอนของระบบแสงใช้พลังงานจากอนุภาคแสง เมื่อความเข้มแสงภายในกล่องบรรจุใบเพิ่มสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบกับความเข้มแสงที่ใบได้รับในช่วงที่แสงเป็นปัจจัยจำกัดช่วง 0-100 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ มีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าความชันเริ่มต้น (initial slope) แสดงถึงประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum quantum efficiency of linear whole-chain electron transport, α_j) α_j เฉลี่ยของใบปาล์มในสภาพบรรยากาศปกติ ที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 0.243-0.279 $\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$ (ตารางที่ 6) หมายความว่า ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ 1 โมลต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบได้รับ 3.59-4.12 โมล ($1/\alpha_j$) ค่า α_j เฉลี่ยของใบปาล์มต่ำกว่า α_j สูงสุดในทางทฤษฎีที่มีค่าเท่ากับ 0.5 $\text{mol E mol}^{-1} \text{ photon}$ (Farquhar *et al.*, 1980) (กระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ 1 โมลต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบได้รับ 2 โมล) เนื่องจาก α_j สูงสุดในทางทฤษฎีจะเป็นจริงต่อเมื่อ ใบพืชสามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้ 100% (light absorption of leaves = 1) และพลังงานแสงที่ระบบ PSII ได้รับถูกนำไปใช้ในกระบวนการ photochemistry ได้ทั้งหมด ($\Phi_{\text{PSII}} = 1$) แต่ α_j เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้ อยู่ภายใต้สมมติฐานว่า ใบปาล์มดูดกลืนพลังงานแสงได้ 85% (light absorption of leaves = 0.85) ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของใบพืช C3 จำนวน 37 species ที่มีเท่ากับ 0.838 ± 0.006 (ในช่วงความยาวคลื่น 400-750 nm) (Björkman and Demmig, 1987) และ Φ_{PSII} ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่า 1 ขึ้นกับความเข้มแสงที่ใบได้รับ ณ ขณะนั้น ดังนั้น

กระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์ม 1 โมล ต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบได้รับมากกว่า 2 โมล α_j เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าต่ำกว่า α_j ของใบยูคาลิปตัส (*Eucalyptus maculate*) ที่พัฒนาเต็มที่แล้ว ที่ได้จากการศึกษา chlorophyll fluorescence มีค่าเท่ากับ $0.316 \text{ mol E mol}^{-1} \text{ photon}$ ภายใต้สภาพอ้างอิงคือ แรงดันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 35 Pa และอุณหภูมิใบ $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ (Örgen and Evans, 1993)

เมื่อเปรียบเทียบ α_j เฉลี่ยของทางใบเดียวกันระหว่างสายต้น (ตารางที่ 6) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย α_j เฉลี่ยในทางใบที่ 13 ของสายต้น Lo มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $0.279 \text{ mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$ ($3.59 \text{ mol PPF mol}^{-1} \text{ E}$) และมีค่าต่ำที่สุดในต้น Sd เท่ากับ $0.264 \text{ mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$ ($3.80 \text{ mol PPF mol}^{-1} \text{ E}$) แสดงว่า ระบบแสง (PSII/LHCII complex) ของใบปาล์มสายต้น Lo ทำงานได้ดีในช่วงที่ความเข้มแสงต่ำ ส่วนค่า α_j เฉลี่ยในทางใบที่ 17 พบว่าสายต้น Me มีค่าต่ำกว่าสายต้นอื่น โดยมีค่าเพียง $0.243 \text{ mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$ ($4.12 \text{ mol PPF mol}^{-1} \text{ E}$) และเมื่อเปรียบเทียบ α_j เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 7) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในสายต้น Me และต้น Sd โดย α_j เฉลี่ยในทางใบที่ 17 ของสายต้น Me มีค่าต่ำกว่าในทางใบที่ 13 และ α_j เฉลี่ยในทางใบที่ 17 ของต้น Sd มีค่าสูงกว่าในทางใบที่ 13 แสดงว่า ระบบแสง (PSII/LHCII complex) ของใบปาล์มต้น Sd ยังคงทำงานในช่วงที่ความเข้มแสงต่ำได้ดี เมื่ออายุใบเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน a) ทางใบที่ 13 และ b) ทางใบที่ 17 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ความเข้มแสงไม่ได้เป็นปัจจัยจำกัดอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน โดยที่อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเริ่มมีค่าสูงคงที่ ในช่วงนี้เป็นช่วงที่ได้พารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum rate of linear whole-chain electron transport, $J_{\max}$)

ค่า $J_{\max}$

อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ (maximum rate of linear whole-chain electron transport, $J_{\max}$) เป็นค่าที่แสดงถึงศักยภาพสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ เกิดในขณะที่ได้รับแสงเพียงพอ ค่า $J_{\max}$ เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้อยู่ในช่วง 114.43-189.21 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ยกเว้น $J_{\max}$ เฉลี่ยในทางใบที่ 17 ของสายต้น Me ที่มีค่าต่ำผิดปกติ โดยมีค่าเพียง 94.94 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ตารางที่ 6) เนื่องจากค่า Φ_{PSII} ลดต่ำลงมาก (ภาพที่ 8b) $J_{\max}$ เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าต่ำกว่า $J_{\max}$ ของใบยูคาลิปตัส (*E. maculate*) ที่มีค่าเท่ากับ 223 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ภายใต้สภาพอ้างอิงคือ แรงดันแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 35 Pa และอุณหภูมิใบ $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ (Örgen and Evans, 1993)

เมื่อเปรียบเทียบค่า $J_{\max}$ เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 6) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย $J_{\max}$ เฉลี่ยในทางใบที่ 13 ของสายต้น Hi มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 189.21 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และมีค่าต่ำที่สุดในสายต้น Lo เท่ากับ 151.81 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ส่วน $J_{\max}$ เฉลี่ยในทางใบที่ 17 ของสายต้น Hi และ Sd มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 158.15 และ 154.41 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ และมีค่าต่ำที่สุดในสายต้น Me เท่ากับ 94.94 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่า $J_{\max}$ เฉลี่ยของสายต้น Hi ที่มีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายต้นอื่นทั้ง 2 ทางใบ เมื่อพิจารณาพร้อมกับลักษณะการตอบสนองต่อความเข้มแสงของ Φ_{PSII} (ภาพที่ 7) และปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัม ซึ่งมีปริมาณน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสายต้นอื่น (ตารางที่ 2) สรุปได้ว่า ระบบแสง (PSII/LHCII complex) ของใบในสายต้น Hi อยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสมบูรณ์และทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอัตราเร็วของปฏิกิริยาในวัฏจักรคาลวินเกิดขึ้นได้ค่อนข้างดี พิจารณาได้จากค่าประสิทธิภาพของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (carboxylation efficiency, g_m) (ตารางที่ 10) ส่วน $J_{\max}$ เฉลี่ยของสายต้น Lo ที่มีค่าต่ำทั้ง 2 ทางใบ เมื่อพิจารณาพร้อมกับลักษณะการตอบสนองต่อความเข้มแสงของ Φ_{PSII} (ภาพที่ 7) และปริมาณคลอโรฟิลล์ในหน่วยกรัม ซึ่งมีปริมาณที่มากกว่าสายต้น Hi (ตารางที่ 2) สรุปได้ว่า

ระบบแสง (PSII/LHCII complex) ของใบในสายต้น Lo อยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสมบูรณ์ แต่เมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำงานของระบบแสงลดต่ำกว่าสายต้น Hi

เมื่อเปรียบเทียบ J_{max} เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 7) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญใน 3 สายต้น ยกเว้นต้น Sd โดย J_{max} เฉลี่ยของทางใบที่ 17 มีค่าลดต่ำลงเมื่อเทียบกับทางใบที่ 13 แสดงให้เห็นว่า J_{max} เฉลี่ยมีแนวโน้มลดต่ำลงตามลำดับของทางใบ อาจเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของระบบ PSII ตามอายุใบทำให้ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในสภาพสว่าง (Φ_{PSII}) ลดต่ำลง และ/หรือ ความเข้มแสงที่ใบได้รับลดต่ำลงตามลำดับของทางใบ

ตารางที่ 6 พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น $J_{\max}$ คือ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ และ α_J คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Hi	13	189.21 $\pm$ 13.32 ^a	0.273 $\pm$ 0.005 ^b
Me	13	172.50 $\pm$ 8.64 ^b	0.272 $\pm$ 0.003 ^b
Lo	13	151.81 $\pm$ 4.43 ^c	0.279 $\pm$ 0.001 ^a
Sd	13	159.70 $\pm$ 2.95 ^{bc}	0.264 $\pm$ 0.003 ^c
P-value		*	*
CV (%)		4.98	1.16

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Hi	17	158.15 $\pm$ 5.29 ^a	0.263 $\pm$ 0.010 ^a
Me	17	94.94 $\pm$ 4.28 ^c	0.243 $\pm$ 0.015 ^b
Lo	17	114.43 $\pm$ 2.89 ^b	0.274 $\pm$ 0.005 ^a
Sd	17	154.41 $\pm$ 14.78 ^a	0.275 $\pm$ 0.004 ^a
P-value		*	*
CV (%)		6.33	3.52

ค่าเฉลี่ยในแนวดังที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ได้จากฟังก์ชัน non-rectangular hyperbola ของเส้นตอบสนองต่อแสงของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบของใบปาล์มทางใบที่ 13 และทางใบที่ 17 ของแต่ละสายต้น $J_{\max}$ คือ อัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ และ α_J คือ ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Hi	13	189.21 $\pm$ 13.32 ^a	0.273 $\pm$ 0.005
Hi	17	158.15 $\pm$ 5.29 ^b	0.263 $\pm$ 0.010
P-value		*	ns
CV (%)		5.84	2.79

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Me	13	172.50 $\pm$ 8.64 ^a	0.272 $\pm$ 0.003 ^a
Me	17	94.94 $\pm$ 4.28 ^b	0.243 $\pm$ 0.015 ^b
P-value		*	*
CV (%)		5.10	4.08

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 7 (ต่อ)

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Lo	13	151.81 $\pm$ 4.43 ^a	0.279 $\pm$ 0.001
Lo	17	114.43 $\pm$ 2.89 ^b	0.274 $\pm$ 0.005
P-value		*	ns
CV (%)		2.81	1.31

สายต้น	ทางใบ	$J_{\max}$ ($\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	α_J ($\text{mol E mol}^{-1} \text{ PPF}$)
Sd	13	159.70 $\pm$ 2.95	0.264 $\pm$ 0.003 ^b
Sd	17	154.41 $\pm$ 14.78	0.275 $\pm$ 0.004 ^a
P-value		ns	*
CV (%)		6.79	1.30

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

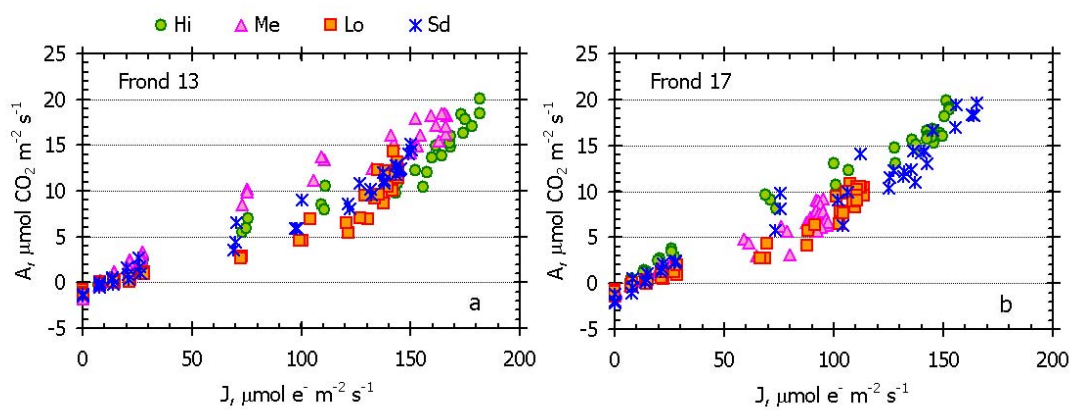
* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ค่า dA/dJ

เนื่องจากอัตราตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ จะควบกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า A กับ J จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง (ภาพที่ 10) ทำให้สามารถคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญได้ 2 ค่า พารามิเตอร์ที่หนึ่ง คือ ค่าความชันที่ได้จากการสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (dA/dJ , $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$) dA/dJ ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.084-0.116 $\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$ (ตารางที่ 8) หมายความว่า ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ต้องใช้อิเล็กตรอนที่ได้จากกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบจำนวน 8.62-11.91 โมล (dJ/dA) และในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ 1 โมลต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบได้รับ 3.59-4.12 โมล ($1/\alpha_p$) ดังนั้นจากการศึกษาอัตราตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ควบกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบในใบปาล์มน้ำมัน สรุปได้ว่ากระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบดูดกลืน 30.9-49.1 โมล ($dJ/dA \times 1/\alpha_p$, $\text{mol PPF mol}^{-1} \text{ CO}_2$) ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการประเมินประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (α) ซึ่งพบว่า ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ต้องใช้พลังงานจากอนุภาคแสงที่ใบดูดกลืน 22-53 โมล

พารามิเตอร์ที่สอง คือ จุดตัดแกน A เมื่อ J มีค่าเท่ากับ 0 (A -intercept, $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) A -intercept เป็นค่าที่สะท้อนอัตราหายใจในความมืด (R_d) ค่าติดลบมาก แสดงว่า ใบมีอัตราหายใจในความมืดสูง A -intercept ของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง -0.25 ถึง -1.55 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (ตารางที่ 8) เมื่อเปรียบเทียบ A -intercept เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดย A -intercept เฉลี่ยของใบในสายต้น Lo มีค่าต่ำที่สุดทั้งทางใบที่ 13 และ 17 โดยมีค่าเท่ากับ -1.55 และ -1.44 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ตามลำดับ แสดงว่า ใบของสายต้น Lo มีอัตราหายใจในความมืดสูงกว่าสายต้นอื่น และเมื่อเปรียบเทียบ A -intercept เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 9) พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทุกสายต้น แสดงว่า อัตราหายใจในความมืดระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ ในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดย วัด 3 ซ้ำ

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของใบปาล์ม ค่า dA/dJ คือความชันของเส้นกราฟ A-intercept คือ จุดตัดแกน A เมื่อ J มีค่าเท่ากับ 0 แสดงแยกเปรียบเทียบ สายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$)	R^2	A-intercept ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	0.096 ± 0.005^{ab}	0.96	-1.01 ± 0.27^{ab}
Me	13	0.108 ± 0.009^a	0.98	-0.38 ± 0.33^a
Lo	13	0.084 ± 0.009^b	0.92	-1.55 ± 0.21^b
Sd	13	0.092 ± 0.006^b	0.98	-1.14 ± 0.54^b
P-value		*		*
CV (%)		7.92		35.16

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$)	R^2	A-intercept ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	17	0.116 ± 0.011	0.99	-0.25 ± 0.54^a
Me	17	0.087 ± 0.015	0.96	-0.80 ± 0.25^{ab}
Lo	17	0.096 ± 0.003	0.94	-1.44 ± 0.19^b
Sd	17	0.108 ± 0.016	0.97	-0.98 ± 0.40^b
P-value		ns		*
CV (%)		12.03		42.73

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 9 พารามิเตอร์จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบที่ได้จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของใบปาล์ม ค่า dA/dJ คือความชันของเส้นกราฟ A-intercept คือ จุดตัดแกน A เมื่อ J มีค่าเท่ากับ 0 แสดงแยกเปรียบเทียบ ทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$)	R^2	A-intercept ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	0.096 ± 0.005^b	0.96	-1.01 ± 0.27
Hi	17	0.116 ± 0.011^a	0.99	-0.25 ± 0.54
P-value		*		ns
CV (%)		7.77		68.16

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ E}$)	R^2	A-intercept ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Me	13	0.108 ± 0.009	0.98	-0.38 ± 0.33
Me	17	0.087 ± 0.015	0.96	-0.80 ± 0.25
P-value		ns		ns
CV (%)		12.78		49.48

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ (mol CO ₂ mol ⁻¹ E)	R ²	A-intercept (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
Lo	13	0.084±0.009	0.92	-1.55±0.21
Lo	17	0.096±0.003	0.94	-1.44±0.19
P-value		ns		ns
CV (%)		7.48		13.48

สายต้น	ทางใบ	dA/dJ (mol CO ₂ mol ⁻¹ E)	R ²	A-intercept (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)
Sd	13	0.092±0.006	0.98	-1.14±0.54
Sd	17	0.108±0.016	0.97	-0.98±0.40
P-value		ns		ns
CV (%)		12.01		44.53

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาเส้นตอบสนองต่อแสงของใบปาล์มน้ำมัน แสดงให้เห็นว่า ความเข้มแสงในช่วงประมาณ 0-1000 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เป็นปัจจัยจำกัดกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มน้ำมัน (พิจารณาได้จากค่า I_0) เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้แสงของใบปาล์มเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบและกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละสายต้น พบว่า

ใบของสายต้น Hi มีประสิทธิภาพการใช้แสงตลอดช่วงความเข้มแสงที่ใช้ศึกษาดีที่สุด (พิจารณาได้จาก Φ_{PSII} , α_j , J_{max} และ α) นอกจากนี้ ค่านำไหลปากใบของสายต้น Hi ยังตอบสนองต่อความเข้มแสงที่ต่ำได้ดี และค่าสูงสุดมีค่าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายต้นอื่นทั้ง 2 ทางใบ (พิจารณาได้จากเส้นตอบสนองต่อแสงของค่านำไหลปากใบ และ $g_{s, \text{max}}$) ทำให้การแลกเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำระหว่างอากาศภายนอกกับใบพืชเกิดขึ้นได้ดี

ใบของสายต้น Me มีประสิทธิภาพการใช้แสงตลอดช่วงความเข้มแสงได้ดีในทางใบที่ 13 โดยมีค่า Φ_{PSII} , α_j , J_{max} ต่ำกว่าทางใบที่ 13 ของสายต้น Hi เล็กน้อย แต่ประสิทธิภาพการใช้แสงในทางใบที่ 17 ของสายต้น Me มีค่าลดต่ำลงจากทางใบที่ 13 มากและมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสายต้นอื่นในทางใบเดียวกัน 1) การแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศภายนอกเข้าสู่ภายในใบถูกจำกัด 2) ระบบแสง (PSII/LHCII complex) บางส่วนได้รับความเสียหายเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII (Φ_{PSII}) และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบสูงสุด (J_{max}) ลดต่ำลง

ใบของสายต้น Lo มีประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ในช่วงที่ความเข้มแสงต่ำ (ช่วง 0-100 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ได้ดี (พิจารณาได้จาก Φ_{PSII} และ α_j) แต่เมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ลดต่ำลงอย่างรวดเร็วทั้ง 2 ทางใบ ทำให้ J_{max} มีค่าต่ำ แสดงว่าระบบแสงของใบปาล์มในสายต้นนี้เกิดความเสียหายได้ง่ายเมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ ค่านำไหลปากใบของสายต้น Lo ยังตอบสนองต่อความเข้มแสงที่ต่ำได้น้อย และค่าสูงสุดมีค่าต่ำทั้ง 2 ทางใบ

ใบของต้น Sd มีประสิทธิภาพการใช้แสงต่ำกว่าทางใบที่ 13 ของสายต้น Hi แต่ใบของต้น Sd สามารถรักษาระดับของประสิทธิภาพการใช้แสงไม่ให้ลดต่ำลงตามลำดับ (ไม่แตกต่างตามอายุ) ของทางใบมากนัก (พิจารณาได้จากการเปรียบเทียบเส้นตอบสนองต่อแสงของ Φ_{PSII} และ J ระหว่าง

ทางใบที่ 13 และ 17) ในขณะที่ประสิทธิภาพการใช้แสงของใบปาล์มทุกสายต้นลดต่ำลงตามลำดับ (อายุ) ทางใบเร็วกว่าใบของต้น Sd ชัดเจน แสดงว่า ใบปาล์มที่ได้จากสายต้น น่าจะเกิดการเสื่อมสภาพของระบบแสงตามลำดับ (อายุ) ทางใบเร็วกว่าใบของต้นที่ได้จากเมล็ด

ในส่วนของการหายใจในความมืด (R_d) ของใบปาล์มแต่ละสายต้น พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน จากการศึกษาเห็นได้ชัดว่าค่าน้ำไหลปากใบ (g_s) มีบทบาทที่สำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและการคายน้ำของใบปาล์ม ดังนั้น ปัจจัยที่มีบทบาทควบคุมค่าน้ำไหลปากใบ ได้แก่ ปริมาณน้ำในดิน ความเข้มแสง และแรงดึงคายน้ำจากใบสู่อากาศ (leaf to air vapour pressure deficit, $VPD_{leaf-air}$) จะเข้ามามีบทบาทกำหนดอัตราสังเคราะห์แสงและอัตราการคายน้ำด้วย

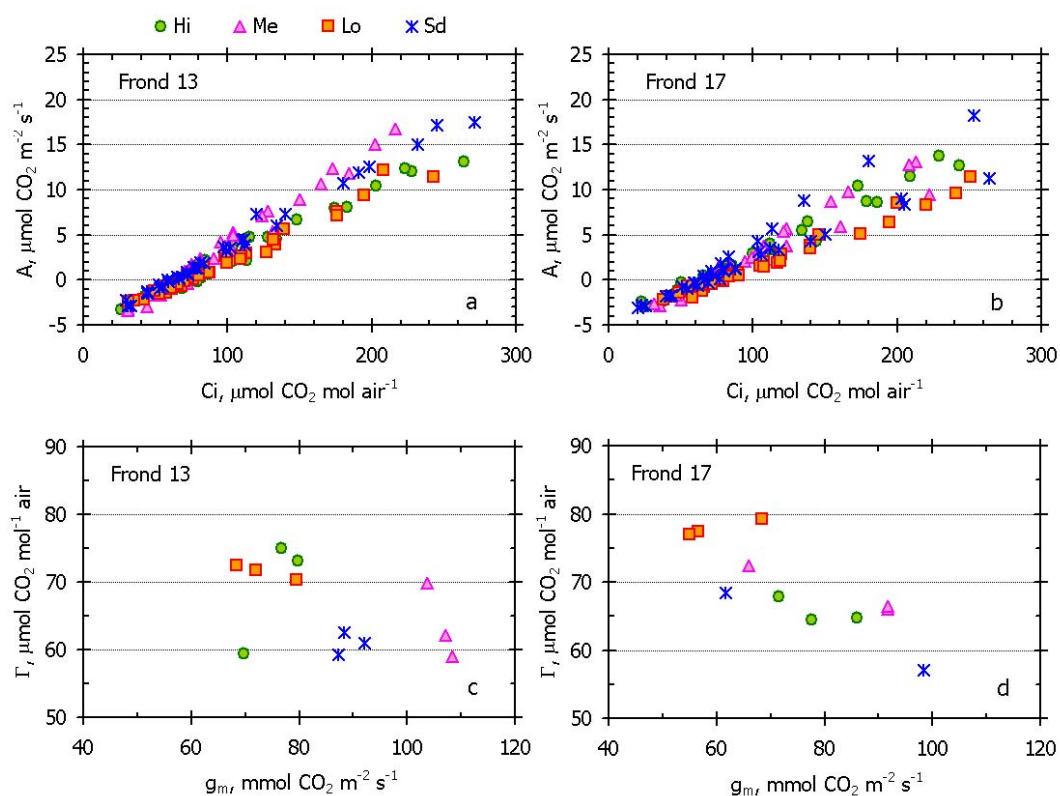
4. จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 compensation) และค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (mesophyll conductance)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบของใบปาล์ม พบว่า ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นแบบเส้นตรง (ภาพที่ 11a และ 11b) ทำให้สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญได้ 2 ค่า พารามิเตอร์แรก คือ จุดตัดแกนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบ (C_i) ที่ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (A) เป็นศูนย์ เรียกค่านี้ว่า จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 compensation, Γ) ค่านี้เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีการศึกษากันมากรวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้อง (Farquhar and von Caemmerer, 1982) พืชที่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงแบบ C_3 จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากกว่าศูนย์ ในขณะที่พืชที่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงแบบ C_4 จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงศูนย์ พารามิเตอร์นี้เป็นค่าที่สะท้อนดุล (balance) คาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์ของใบระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสงกับกระบวนการหายใจ ค่าที่สูงหมายถึงกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์ (carboxylation) เสียหายจนทำให้อัตราสังเคราะห์แสงจริงลดลง และ/หรือกระบวนการหายใจเพิ่มขึ้น

ค่า Γ เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง $56.4\text{--}77.8 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองของสุนทรีและคณะ (ไม่เผยแพร่) ที่พบว่า Γ ของใบปาล์มในทางใบที่ 13 จำนวน 5 สายต้นที่ปลูกในสวนปาล์มน้ำมัน บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จ.ชุมพร ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน อายุ 8 ปี มีค่าในช่วง $55.31\text{--}69.75 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ และใกล้เคียงกันกับที่พบในมะม่วงน้ำดอกไม้ ส้มเขียวหวาน และยูคาลิปตัส (สุนทรีและคณะ, 2543; 2544; 2547) ที่มีค่าอยู่ในช่วง $50\text{--}100 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ ซึ่งเป็นค่าที่พบได้ในใบพืช C_3 ปกติ เมื่อเปรียบเทียบ Γ เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 10) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 17 โดย Γ เฉลี่ยของใบในสายต้น Lo มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $77.80 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ และมีค่าต่ำที่สุดในต้น Sd เท่ากับ $56.38 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ เมื่อเปรียบเทียบ Γ เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 11) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เฉพาะสายต้น Lo เท่านั้น โดย Γ เฉลี่ยในทางใบที่ 17 มีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับทางใบที่ 13 จากผลการศึกษา Γ ตามลำดับของทางใบตั้งแต่ทางใบที่ 2 ถึงทางใบที่ 25 ของปาล์มน้ำมันสายต้นหนึ่งโดยสุนทรีและคณะ (ไม่เผยแพร่) พบว่า Γ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับทางใบ จาก $53.81 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ ในทางใบที่ 2 เป็น $71.40 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$ ในทางใบที่ 25

พารามิเตอร์ที่สอง คือ ค่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ เรียกค่านี้ว่า ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ (mesophyll conductance, g_m) พารามิเตอร์นี้แสดงให้เห็นถึงความยากง่ายของเส้นทางการแพร่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผนังเซลล์เมสโซฟิลล์ไปยังจุดที่เกิดปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (carboxylation) ในคลอโรพลาสต์ ค่านี้จึงสะท้อนประสิทธิภาพของกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (carboxylation efficiency) ค่าที่สูงหมายความว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบสามารถแพร่โมเลกุลเข้าสู่ chloroplast ได้ง่าย เกิดปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก ได้อย่างรวดเร็ว g_m เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 60.1-106.4 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ ค่าที่ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองของสุนทรและคณะ (ไม่เผยแพร่) ที่พบว่า g_m ของใบปาล์มในทางใบที่ 13 จำนวน 5 สายต้นที่ปลูกในสวนปาล์มน้ำมัน บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) จ.ชุมพร ภายใต้ระบบน้ำชลประทาน อายุ 8 ปี มีค่าอยู่ในช่วง 38.54-86.58 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ เมื่อเปรียบเทียบ g_m เฉลี่ยระหว่างสายต้นในทางใบเดียวกัน (ตารางที่ 10) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทางใบที่ 13 โดย g_m เฉลี่ยของใบในสายต้น Me มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 106.43 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ และมีค่าต่ำที่สุดในสายต้น Hi และ Lo เท่ากับ 75.33 และ 73.37 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบ g_m เฉลี่ยระหว่างทางใบที่ 13 และ 17 ในสายต้นเดียวกัน (ตารางที่ 11) พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่จากผลการศึกษา g_m ตามลำดับของทางใบตั้งแต่ทางใบที่ 2 ถึงทางใบที่ 25 ของปาล์มน้ำมันสายต้นหนึ่งโดยสุนทรและคณะ (ไม่เผยแพร่) พบว่า g_m มีค่าลดต่ำลงตามลำดับทางใบ จาก 69.50 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ ในทางใบที่ 2 เป็น 52.40 mmol CO₂ m⁻² s⁻¹ ในทางใบที่ 25

ความสัมพันธ์ระหว่างค่านำไหลเมสโซฟิลล์กับจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ของใบปาล์มแสดงในภาพที่ 11c และ 11d พบว่าจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์แปรผกผันกับค่านำไหลเมสโซฟิลล์ กล่าวคือ เมื่อค่านำไหลเมสโซฟิลล์มีค่าสูง (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบสามารถแพร่โมเลกุลเข้าสู่ chloroplast ได้ง่าย และเกิดปฏิกิริยาการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโกได้อย่างรวดเร็ว) ทำให้ดุลการแลกเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์ของใบระหว่างกระบวนการสังเคราะห์แสงกับกระบวนการหายใจเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีค่าต่ำ สอดคล้องกับผลการทดลองของสุนทรและคณะ (ไม่เผยแพร่) ที่พบว่า g_m มีค่าลดต่ำลงตามลำดับทางใบ ในขณะที่ Γ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับทางใบ ตั้งแต่ทางใบที่ 2 ถึงทางใบที่ 25 ดังนั้น g_m ของสายต้น Lo ที่มีค่าต่ำ มีบทบาททำให้ Γ มีค่าสูงทั้ง 2 ทางใบ



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบในทางใบที่ 13 (a) และทางใบที่ 17 (b) และความสัมพันธ์ระหว่างจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าน้ำไหลเมสโซฟิลล์ในทางใบที่ 13 (c) และทางใบที่ 17 (d) ค่าที่แสดงเป็นค่าจริงที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ซ้ำ

ตารางที่ 10 พารามิเตอร์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบของใบปาล์ม Γ คือ จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และ g_m คือ ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ แสดงแยกเปรียบเทียบสายต้นในทางใบเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	69.20 $\pm$ 8.51	0.989	75.33 $\pm$ 5.12 ^c
Me	13	63.68 $\pm$ 5.58	0.995	106.43 $\pm$ 2.37 ^a
Lo	13	71.48 $\pm$ 1.10	0.984	73.37 $\pm$ 5.61 ^c
Sd	13	60.98 $\pm$ 1.68	0.993	89.27 $\pm$ 2.52 ^b
P-value		ns		*
CV (%)		7.81		4.85

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	17	65.73 $\pm$ 1.86 ^{ab}	0.990	78.37 $\pm$ 7.28
Me	17	68.27 $\pm$ 3.55 ^{ab}	0.992	83.13 $\pm$ 14.93
Lo	17	77.80 $\pm$ 1.21 ^a	0.994	60.07 $\pm$ 7.35
Sd	17	56.38 $\pm$ 12.36 ^b	0.945	63.70 $\pm$ 33.74
P-value		*		ns
CV (%)		9.73		26.87

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 11 พารามิเตอร์ที่ได้จากสมการความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างใบของใบปาล์ม Γ คือ จุชชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ และ g_m คือ ค่านำไหลเมสโซฟิลล์ แสดงแยกเปรียบเทียบทางใบในสายต้นเดียวกัน ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ SE ที่ได้จากใบ 1 ใบ 1 ต้น โดยวัด 3 ชั่วโมง

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Hi	13	69.20 $\pm$ 8.51	0.989	75.33 $\pm$ 5.12
Hi	17	65.73 $\pm$ 1.86	0.990	78.37 $\pm$ 7.28
P-value		ns		ns
CV (%)		9.12		8.19

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Me	13	63.68 $\pm$ 5.58	0.995	106.43 $\pm$ 2.37
Me	17	68.27 $\pm$ 3.55	0.992	83.13 $\pm$ 14.93
P-value		ns		ns
CV (%)		7.09		11.27

ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Lo	13	71.48 ± 1.10^b	0.984	73.37 ± 5.61
Lo	17	77.80 ± 1.21^a	0.994	60.07 ± 7.35
P-value		*		ns
CV (%)		1.55		9.80

สายต้น	ทางใบ	Γ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ air}$)	R^2	g_m ($\text{mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
Sd	13	60.98 ± 1.68	0.993	89.27 ± 2.52
Sd	17	56.38 ± 12.36	0.945	63.70 ± 33.74
P-value		ns		ns
CV (%)		15.03		31.28

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีค่าแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

สรุป

ปริมาณคลอโรฟิลล์และครรชนีความเขียวของใบปาล์มเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ทางใบที่ 1 และมีค่าเกือบสูงสุดเมื่อถึงทางใบที่ 9 แสดงว่าพัฒนาการสร้างคลอโรฟิลล์ของใบปาล์มถึงระดับสูงสุดในทางใบนี้ สัดส่วนระหว่างปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อบีมีค่าอยู่ในช่วง 2.64 – 3.99 ค่าสัดส่วนที่ต่ำกว่า 3 แสดงว่า ทางใบที่อยู่ทางด้านล่างของทรงพุ่มถูกบดบังแสงจากทางใบบน ใบปาล์มเริ่มถูกบดบังแสงตั้งแต่ทางใบที่ 25-30 เป็นต้นไป

ค่า I_s เฉลี่ยของใบปาล์มที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 700-1300 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ แสดงว่ากระบวนการสังเคราะห์แสงของใบปาล์มถูกจำกัดเมื่อความเข้มแสงต่ำกว่า 1300 $\mu\text{mol PPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ใบปาล์มแต่ละสายต้น แสดงศักยภาพการสังเคราะห์แสงของใบต่างกัน ในหลายพารามิเตอร์ สายต้น Hi มีศักยภาพการสังเคราะห์แสงสูงสุดโดยมีอัตราสังเคราะห์แสงรวมสูงสุด (P_m) ในช่วง 20.3-22.5 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เป็นผลจากการมีค่านำไหลดปากใบสูงสุด ($g_{s, \max}$) ที่สูงเท่ากับ 218 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และค่าอัตราสูงสุดของการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนทั้งระบบ ($J_{\max}$) ที่สูงโดยมีค่าอยู่ค่าอยู่ในช่วง 158-189 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ มีประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์รูบิสโก (g_m) ในระดับที่ดี สายต้น Lo มีศักยภาพการสังเคราะห์แสงต่ำที่สุดโดยมีค่า P_m ที่ต่ำอยู่ในช่วง 13.3-18.7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่า $g_{s, \max}$ เท่ากับ 135 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และ $J_{\max}$ 114-152 $\mu\text{mol E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. นอกจากนี้ค่า g_m ยังมีค่าต่ำทั้ง 2 ทางใบ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พูนพิภพ เกษมทรัพย์, รวี เสธฐักดิ์, เพ็ญ สายขุนทด, เจษฎา ภัทรเลอพงศ์ และ พัชรียา บุญกอแก้ว. 2537. การประเมินปริมาณคลอโรฟิลล์จากความเขียวของใบพืชบางชนิดในประเทศไทย, น. 114-129. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 32 (สาขาพืช). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, จินตนา บางจั่น และ ธาดา ชัยสีหา. 2543ก. ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 57-62. ในรายงานโครงการวิจัยการให้อากาศเพื่อผู้ชีวิตต้นมะม่วงที่ประสบอุทกภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, จิตรฤทัย ชูมาก, ธาดา ชัยสีหาและศรีสังวาล ลาวยิเศษกุล. 2543ข. ความเข้มแสงกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 63-67. ในรายงานโครงการวิจัยการให้อากาศเพื่อผู้ชีวิตต้นมะม่วงที่ประสบอุทกภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, จินตนา บางจั่น และ ธาดา ชัยสีหา. 2543ค. จุลชีพเขยคาร์บอนไดออกไซด์ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 57-62. ในรายงานโครงการวิจัยการให้อากาศเพื่อผู้ชีวิตต้นมะม่วงที่ประสบอุทกภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์, คัทลียา ฉัตรเที่ยง, จิตรฤทัย ชูมาก, ธาดา ชัยสีหา, สุทิน หิรัญอ่อน, จินตนา บางจั่น, สุภาพร เรืองวิทยาโชติ และ ภูริพงษ์ ดำรงวุฒิ. 2544. เส้นตอบสนองต่อแสง จุลชีพเขยคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าน้ำไหลของผิวใบสองด้านและปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบส้มเขียวหวาน, น. 82-96. ในรายงานโครงการพัฒนางานวิชาการข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาของส้มเขียวหวาน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์ และ คัทลียา ฉัตรเที่ยง. 2547. ข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาเพื่อความเข้าใจการเกิดอาการยอดตายของยูคาลิปตัสในเขตภาคตะวันตก. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

- Anderson, J.M. 1986. Photoregulation of the composition, function, and structure of thylakoid membranes. **Annu. Rev. Plant Physiol** 37: 93-136.
- Anonymous. 1989. Chlorophyll Meter, SPAD-502. **A Manual**. Minolta Camera Company.
- Anonymous. 2002. Leaf Chamber Fluorometer. **Portable Photosynthesis System (LI-6400) Manual**. LI-COR, Inc., Nebraska, U.S.A.
- Bjorkman, O. and B. Demmig. 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77K among vascular plant of diverse origins. **Planta**. 170: 489-504.
- BUCKLEY, T. N. and G. D. FARQUHAR. 2004. A new analytical model for whole-leaf potential electron transport rate. **Plant, Cell and Environment** (27): 1487–1502.
- Buchaman B.B., W. Gruissen and R.L. Jone. 2000. **Biochemistry & Molecular Biology of Plants**. Courien Company Inc, U.S.A. 1367 p.
- Chan, K W. 1999. Towards Higher Yield Potential, Production and its Prediction in Oil Palm. **PORIM BULLETIN** (39): 38-41
- Corley, R.H.V., J.J. Hardon and S.C. Ooi. 1973. Some evidence for genetically controlled variation in photosynthetic rate of oil palm seedlings. **Euphytica** 22: 48-55.
- Corley, R.H.V. and P.B. Tinker. 2003. **The Oil Palm**. 4th ed. Blackwell Science Ltd, U.S.A. 562 p.
- DeEll, J.R., O.van Kooten, R.K. Prange and D.P. Murr. 1999. Applications of chlorophyll fluorescence techniques in postharvest physiology. **Hort. Rev.** 23: 69-107

- Dufrene, E. and B. Saugier. 1993. Gas exchange of oil palm in relation to light, vapour pressure deficit, temperature and leaf age. **Functional Ecology**. 7: 97-104.
- Evans, J.R. 1987. The dependence of quantum yield on wavelength and growth irradiance. **Aust. J. Plant Physiol.** 14: 69-79.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. 2007. <http://faostat.fao.org/>
- Farquhar, G.D., S. von Caemmerer and J.A. Berry. 1980. A Biochemical Model of Photosynthetic CO₂ Assimilation in Leaves of C₃ Species. **Planta** 149: 78-90.
- Farquhar, G.D. and S. von Caemmerer. 1982. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. p. 549-587. *In*: Lange, O.L., et al. (eds.) **Physiological Plant Ecology II: Water Relations and Carbon Assimilation. Encyclopedia of Plant Physiology**, Vol: 12B. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg.
- Haniff, M.H. 2006. Gas Exchange of Excised Oil Palm (*Elaeis guineensis*) Fronds. **Asian J. Plant Sci** 5 (1): 9-13.
- Hartley, C.W.S. 1988. **The Oil Palm**. 3rd ed., Longman Scientific & Technical, New York. 761 p.
- Henson, I.E. 1995. Photosynthesis, dry matter production and yield of oil palm under light-limiting conditions. p 525-541. *In* B.S. Jalani *et al.*, (eds.) **Proc. 1993 PORIM Int. Palm Oil Congr.-Agriculture**. Palm Oil Res. Inst., Malaysia.
- Horton, P., A.V. Ruban and R.G. Walters. 1996. Regulation of light harvesting in green plant. **Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.** 47: 655-684.

- Moran, R. 1982. Formulae for determination of chlorophyllous pigments extracted with *N,N*-Dimethylformamide. **Plant Physiol.** 69: 1376-1381.
- Ögren, E. and J.R. Evans. 1993. Photosynthetic light-response curves I. The influence of CO₂ partial pressure and leaf inversion. **Planta** 189: 182-190.
- Öquist, G., J.M. Anderson, S. McCaffery and W.S. Chow. 1992. Mechanistic differences in photoinhibition in sun and shade plants. **Planta** 199: 422-431
- Rosenqvist, E. and O.V. Kooten. 2003. Chlorophyll fluorescence : A general description and nomenclature. pp.31-77. In DeEll, J.R. and Toivonen, P.M.A. **Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology**. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1985. **Plant Physiology**. 3rd ed. Wadsworth Publishing Company, California. 540 p.
- SAS Institute Inc. 1988. **SAS/STAT™ User's Guide**, Release 6.03 Edition. SAS Institute Inc., North Carolina, USA. 1028 p.
- Singsaas, E.L., D.R. Ort and E.H. DeLucia. 2001. Variation in measured values of photosynthetic quantum yield in ecophysiological studies. **Oecologia** 128: 15-23.
- Smith, G. 1989. The Effects of Soil Water and Atmospheric Vapour Pressure Deficit on Stomatal Behaviour and Photosynthesis in the Oil Palm. **Journal of Experimental Botany** 40 (215): 647-651.
- Suresh, K. and C. Nagamani. 2006. Variations in photosynthetic rate and associated parameters with age of oil palm leaves under irrigation. **Photosynthetica** 44 (2): 309-311.

Taiz, L. and E. Zeiger. 2002. **Plant Physiology**. 3rd ed. Sinaguer Associate, Inc., Sanderland, Massachusetts. 690 p.

Thornley, J.H.M. and I.R. Johnson. 1990. **Plant and Crop Modelling : A Mathematical Approach to Plant and Crop Physiology**. Oxford Univ. Press, New York. 669 p.

Tijskens, L.M.M., E.C. Otma and O. van Kooten. 1994. Photosystem II quantum yield as a measure of radical scavengers in chilling injury in cucumber fruits and bell peppers. A static, dynamic and statistical model. **Planta** 194: 478-486.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 อัตราการเติบโตของต้นปาล์มน้ำมัน

สายต้น	อัตราเพิ่มความสูงของลำต้น (ชม./ปี)	อัตราสร้างทางใบ (จำนวน/ต้น/ปี)
Hi	52.5	23.5
Me	54.1	24.1
Lo	40.5	21.4
Sd	67.4	23.7

ตารางผนวกที่ 2 อัตราสร้างผลผลิตปาล์มน้ำมัน

สายต้น	จำนวนทะลายเฉลี่ย (จำนวน/ต้น/ปี)	น้ำหนักทะลายเฉลี่ย (กิโลกรัม/ทะลาย)
Hi	15.4	14.7
Me	10.3	18.4
Lo	8.0	15.9
Sd	9.2	23.8



ภาพผนวกที่ 1 ต้นปาล์มน้ำมัน สายดั้น Hi



ภาพผนวกที่ 2 ต้นปาล์มน้ำมัน สายดั้น Me



ภาพผนวกที่ 3 ต้นปาล์มน้ำมัน สายคั้น Lo



ภาพผนวกที่ 4 ต้นปาล์มน้ำมันที่ปลูกด้วยเมล็ด (ต้น Sd)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายพรชัย ไพบูลย์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 27 ตุลาคม 2523
สถานที่เกิด	กาญจนบุรี
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะเกษตร วิชาเอกเคมีการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยนักวิจัย
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ห้องปฏิบัติการนิเวศ-สรีรวิทยาพืช ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	

