



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (พฤกษศาสตร์)

ปริญญา

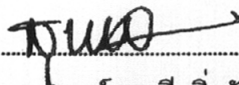
พฤกษศาสตร์	สายวิชาวิทยาศาสตร์
สาขา	ภาควิชา

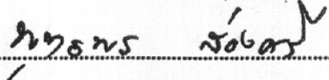
เรื่อง ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารที่อย่างรวดเร็วต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และเอนไซม์เฟอริกรีดักเตสในใบของยูคาลิปตัส
(Eucalyptus camaldulensis)

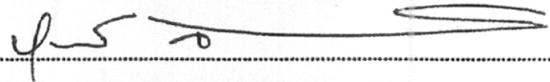
Effects of Rapid Change in pH of Nutrient Solution on Photosynthesis Capacity and Ferric Reductase in Leaf of Eucalyptus
(Eucalyptus camaldulensis)

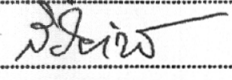
นามผู้วิจัย นางสาวจินดารัตน์ วัดจินดา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย


ประธานกรรมการ 
 (ศาสตราจารย์สุนทรียิ่ง ขั้ววาลย์, Ph.D.)

กรรมการ 
 (อาจารย์พุทธพร ส่องศรี, Ph.D.)

กรรมการ 
 (รองศาสตราจารย์สรเดช จินตกานนท์, วท.ม.)

ประธานสาขาวิชา 
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริภัทร พรหมณีย์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว


 (รองศาสตราจารย์วินัย อาจคงหาญ, M.A.)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 6 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชอย่างรวดเร็วต่อกระบวนการ
สังเคราะห์แสง และเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในใบของยูคาลิปตัส
(*Eucalyptus camaldulensis*)

Effects of Rapid Change in pH of Nutrient Solution on Photosynthesis Capacity and
Ferric Reductase in Leaf of Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*)

โดย

นางสาวจินดารัตน์ วัตจินดา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พฤษศาสตร์) (พฤกษศาสตร์) (พฤกษศาสตร์)
พ.ศ. 2549

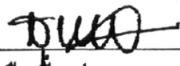
ISBN 974-16-1031-9

จินดารัตน์ วัดจินดา 2549: ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชอย่างรวดเร็ว ต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบของยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis*) ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พฤกษศาสตร์) สาขาพฤกษศาสตร์ วิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 109 หน้า ISBN 974-16-1031-9

พื้นที่ปลูกยูคาลิปตัสในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยที่อยู่ใกล้ภูเขาหินปูน พบว่าต้นยูคาลิปตัส แสดงอาการตายยอดในช่วงปลายฤดูฝนของปีที่มีฝนตกหนัก การทดลองนี้จึงทดสอบสมมติฐานที่ว่า การไหลผ่านของน้ำใต้ดินที่มีไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายดินอย่างกะทันหันในช่วงเวลาสั้นๆ จนขัดขวางการดูดธาตุเหล็กและกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยปลูกต้นยูคาลิปตัสอายุ 3 เดือน ในสารละลายธาตุอาหารพืช 6 ตำรับ แยกได้เป็น 3 ชุด ชุดแรกเป็นสารละลายกรดคือตำรับ T1 ให้ pH เริ่มต้น 5.7 และปล่อยให้ pH เปลี่ยนตามจริง ตำรับ T2 เริ่มต้นและรักษา pH ให้คงที่ที่ 5.7 (ใช้ HCl) ชุดที่สองเป็นสารละลายด่างคือตำรับ T5 ค่า pH เริ่มต้น 8.5 และปล่อยให้ pH เปลี่ยนตามจริง ตำรับ T6 เริ่มต้นและรักษา pH ให้คงที่ที่ 8.5 (ใช้ KOH) ส่วนชุดที่สามให้ pH เริ่มต้นที่ 5.7 จากนั้นปรับเป็น 8.5 ภายใน 3 วัน และคงระดับ pH นั้นนาน 15 วัน จึงปรับลด pH ลงเป็น 5.7 อีกครั้งภายใน 3 วัน โดยตำรับ T3 ใช้สาร KOH และตำรับ T4 ใช้สาร KHCO_3 ในการปรับค่า pH เปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์และปรับค่า pH ตามค่าก่อนเปลี่ยน โดยต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายจะใช้ประเมินอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ) ปริมาณคลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นของธาตุเหล็ก เอนไซม์เพอริกรีดักเทส ค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ และมวลชีวภาพ

ต้นกล้าที่เจริญในสารละลายกรดมีการเจริญดีที่สุด โดยมีค่า $A_{1,000}$ ปริมาณคลอโรฟิลล์ ความเข้มข้นของธาตุเหล็ก และมวลชีวภาพสูงสุด ส่วนตำรับ T4 ที่ใช้สาร KHCO_3 ในการปรับ pH เป็นตำรับที่เกิดผลกระทบต่อต้นกล้ามากที่สุด โดยพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ประเมินแสดงการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ และจะเห็นชัดเจนหลังจากปรับค่า pH เพิ่มขึ้นได้ 15 วัน พบว่าประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) มีระดับต่ำกว่าใบปกติอย่างชัดเจน ซึ่งให้เห็นว่าระบบรับแสง (PSII) เสียหาย ค่าน้ำไหลปากใบที่ลดลงมีผลทำให้อัตราคายน้ำต่ำ และอุณหภูมิใบสูงขึ้น ทั้งนี้ผลกระทบที่รุนแรงที่สุดเกิดในระหว่างการปรับ pH ในครั้งสุดท้ายให้กลับเป็นกรดอีกครั้ง โดยค่าน้ำไหลปากใบและค่า $A_{1,000}$ ลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ แสดงให้เห็นชัดเจนว่าการไหลผ่านของน้ำใต้ดินที่มี HCO_3^- ซึ่งทำให้รากต้องเผชิญกับค่า pH ที่แกว่งขึ้นแล้วกลับลดลงในช่วงเวลาสั้นๆ สามารถทำความเข้าใจเกี่ยวกับต้นยูคาลิปตัสได้อย่างรุนแรง

จินดารัตน์ วัดจินดา
ลายมือชื่อนิติกร


ลายมือชื่อประธานกรรมการ

15 / กพ / '49

Jindarat Wadjinda 2006: Effects of Rapid Change in pH of Nutrient Solution on Photosynthesis Capacity and Ferric Reductase in Leaf of Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis*). Master of Science (Economic Botany), Major Field: Economic Botany, Division of Science. Thesis Advisor: Professor Suntaree Yingjajaval, Ph.D. 109 pages. ISBN 974-16 -1031-9

In the western region of Thailand, eucalypt is grown in the valley of limestone mountain. Towards the end of rainy season of very wet years, eucalypt suffers from shoot die-back. A hypothesis is tested here that the underlining reason is from the passing underground water which causes rapid and short duration change in pH of soil solution with detrimental effect in the presence of bicarbonate ion (HCO_3^-). Iron uptake becomes impeded and photosynthesis process is disrupted. The experiment was set up to comprise 6 pH treatments of nutrient solution for eucalypt seedling (3 months old). The first set was acidic solution, T1 started at pH 5.7 and was allowed to change freely, while T2 started and was maintained at relatively stable pH of 5.7 (with HCl). The second set was basic solution, T5 started at pH 8.5 and was allowed to change freely, while T6 started and was maintained at pH of 8.5 (with KOH). The third set was solution started at pH 5.7, which was then adjusted within 3 days to 8.5 and maintained for 15 days before the pH was adjusted back down to 5.7 again within 3 days. The adjusting chemical was KOH in T3 and KHCO_3 in T4. Solution was changed on a weekly basis and the pH of the solution was restored to its previous level. Leaves of seedling were evaluated for maximum net photosynthesis rate ($A_{1,000}$), quantum yield (ϕ), chlorophyll content, Fe concentration, ferric reductase, pH of leaf solution and the whole seedling biomass.

Seedlings grown in acidic solution had the best growth, with higher rate of $A_{1,000}$, higher chlorophyll content, Fe concentration and biomass. The most effected seedlings were T4. The presence of KHCO_3 brought gradual change in most of the parameters evaluated. The change became apparent after 15 days of the initial increase of pH. The dark-adapted quantum yield was clearly at lower level than that of the normal leaf, indicating that the photosystem (PSII) was damaged. The stomatal conductance decreased which brought out a series of event of lower transpiration and higher leaf temperature. The most severe impact was during the final pH adjustment back to acid, when the stomatal conductance and $A_{1,000}$ decreased to almost zero. It is clear that should the passing stream of underground water contain HCO_3^- , the effect is a double blow of pH changing up and then down within a short duration.

Jindarat Wadjinda
Student's signature

A. Yingjajaval
Thesis Advisor's signature

15 / Feb / 2006

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. สุนทรีย ینگษ์ชวัลย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอบรมสั่งสอนข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมา อีกทั้งยังให้คำปรึกษา ช่วยเหลือสนับสนุนทุน อุปกรณ์ในการวิจัย และสละเวลาตรวจแก้ไขอย่างละเอียด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร. พุทธพร สองศรี กรรมการวิชาเอก รัช. สุวเดช จินตกานนท์ กรรมการวิชารอง ที่ให้คำแนะนำ ข้อคิดต่างๆ ตลอดจนตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี และ ผศ.ดร. ยิ่งยง ไพสุขศานติวัฒนา ผู้แทนบัณฑิตในการสอบประมวลผลความรู้ และสอบสัมภาษณ์ขั้นสุดท้าย ที่มีส่วนร่วมในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ศูนย์วิจัยพืชผักเขตร้อน ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร และบริษัทสยามฟอเรสทรี จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ สถานที่ และความสะดวกในการปฏิบัติงาน ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องปฏิบัติการนิเวศ-สรีรวิทยาและสมาชิกพฤกษศาสตร์ทุกคนที่มีความตั้งใจ สละเวลาและคอยช่วยเหลืองานวิจัย จนสำเร็จด้วยดี

กราบขอบคุณ พ่อ แม่ และน้องๆ ที่คอยช่วยเหลือ อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดันและเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุน และส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่อาจารย์ของข้าพเจ้า พ่อ แม่ และทุกท่านที่มีส่วนร่วม

จินดารัตน์ วัตจินดา
พฤศจิกายน 2548

สารบัญ

หน้า

สารบัญ.....	(1)
สารบัญตาราง.....	(3)
สารบัญภาพ.....	(5)
คำอธิบายอักษรย่อ.....	(7)
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
การตรวจเอกสาร.....	3
ลักษณะทั่วไปของยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส.....	3
ดินเหนียว.....	4
ผลกระทบของดินเหนียวต่อธาตุเหล็ก.....	4
การเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กผ่านเยื่อหุ้มเซลล์.....	6
คลอโรฟิลล์.....	8
ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง Photosystem II	9
อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ.....	10
มวลชีวภาพ.....	11
อุปกรณ์และวิธีการ.....	12
การเตรียมพืชปลูกในสารละลายธาตุอาหารพืช.....	12
สภาพอากาศ.....	15
การเลือกตัวอย่างใบ.....	16
พารามิเตอร์ที่ศึกษา.....	17
pH ของสารละลายคั้นจากใบ.....	17
ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทส.....	17
ความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งหมด.....	18
ปริมาณคลอโรฟิลล์.....	19
ประสิทธิภาพการใช้แสง.....	20
อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
มวลชีวภาพ.....	22
สถานที่ทำการทดลอง.....	23
ระยะเวลาทำการทดลอง.....	23
ผลและการวิจารณ์.....	24
pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช.....	24
pH ของสารละลายคั้นจากใบ.....	25
ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสของยูคาลิปตัส.....	28
ความเข้มข้นของธาตุเหล็ก.....	34
ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ.....	38
ประสิทธิภาพการใช้แสงของใบยูคาลิปตัส.....	41
อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$).....	50
มวลชีวภาพ.....	62
สรุปผลการทดลอง.....	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	70
ภาคผนวก.....	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ย pH ของสารละลายคั้นจากใบยูคาลิปตัส ที่เลี้ยงในสารละลาย ในช่วง 17-42 วัน (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4).....	24
2	ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในรากยูคาลิปตัส ตลอดช่วงทดลอง 17-42 วัน	30
3	ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในใบยูคาลิปตัส ตลอดช่วงทดลอง 17-42 วัน	31
4	สัดส่วนปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในใบต่อรากของต้นกล้ายูคาลิปตัส ในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน.....	33
5	ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนราก ลำต้น และใบของต้นกล้ายูคาลิปตัสเปรียบเทียบใน 2 ช่วงเวลา คือ ครั้งที่ 1 วันที่ 17 (ก่อน) และครั้งที่ 2 วันที่ 42 (หลังการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3 และ T4).....	35
6	ความเข้มข้นของธาตุเหล็กกับปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในต้นยูคาลิปตัส.....	37
7	ค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์รวม และ สัดส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี ของใบยูคาลิปตัส ในวันที่ 17-42 ของการทดลอง.....	40
8	ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4).....	42
9	ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4).....	43
10	ประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ_{PSII}) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน เมื่อให้แสงคงที่เท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3-T4).....	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	ประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ PSII) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 เมื่อให้แสงคงที่เท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3-T4).....	47
12	อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตัดยูคาลิปตัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น).....	52
13	อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตามยูคาลิปตัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น).....	58
14	มวลสด มวลแห้ง และพื้นที่ใบทั้งต้นของยูคาลิปตัส 6 ตำรับ ใน 2 ช่วงเวลา คือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3 -T4) และครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3 -T4).....	64
15	มวลสดของส่วนราก ลำต้น ใบ และสัดส่วนเนื้อดินต่อราก ของต้นกล้ายูคาลิปตัส 6 ตำรับ ใน 2 ช่วงเวลา คือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3-T4) และครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายตำรับ T3-T4).....	65
16	มวลแห้งของส่วนราก ลำต้น ใบ และสัดส่วนเนื้อดินต่อราก ของต้นกล้ายูคาลิปตัส 6 ตำรับ ใน 2 ช่วงเวลา คือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3-T4) และครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายตำรับ T3-T4).....	66

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารทั้ง 6 ตำรับ ตลอดจนทดลอง.....	24
2	การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายคั้นจากใบของยูคาลิปตัส ในช่วงทดลอง 17-42 วัน.....	27
3	ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของสารละลายธาตุอาหารกับ pH ของสารละลายคั้นจากใบของยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17- 42 วัน.....	27
4	การเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในส่วนของ a) ราก และ b) ใบของต้นกล้ายูคาลิปตัส ในช่วงทดลอง 17-42 วัน.....	32
5	ความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งต้น ($\mu\text{g g}^{-1}$) แบ่งเป็นส่วนราก ลำต้น และใบ b) สัดส่วนธาตุเหล็กของส่วนราก ลำต้น และใบยูคาลิปตัส.....	36
6	ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบยูคาลิปตัสตลอดช่วงทดลอง เมื่อ a) ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม b) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ c) ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี และ d) เป็นสัดส่วนของคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี.....	39
7	การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) a) ใบตัด และ b) ใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน.....	44
8	ตัวอย่างใบตัด a) ประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงคงที่ $1000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ b) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ตลอดช่วงทดลอง และ c) ความสัมพันธ์ของ ETR กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$).....	48
9	ตัวอย่างใบตาม a) ประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงคงที่ $1000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ b) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ตลอดช่วงทดลอง และ c) ความสัมพันธ์ของ ETR กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$).....	49

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
10	พารามิเตอร์ของใบตัด เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ (gs) b) อัตราคายน้ำ (E) c) อุณหภูมิใบ (Tleaf) d) แรงดึงคายน้ำ ($VPD_{leaf-air}$) e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) ในช่วงทดลอง 17–42 วัน..	53
11	ตัวอย่างใบตัด a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบกับ ค่าน้ำไหลปากใบ b) ค่าน้ำไหลปากใบกับอัตราคายน้ำ c) อัตราคายน้ำกับ อุณหภูมิใบ และ d) อุณหภูมิใบกับแรงดึงคายน้ำ ในช่วง 17–42 วัน.....	54
12	พารามิเตอร์ของใบตัดที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำในช่วงทดลอง 17-42 วัน.....	55
13	พารามิเตอร์ของใบตาม เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ (gs) b) อัตราคายน้ำ (E) c) อุณหภูมิใบ (Tleaf) d) แรงดึงคายน้ำ ($VPD_{leaf-air}$) e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) ในช่วงทดลอง 17–42 วัน..	59
14	ตัวอย่างใบตาม a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบกับ ค่าน้ำไหลปากใบ b) ค่าน้ำไหลปากใบกับอัตราคายน้ำ c) อัตราคายน้ำกับ อุณหภูมิใบ และ d) อุณหภูมิใบกับแรงดึงคายน้ำ ในช่วง 17–42 วัน.....	60
15	พารามิเตอร์ของใบตามที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำในช่วงทดลอง 17-42 วัน.....	61
16	a) มวลสด b) มวลแห้ง และ c) สัดส่วนมวลแห้งในส่วนต่างๆ ของต้นกล้วยคา ลิปดัส ใน 2 ช่วงเวลาคือ ครั้งที่ 1 วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลาย และครั้งที่ 2 วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลาย.....	67

คำอธิบายอักษรคำย่อ

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
$A_{1,000}$	Maximum net photosynthesis (PPF =1,000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $\text{CO}_2 = 400 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1}$, $T=30^\circ \text{C}$, $\text{RH} =70\text{-}75\%$)	$\mu\text{molCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
A:E	Ratio of leaf net photosynthesis to transpiration	$\mu\text{molCO}_2 \text{mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$
Chl_a	Chlorophyll a content	g m^{-2}
Chl_b	Chlorophyll b content	g m^{-2}
$\text{Chl}_{\text{total}}$	Total chlorophyll content	g m^{-2}
$\text{Chl}_a:\text{Chl}_b$	Ratio of Chl_a to Chl_b	fraction
DML	Leaf dry mass	g
DMR	Root dry mass	g
DMS	Stem dry mass	g
E	Leaf transpiration	$\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
ETR	Electron transport rate	$\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Fe	Leaf Fe concentration	$\mu\text{g g}^{-1}$
FeR	Root Fe concentration	$\mu\text{g g}^{-1}$
FeS	Stem Fe concentration	$\mu\text{g g}^{-1}$
FeT	Total Fe concentration	$\mu\text{g g}^{-1}$
g_s	Stomatal conductance (to H_2O)	$\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$
LA	Leaf area	cm^2
Mf	Fresh mass	g
Md	Dry mass	g
PPF	Photosynthetic photon flux	$\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$
ϕPSII	Light quantum yield	fraction
ϕdark	Dark-adapted quantum yield	fraction
RH	Air relative humidity	%
T_{air}	Air temperature	C
T_{leaf}	Leaf temperature	C

คำอธิบายอักษรคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	คำอธิบาย	หน่วย
VPD_{air}	Air vapor pressure difference	kPa
$VPD_{leaf-air}$	Leaf to air vapor pressure difference	kPa

ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชอย่างรวดเร็วต่อ
กระบวนการสังเคราะห์แสง และเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในใบของยูคาลิปตัส
(*Eucalyptus camaldulensis*)

Effects of Rapid Change in pH of Nutrient Solution on Photosynthesis
Capacity and Ferric Reductase in Leaf of Eucalyptus
(*Eucalyptus camaldulensis*)

คำนำ

ทิศทางการปลูกไม้โตเร็วในปัจจุบัน ภาคเอกชนให้ความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะการปลูกสวนป่าไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งภาครัฐให้การสนับสนุน ดังจะเห็นได้จากแนวนโยบายการส่งเสริมการปลูกป่าไม้โตเร็ว ซึ่งกำหนดเป็นนโยบายส่งเสริมให้เอกชนปลูกป่าในนโยบายป่าไม้แห่งชาติ (ปรีชา และคณะ, ม.ป.ป.) ยูคาลิปตัสเป็นพืชที่มีผู้นิยมปลูกกันมาก เพราะเป็นไม้ที่เจริญเติบโตได้ดีแม้ในสภาพท้องถิ่นที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีปริมาณฝนน้อย ทนดินเค็มได้ แต่ไม่ทนทานต่อดินที่มีหินปูนสูง (เกียรติชัย, 2527) ไม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างสำหรับเป็นโครงสร้างบ้าน เป็นพลังงานเชื้อเพลิงในรูปฟืนที่มีคุณภาพดี ผลิตน้ำมันเพื่อใช้ในทางการแพทย์และอุตสาหกรรมน้ำมันหอมระเหย ใช้ในการย้อมสี และใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ (ฝ่ายส่งเสริมและเผยแพร่ กองอนุรักษ์ดินน้ำ กรมป่าไม้, 2533)

สำหรับการปลูกยูคาลิปตัสในดินเนื้อปูน (calcareous soil) ระดับ pH ของดินถูกควบคุมโดยสมบัติและปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อ pH ของดินสูง จะเกิดความไม่สมดุลของธาตุอาหารพืชในดิน เนื่องจากธาตุอาหารพืชต่างๆในดินมีความสามารถในการละลายน้ำที่ต่างกัน อาจทำให้เกิดปัญหาการขาดธาตุบางชนิด เช่น การขาดธาตุเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง หรือเกิดปัญหาความเป็นพิษของโบรไมด์โบรเนต ในส่วนของเหล็ก ซึ่งเป็นธาตุหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชมีความสัมพันธ์อยู่กับปริมาณธาตุเหล็กที่ได้รับ เมื่อพืชขาดเหล็กใบจะหยุดสร้างคลอโรฟิลล์ทันที ใบจึงมีสีเหลืองซีดหรือขาวซีด เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่าภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ซึ่งเหนี่ยวนำด้วยปูน (lime induced chlorosis) ดังเช่นชุดดินตาคลี ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินเหนียวหรือดินร่วนเหนียวที่มีก้อนปูนหรือปูนมาร์ลปะปนอยู่มาก มี

pH 7.0 – 8.5 ดินชุดนี้เมื่อปลูกพืชผักพบปัญหาเกี่ยวกับการขาดธาตุเหล็กอยู่เสมอ ดังรายงานของ ประเสริฐ (2528) ที่ปลูกถั่วลิสงในดินนี้ ถั่วลิสงที่ปลูกแสดงอาการคลอโรซิสค่อนข้างรุนแรงในระยะแรกของ การเจริญเติบโต ปัญหาในลักษณะนี้พบที่บริเวณ อ. ด่านมะขามเตี้ย จ. กาญจนบุรี ที่ต้น ยูคาลิปตัส แม้ปลูกในดินกรดที่มีเนื้อดินเหนียว แต่เกิดอาการใบเหลืองจากส่วนยอดและใบร่วงทั้ง ต้นในช่วงปลายฤดูฝน ทำให้สันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากการที่ดินบริเวณดังกล่าวอยู่ถัดจากแนว เขาที่เป็นหินปูน เมื่อฝนตกหนักจะมีน้ำไหลลงจากเขาทั้งน้ำผิวดินและใต้ดิน ซึ่งเป็นน้ำที่ไหลผ่าน ชั้นหินปูน ทำให้สารละลายดินบริเวณดังกล่าวมี pH เพิ่มขึ้นอย่างกะทันหัน ปริมาณของเหล็กใน สารละลายดินลดลงไปอย่างชัดเจนสอดคล้องกับรายงานของสุนทรีและคัทเลีย (2547) ที่กล่าวไว้ ว่าอาการยอดตายของยูคาลิปตัสที่ อ.ด่านมะขามเตี้ยน่าจะเป็นผลจากหลายสาเหตุร่วมกัน ได้แก่ ระบบรากถูกไถตัดทำให้ดินเค็มได้ไม่น้อยตามส่วน และในช่วงปลายฤดูฝน นอกจากรากจะเผชิญ สภาพของดินอิมตัวด้วยน้ำแล้ว ระบบรากยังน่าจะเผชิญปัญหาการเปลี่ยน pH ของดินจากกรด จัดเป็นกรดอ่อน ทำให้รากไม่สามารถดูดน้ำและธาตุอาหารให้ใบดำเนินกิจกรรมได้มากพอ ใบจึง แห้งและร่วง ทำให้เกิดคำถามว่า ระยะเวลาการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายดินในช่วงเวลา สั้นๆ จะมีผลกระทบต่อปริมาณเหล็กและคลอโรฟิลล์ในใบของยูคาลิปตัสหรือไม่ เพียงใด และเพื่อ พิสูจน์สมมติฐานดังกล่าวจึงจัดทำการศึกษาทดลองนี้ขึ้น โดยใช้ยูคาลิปตัส ความลาดดูเลนซิส ในระยะกล้า ปลูกในสารละลายที่ปรับเปลี่ยนเพิ่มระดับ pH ในช่วงเวลา 3 วัน จากกรดเป็นด่าง โดยใช้ สารละลาย KOH เทียบกับสารละลาย KHCO_3 จากนั้นคงที่ pH เป็นด่างของสารละลายไว้ 15 วัน จึงปรับลดระดับ pH อีกครั้ง ในเวลา 3 วัน จากด่างเป็นกรด ซึ่งเลียนสภาพในแปลงที่มีการไหล ผ่านของน้ำใต้ดินที่ทำให้ pH ของสารละลายดินเปลี่ยนแปลงรวดเร็ว เป็นช่วงเวลาที่น้ำจะ ไหลผ่านผ่านไป และระดับ pH กลับสู่ค่าเดิม ในที่นี้ใช้ยูคาลิปตัสในระยะต้นกล้า

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชในช่วงเวลา สั้นๆ ที่จำกัดการใช้ประโยชน์ของธาตุเหล็กในต้นกล้ายูคาลิปตัส ความลาดดูเลนซิส โดยกำหนด พารามิเตอร์ที่ศึกษา 7 ประการ ได้แก่ pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริรีดัก เทส (Ferric reductase content) ปริมาณธาตุเหล็กทั้งหมด (Total iron) ปริมาณคลอโรฟิลล์ใบ (Chlorophyll content) ประสิทธิภาพการใช้แสง (Quantum yield) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (Net photosynthesis) และมวลชีวภาพ (Biomass)

ตรวจเอกสาร

ลักษณะทั่วไปของยูคาลิปตัส คาลมาลดูเลนซิส

ยูคาลิปตัส คาลมาลดูเลนซิส (*Eucalyptus camaldulensis*) จัดอยู่ในวงศ์ Myrtaceae เป็นพืชที่มีระบบรากเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว รากแก้วสามารถหยั่งลงไปใต้ดินที่ลึกและมีประสิทธิภาพในการสกัดเอาน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างดินมาใช้ได้ดี จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ไม้ชนิดนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีในท้องที่แห้งแล้งและทนต่อสภาวะวิกฤตหลายอย่าง (Turnbull, 1974) ทำให้เจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกสภาพของประเทศไทย จัดเป็นไม้ขนาดใหญ่มีความสูงระหว่าง 24 - 36 เมตร และถ้าขึ้นในที่โล่งแจ้งอาจสูงได้ถึง 50 เมตร ลักษณะดินที่เหมาะสมคือ ดินร่วนปนทรายมีการระบายน้ำดี (National Academy of Science, 1980) และมีความเป็นกรด Yoshisuji and Kawasoe (1961) พบว่า pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไม้ยูคาลิปตัส คาลมาลดูเลนซิส อยู่ระหว่าง 4.6 - 6.6 ลักษณะใบเป็นใบเดี่ยว ใบอ่อนออกเป็นคู่ตรงข้ามกัน 3 - 4 คู่ เรียงสลับกัน ลักษณะใบเป็นรูปไข่เกือบเป็นรูปใบหอกกว้างมีสีเขียวปนเทา เปลือกเรียบเป็นมันมีสีเทาสลับขาวและน้ำตาลแดงเป็นบางแห่งสลับกันตามลำต้น เมื่ออายุมากขึ้น เปลือกจะแตกล่อนและหลุดจากผิวของลำต้น

เรียร์ชัย (2527) พบว่าไม้ยูคาลิปตัส คาลมาลดูเลนซิส เป็นไม้ที่มีลักษณะสำคัญดังนี้ โตเร็วในที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและมีปริมาณฝนน้อย แรกหน่อได้ดี ทนทานต่อสภาพพื้นที่มีน้ำแช่ขังตามฤดูกาล สามารถทนดินเค็มได้ แต่ไม่ทนทานต่อดินที่มีหินปูนสูง และถ้าปลูกในพื้นที่ดินอุดมสมบูรณ์ต่ำ พื้นที่มีน้ำท่วม พื้นที่ดินเค็ม พื้นที่ดินเปรี้ยว พื้นที่มีหินปูน พบว่าจะให้ประโยชน์มากกว่าพืชชนิดอื่นๆ เพราะสภาพพื้นที่ดังกล่าว แม้ไม้ยูคาลิปตัสจะเจริญเติบโตได้ดี แต่ยังคงดีกว่าพืชชนิดอื่น (ดีพร้อม, 2527) สำหรับค่า pH ที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตนั้นอยู่ระหว่าง 4.6 - 6.6 (Yoshisuji and Kawasoe, 1961) รายงานของประเทศมอริออคโค พบว่าไม้ชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะปลูกในดิน saline soil และ calcareous soil ในประเทศอิตาลี พบว่าไม้ชนิดนี้ไม่เหมาะที่จะปลูกในดิน saline clay บริเวณดิน clay หรือ calcareous clay และในประเทศศรีลังกา พบว่ามีความทนทานต่อการถูกน้ำท่วม แต่ไม่ชอบดินที่มี pH สูง (F.A.O., 1981)

ดินเนือปูน (Calcareous soil)

ดินเนือปูนเป็นดินต่างประเภทที่มีหินปูน (limestone) เป็นวัตถุดิบกำเนิดที่สำคัญและมีปูนในรูปของแร่แคลไซต์ (calcite, CaCO_3) สะสมอยู่เป็นปริมาณระหว่าง 60-70 เปอร์เซ็นต์ (ไพบูลย์, 2546) การที่ดินมีแคลเซียมสูง ระดับของ pH จึงถูกควบคุมโดยสมบัติและปริมาณของ CaCO_3 โดยดินประเภทนี้จะมีเบสิกแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้สูง มีอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต หรือ แมกนีเซียมคาร์บอเนตปะปนอยู่ในดิน หากดินมีอนุภาคปูนเทียบเท่ากับ CaCO_3 อยู่ระหว่าง 10 – 200 กรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม เมื่อหยดกรดเจือจาง (0.1 M HCl) ลงไป จะปรากฏฟองฟูของก๊าซ CO_2 ให้เห็น (คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2544) ดินชนิดนี้มักมี pH อยู่ในช่วง 7.3 – 8.5 ทำให้เกิดปัญหาความไม่สมดุลของธาตุอาหารพืชในดิน มีการขาดธาตุอาหารบางชนิด เช่น อาการขาดเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และความเป็นพิษของโบคาร์บอเนต โดยเฉพาะเหล็กการละลายจะลดลงถึง 10^3 เท่าต่อหนึ่งหน่วย pH ที่เพิ่มขึ้น (ไพบูลย์, 2546) ซึ่งการสะสมเกลือแคลเซียม แมกนีเซียมหรือโซเดียมโบคาร์บอเนตในดิน ที่ทำให้ดินมี pH สูงขึ้นนี้ เกิดจากปฏิกิริยาไฮดรอลิซิส (hydrolysis) ของอนุมูลธาตุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ หรือเกลือบางชนิดที่เป็นต่าง เช่น สารประกอบ CaCO_3 เมื่อเกิดไฮดรอลิซิส จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2544)

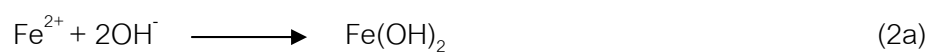


ในประเทศไทย ดินที่มีปูนปะปนอยู่มีหลายชุดดินด้วยกัน เช่น ชุดดินตาคลี บึงชะง่าง ชัยบาดาล ลพบุรี วังชมพู สมอทอด ลำพูนกลาง เป็นต้น พืชส่วนใหญ่ที่ปลูกในดินนี้มักขาดธาตุเหล็ก ซึ่งแสดงอาการคลอโรซิสโดยเฉพาะที่ใบอ่อน คือใบมีสีขาวหรือเหลืองซีด และตายจากยอดลงมา (die back) ขณะที่ใบล่างอาจยังเขียวอยู่ (คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2544)

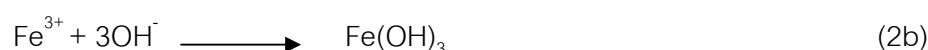
ผลกระทบของดินเนือปูนต่อธาตุเหล็ก

ดินเนือปูนเกี่ยวข้องโดยตรงกับเกลือในรูปคาร์บอเนต (แคลเซียมและแมกนีเซียม) ที่สะสมในดินเป็นปริมาณมาก ทำให้ pH ของดินสูงขึ้น การละลายได้ของเหล็กจึงลดลง ซึ่งมีผลต่อการกำหนดระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็ก นอกจากนี้เหล็กในสารละลายดิน (Fe^{3+} และ Fe^{2+}) มักจะเกิดการตกตะกอนในรูปของเหล็กออกไซด์ เช่น Fe_2O_3 เนื่องมาจากอิทธิพลของ CaCO_3 ซึ่งมีมากในดินเนือปูน (Seatz and Peterson, 1964; Loeppert and Hossner, 1984) ธาตุเหล็กในดิน

ที่พบมีทั้งในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายได้ยาก และในรูปของสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ได้แก่ Fe^{3+} หรือ Fe^{2+} ที่แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืช รวมไปถึงสารคีเลทที่มักตกตะกอน จึงใช้ประโยชน์ได้ยากกว่า เช่น $\text{Fe}(\text{OH})^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ไฟบูลย์, 2546) โดยทั่วไป เหล็กในรูป Fe^{2+} ละลายน้ำได้ดีกว่า Fe^{3+} ปริมาณเหล็กที่ละลายน้ำได้จะลดลงตามลำดับเมื่อ pH ดินสูงขึ้น (มุกดา, 2544) ดังสมการ



ละลายได้ดี ตกตะกอน (ไม่ละลาย)



ละลายได้ดี ตกตะกอน (ไม่ละลาย)

ไอออนของเหล็กมีปริมาณน้อยในช่วง pH 6.5 – 8.0 เมื่อระดับ pH ในสารละลายดินสูงเกินไปมีผลทำให้เหล็กที่รากพืชดูดได้เป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ นอกจากนี้ สภาวะถ่ายเทอากาศในดินร่วมกับระดับความเป็นกรดเป็นด่างของดินมีผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็ก ดังนั้นเมื่อปลูกพืชในดินเนื้อปุยนอกจากธาตุเหล็กที่อยู่ในดินจะละลายออกมาได้น้อยแล้ว กลไกการสูบโปรตอน (H^+ - efflux pump) เพื่อเพิ่มสภาพกรดบริเวณรอบรากที่พืชขับออกมาเพื่อละลายสารประกอบเหล็กยังถูกทำให้เป็นกลางโดย HCO_3^- เมื่อ pH ในดินยังคงสูงอยู่เหล็กในดินจึงตกตะกอน (คณาจารย์ปฐพีวิทยา, 2544) พืชที่ปลูกจึงแสดงอาการขาด เช่นการปลูกถั่วลิสงในดินซุดตาคดี พบว่าถั่วลิสงแสดงอาการขาดธาตุเหล็ก (ประเสริฐ, 2528) ดินเนื้อปุยมีความเข้มข้นของ HCO_3^- สูง เมื่อปลูกพืชที่ไม่ทนต่อดินนี้ HCO_3^- จะเข้าสู่กระบวนการ carbon assimilation ในไซโทซอล และยังเกิดการสังเคราะห์กรดอินทรีย์ภายในรากมากขึ้น ซึ่งกรดอินทรีย์เหล่านี้จะรวมตัวกับเหล็กเป็นคีเลตแล้วถูกเก็บไว้ในแวคิวโอลของราก ทำให้มีเหล็กเพียงส่วนน้อยที่เคลื่อนย้ายทางไซเลม (xylem) ไปยังส่วนเหนือดิน ประกอบกับเหล็กเป็นธาตุที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้ปานกลาง มีธาตุนี้เพียงปริมาณน้อยที่สามารถเคลื่อนย้ายจากเนื้อเยื่อเดิม เช่น ใบแก่ส่งทางโฟลเอ็ม (phloem) ไปยังใบอ่อน ซึ่งเป็นเนื้อเยื่ออ่อนที่เพิ่งเริ่มพัฒนา จึงไม่พอกับความต้องการ อาการขาดธาตุจึงแสดงออกที่ใบอ่อน (ยงยุทธ, 2546) เมื่อขาดธาตุเหล็กพืชจะลดการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เพราะเหล็กมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ จึงควรจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุนี้ในใบกับปริมาณคลอโรฟิลล์ Chen and Barak (1982) พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชมีความสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุเหล็กที่พืชได้รับและพืชที่ขาดธาตุเหล็กจะหยุดสร้าง

คลอโรฟิลล์ทันที สำหรับพืชที่ปลูกในสภาพควบคุม เช่น ใช้สารละลายธาตุอาหารพืช ซึ่งมีเหล็กในรูปคีเลต พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมดในใบกับความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ แต่สำหรับพืชที่ปลูกในดินเนื้อปูนมักแสดงอาการใบเหลืองซีด และเมื่อวิเคราะห์หีใบพืช พบว่ามีเหล็กทั้งหมดเท่ากับ หรือมากกว่าใบพืชปกติ ลักษณะที่ชัดเจนนี้แสดงว่ามีเหล็กบางส่วนอยู่ในสถานะซึ่งไม่อิสระในการทำหน้าที่ เชื่อกันว่า Fe^{2+} เป็นรูปที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์และส่วนหนึ่งเข้าสู่กระบวนการออกซิเดชัน และผันกลับมาด้วยรีดักชันได้อีก จึงมีแนวคิดว่าจะมีเหล็กในใบส่วนหนึ่งเท่านั้นซึ่งแอกทีฟ (active iron) และส่วนมากอยู่ในรูป Fe^{2+} (Abadia, 1992)

การเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กผ่านเยื่อหุ้มเซลล์

พืชดูดเหล็กขึ้นมาใช้ประโยชน์ในรูปของ Fe^{2+} ส่วนเหล็กที่อยู่ในรูป Fe^{3+} จะต้องถูกรีดิวซ์ (รีดิวซ์โดยรีดิวซ์) ให้เป็น Fe^{2+} โดยวิธีใดวิธีหนึ่งก่อนที่พืชจะนำขึ้นไปใช้ได้ (สรสิทธิ์ และคณะ, 2527) และจากรายงานของ Mengel (1995) ข้าวโพดซึ่งปลูกในดินเนื้อปูนแสดงอาการใบเหลือง เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุเหล็ก พบว่าในรากมีสูงกว่าในใบ แสดงว่าความเป็นประโยชน์ของเหล็กในดินไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้เกิดอาการเหลือง แต่น่าจะเกิดจากการขนส่งเหล็กจากอะโพพลาสต์ไปยังไซโตซอลของเซลล์รากผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ Chaney *et al* (1972) พบหลักฐานที่ยืนยันว่าพืชดูดเหล็กในรูป Fe^{2+} ได้จากการทดลองใส่ chelator เช่น BPDS (bathophenanthroline disulfonate) ลงในสารละลายธาตุอาหารที่มี Fe^{2+} - chelate อยู่ ซึ่งการลำเลียงเหล็กเข้ารากถูกยับยั้งถึง 99% ทั้งนี้เพราะ BPDS มีคุณสมบัติรวมตัวกับ Fe^{2+} ได้ดีกว่า Fe^{3+} เมื่อเกิดการรวมตัวกับ Fe^{2+} จะได้ $[Fe(II)(BPDS)_3]^{4-}$ ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนเข้าไปในรากพืชเพราะมีขนาดใหญ่ และมีประจุเป็นลบมาก เป็นผลให้พืชดูดเหล็กได้น้อยลง และ pH ในอะโพพลาสต์ที่สูงขึ้นก็มีผลต่อการใช้ประโยชน์ของธาตุเหล็กที่ดูดเข้าไป คือธาตุเหล็กในสารละลายพืชจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน เช่น Fe^{3+} Citrate การที่จะเคลื่อนที่ทางไซเลม และนำไปใช้ประโยชน์จะต้องเกิดการรีดิวซ์ให้เป็น Fe^{2+} โดยเอนไซม์เฟอริกเรดักเตสก่อนที่จะเคลื่อนผ่านเมมเบรนทางช่องผ่านแล้วนำเหล็กไปใช้ต่อไป กิจกรรมนี้ขึ้นกับค่า pH ของอะโพพลาสต์ ซึ่งในแต่ละพืชแตกต่างกัน เช่น pH อะโพพลาสต์ที่เหมาะสมกับกิจกรรมของเอนไซม์นี้ของ *Ficus benjamina* มีค่าอยู่ในช่วง 5.5 – 6.7 และของปืขรุท อยู่ในช่วง 5.5 – 6.0 (Schmidt and Janiesch, 1991; Elena *et al.*, 2000)

ธาตุเหล็กในใบพืชส่วนมากอยู่ภายในคลอโรพลาสต์ ผลการวิเคราะห์หีบบุการบีบที่กำลังเจริญอย่างรวดเร็ว พบว่าหากแบ่งเหล็กทั้งหมดในใบออกเป็น 5 ส่วน มี 3 ส่วนอยู่ในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) หนึ่งส่วนอยู่ในสโตรมา (stroma) ของคลอโรพลาสต์ อีกหนึ่งส่วนอยู่นอกคลอโรพลาสต์ เมื่อหยุดให้ธาตุเหล็กแก่พืช ปริมาณเหล็กในใบจะลดลงอย่างมาก โดยส่วนที่อยู่ในสโตรมาลดลงเกือบหมด สำหรับในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ และนอกคลอโรพลาสต์ลดลงร้อยละ 51 และ 62 ของที่เคยมีตามลำดับ (Terry and Low, 1982) เมื่อพืชขาดเหล็กจะมีผลกระทบต่อโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ดังนี้

1. เกิดความเสียหายต่อเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ พืชที่ขาดเหล็กจะหยุดสร้างไทลาคอยด์ ขณะที่ใบยังเจริญต่อไปได้ จำนวนคลอโรพลาสต์เพิ่มขึ้น แต่จำนวนไทลาคอยด์ต่อหนึ่งคลอโรพลาสต์ลดลง จึงปรากฏภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ของใบพืช เพราะคลอโรพลาสต์มีจำนวนไทลาคอยด์น้อย และองค์ประกอบสำคัญของไทลาคอยด์สูญหายไป (Terry and Abadia, 1986) กล่าวคือ โดยปกติเยื่อหุ้มไทลาคอยด์มีกาแลกโทลิพิด (galactolipids) ประมาณ 70% ของลิพิดที่ไม่มีสี (non-pigment lipids) ทั้งหมด แต่เมื่อพืชขาดเหล็ก สารในไทลาคอยด์ที่ลดลงมาก คือ กาแลกโทลิพิด โปรตีนทั้งหมดและคลอโรฟิลล์ทั้งหมด ซึ่งลดลง 75 , 60 และ 90 % ตามลำดับ (Nishio *et al.*, 1985) คลอโรพลาสต์ของใบพืชที่ขาดเหล็กมีการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์น้อยลง เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ α - amino levulinic acid มีกิจกรรมลดลง เมื่อมีสารดังกล่าวน้อยก็สร้างคลอโรฟิลล์ได้น้อยด้วย (Huang *et al.*, 1984)

2. สารสี (pigment) ซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานแสงหลายชนิดลดปริมาณลงด้วย เช่น คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และแคโรทีน ส่วนซานโทฟิลล์ ลดลงน้อยกว่าสารสีที่กล่าวข้างต้นจึงดูเหมือนว่าใบมีซานโทฟิลล์มากกว่าสารสีชนิดอื่น (Terry, 1980)

3. การขาดเหล็กทำให้ระบบการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ขัดข้อง เนื่องจากพาหะของอิเล็กตรอน (electron carriers) เช่น ไซโทโครมเอฟ และเฟอริดอกซินมีปริมาณลดลง (Terry and Abadia, 1986)

4. ลดการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ จากการที่ขาดเหล็กแล้วมีผลกระทบต่อไทลาคอยด์มากกว่าสโตรมาของคลอโรพลาสต์ ดังนั้นโปรตีนในสโตรมาจึงไม่เปลี่ยนแปลงมาก แต่พบว่า

กิจกรรมของ RuDP carboxylase ลดลง 30% แม้ว่าเอนไซม์หลายชนิดในวัฏจักรคาร์ลวินยังคงปกติ การที่เอนไซม์หลักในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์คือ RuDP carboxylase มีกิจกรรมลดลง อัตราการสังเคราะห์แสงในส่วนนี้ของพืชที่ขาดเหล็กจึงต่ำกว่าปกติ (Terry and Abadia, 1986)

มีรายงานหลายฉบับที่กล่าวถึงการขาดเหล็กในพืช เช่น รายงานของวิเศษ (2534) ที่ศึกษาอาการขาดเหล็กของต้นส้ม พบว่าส้มที่มีอาการขาดเหล็ก จะมีใบบางกว่าปกติ บนแผ่นใบมีสีเขียวจัด เกิดอาการที่ส่วนยอด ใบจะร่วงก่อนกำหนด มีการติดผลน้อย และในอ้อยที่แสดงอาการขาดเหล็ก จะพบใบอ่อนมีสีเขียวอ่อนเป็นทางยาวตามความยาวของใบ แต่เส้นใบมีสีเขียวเข้มตามปกติ รากจะสั้น มีการแตกรากแขนงทุติยภูมิน้อย (เกษม, 2515) และจากรายงานที่ประเมินอาการเหลืองซีดของต้นกล้วยคาลิปัตส์ ซึ่งเป็นผลจากที่สภาพของวัสดุปลูกและน้ำที่ให้ มีระดับ pH เป็นกลางถึงเป็นด่าง ทำให้ใบของกล้วยคาลิปัตส์ขาดธาตุเหล็กและจุลธาตุอื่นๆ ที่ละลายในสภาพกรด พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงและยังกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของใบด้วย (สุนทร, 2546)

คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll)

คลอโรฟิลล์เป็นสารสี (pigment) ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงโดยตรง ที่พบมากมี 4 ชนิดได้แก่ คลอโรฟิลล์เอ บี ซี และดี เป็นสารสีสำคัญที่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสง การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นในเวลาเพียง 10^{-15} วินาที โดยช่วงนี้พลังงานจากโฟตอน (photon) จะเคลื่อนย้ายไปยังอิเล็กตรอนในสารสีตามกฎของ Einstein-Stark ที่กล่าวว่าในช่วงเวลาหนึ่ง อนุภาค 1 โฟตอน จะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นได้เพียง 1 อิเล็กตรอนเท่านั้น และอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะเคลื่อนที่จากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) โดยมีระยะทางเท่ากับพลังงานของโฟตอนนั้น เนื่องจากสารสีที่ใช้ในการดูดกลืนแสง เช่น คลอโรฟิลล์มีอิเล็กตรอนหลายตัว ดังนั้นเมื่อได้รับแสงโฟตอนแต่ละตัวที่มีพลังงานต่างกัน ทำให้อิเล็กตรอนแต่ละตัวเคลื่อนที่ไปยังสถานะถูกกระตุ้นในระดับที่แตกต่างกันด้วย โมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้อยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเคลื่อนที่มาสู่สถานะพื้น ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 10^{-9} วินาที และปลดปล่อยพลังงานออกมา มีหลายวิธีที่สารสีเหล่านี้จะปลดปล่อยพลังงานออกมาแล้วกลับคืนสู่สถานะพื้น ได้แก่

1. inductive resonance เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนในสถานะถูกกระตุ้นจะถูกนำไปใช้ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง เรียกว่า photochemistry โดยเป็นการเคลื่อนย้ายของพลังงานที่เกิดขึ้นของสารสีในคลอโรพลาสต์ พีซีใช้พลังงานแสงที่ดูดกลืนในกระบวนการนี้มากที่สุด ค่าปกติของพีซีเท่ากับ 0.83 คือ ร้อยละ 83 ของแสงที่ใช้ (สุนทรีและธาดา, 2543)

2. thermal deactivation เป็นการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน โดยเกิดขึ้นใน 2 ช่วง ช่วงแรก เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่กลับลงมาสู่สถานะถูกกระตุ้นที่มีระดับพลังงานต่ำที่สุด (the lowest excited singlet state) และช่วงหลังเป็นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลับสู่สถานะพื้น

3. fluorescence เป็นการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของการเรืองแสง จะเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวช่วงคลื่นมากกว่าแสงสีแดง (>660 nm)

ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง Photosystem II (Quantum yield)

สุนทรีและธาดา (2543) กล่าวว่า “การวัดรังสีฟลูออเรสเซนซ์เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ เมื่อพลังงานแสงตกใส่เสารับโฟตอน (photon antenna) พลังงานแสงจะแยกอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของน้ำ แล้วส่งผ่านระบบส่งถ่ายอิเล็กตรอนของ PSII ทำให้ reaction centers ได้แก่ plastoquinone ที่รับอิเล็กตรอนกลายเป็นอยู่ในสภาพรีดิวซ์ ซึ่งขณะนั้น reaction centers อยู่ในสภาพปิด ในช่วงนี้พลังงานแสงที่ยังได้รับจะกลายเป็นส่วนเกิน เพราะอิเล็กตรอนที่แสงแยกให้ไม่สามารถส่งถ่ายต่อไปได้ พลังงานส่วนนี้ต้องกำจัดทิ้งในรูปความร้อนและรังสีฟลูออเรสเซนซ์ ระดับของฟลูออเรสเซนซ์ที่วัดได้จึงมีค่าสูง ต่อมาเมื่อ reaction centers ส่งถ่ายอิเล็กตรอนไปแล้วอยู่ในสภาพออกซิไดซ์ใหม่คืออยู่ในสภาพเปิด จะสามารถเปิดรับอิเล็กตรอนได้อีก รังสีฟลูออเรสเซนซ์ก็จะต่ำลงสลับกัน การลดระดับของรังสีฟลูออเรสเซนซ์ในรูปนี้เป็นการลดโดยกระบวนการสังเคราะห์แสง (photochemical quenching) ส่วนการลดโดยวิธีอื่นทั้งหมดเรียกว่าเป็น non-photochemical quenching วิธีหลักคือ เป็นรังสีความร้อนแผ่จากใบ และการลดที่เกี่ยวกับความเข้มข้นของโปรตอน (ประจุบวก หรือ ΔpH) ที่เยื่อของไทลาคอยด์”

การวัดคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซนซ์จะใช้คำนวณค่าประสิทธิภาพการรับแสงของระบบ PSII ซึ่งวัดได้ทั้งในสภาพมืดและสว่าง ใบพืชที่มีการเจริญเติบโตตามปกติค่าในที่มืด (ϕ_{dark}) จะแสดงถึงสัดส่วนของพลังงานแสงที่ใบพืชดูดกลืนแล้วสามารถนำไปใช้ที่ reaction centers เมื่อ reaction centers อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่าน PSII ที่สมบูรณ์แล้ว จะเป็นค่าสูงสุด โดยใบพืชปกติจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.80 – 0.83 และหากอยู่ในสภาพไม่เหมาะสมค่านี้จะลดลง ส่วนค่าประสิทธิภาพขณะที่ใบได้รับแสง (ϕ_{PSII}) เนื่องจากใบได้รับแสงบางส่วนจากด้านนอกทำให้ reaction centers ไม่ได้อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ ค่านี้จึงบอกถึงสัดส่วนของ reaction centers ที่สามารถรับอิเล็กตรอนได้ในขณะนั้น และยังคงคำนวณการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ซึ่งจะบอกถึงอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนได้อีกด้วย

วิธีการนี้นิยมใช้วัดการตอบสนองของพืชต่อสภาพเครียดของสิ่งแวดล้อม เมื่อพืชอยู่ในสภาพที่ไม่เหมาะสม พลังงานที่ส่งมายังคลอโรพลาสต์สูงเกินกว่าที่จะใช้หมด จึงเป็นอันตรายต่อระบบการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน เนื่องจากการได้รับความเข้มแสงที่สูงเกินไปเป็นเวลานานทำให้โปรตีนที่เกี่ยวข้องกับระบบการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเสียหาย โดยเฉพาะส่วนของโปรตีน D1 ซึ่งเป็น reaction centers ของ PSII หากกระบวนการซ่อมแซมโปรตีนเกิดขึ้นไม่ทันจะทำให้เกิด Photoinhibition ได้ (Buchanan *et al.*, 2000) ต้นสาเล่ที่ขาดน้ำและธาตุเหล็กค่า ϕ_{dark} จะลดลงจาก 0.8 เป็น 0.7 และยังมีผลให้ ϕ_{PSII} ลดต่ำลงจากเดิม (Morales *et al.*, 2000) เช่นเดียวกับค่า ϕ_{dark} ของใบ sugar beet ที่มีค่าลดลง เมื่ออยู่ในสภาพขาดเหล็ก (Abadia, 1992)

อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (Net photosynthesis rate)

หมายถึงอัตราการสร้างสารประกอบคาร์บอนจากวัตถุดิบ คือคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งขึ้นกับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปากใบ และอัตราการตรึงโดย 2 กระบวนการหลักในคลอโรพลาสต์ คือกระบวนการสร้างพลังงานโดยระบบรับแสง และกระบวนการทางชีวเคมีที่ใช้พลังงานที่ได้ร่วมกับเอนไซม์ในการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบคาร์บอน (สุนทรี, 2546) ค่าที่วัดได้ คือค่าอัตราสังเคราะห์ด้วยแสงจริง (gross photosynthesis rate) หักออกด้วยอัตราการหายใจเชิงแสง (photorespiration) ซึ่งเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดควบคู่กับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้สารประกอบคาร์บอนที่พืชสังเคราะห์ได้ส่วนหนึ่งเกิดสูญเสียไปกับกระบวนการหายใจ ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A = P_g - R_p \quad (3)$$

A = อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ, $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

P_g = อัตราสังเคราะห์ด้วยแสงจริง, $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

R_p = อัตราหายใจเชิงแสง, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

ดังเช่นการศึกษาต้นมะม่วงที่ถูกน้ำท่วม เมื่ออากาศแห้งรุนแรงขึ้น แรงดึงคายน้ำสูงเกินกว่าที่รากจะดูดน้ำเพื่อชดเชยได้ทัน อัตราคายน้ำที่ลดลงทำให้ใบร้อนขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยตรง จนอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิติดลบและค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงก็ลดลงอย่างชัดเจน (สุนทรี และสุทิน, 2547)

มวลชีวภาพ (Biomass)

เป็นการวัดการเจริญเติบโตในแง่การสะสมมวลแห้ง ที่เป็นผลมาจากพื้นฐานของกระบวนการทางสรีรวิทยา ดังนี้

$$\text{Dry mass} = \text{Photosynthesis} - \text{Respiration} - \text{Loss} \quad (4)$$

การวัดมวลชีวภาพสามารถนำมาวิเคราะห์การเจริญเติบโตได้ การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางสรีรวิทยากับการสร้างมวลแห้งเพื่ออธิบายถึงความแตกต่างของการเจริญเติบโตที่เกิดขึ้น เช่น ถ้ามีอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูง ก็น่าจะมีมวลแห้งสูงด้วย ดังรายงานการศึกษามวลชีวภาพเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาของต้นยูคาลิปตัสที่เกิดอาการยอดตายในเขตภาคตะวันตก พบว่าปัญหาอาการตายยอดเกิดจากยูคาลิปตัสดังกล่าวมีระบบรากที่เล็กกว่าต้นปกติถึง 10 เท่า มีมวลทั้งต้นน้อยกว่า การดูดน้ำและอาหารจึงถูกจำกัด (สุนทรี และ คัทลียา, 2547) และในบางงานยังศึกษามวลชีวภาพควบคู่กับการวิเคราะห์ธาตุอาหาร เพื่อประโยชน์ในการประเมินอัตราการให้ปุ๋ยในพืชได้ด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

แนวการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยน pH ของสารละลายรอบราก และอัตราการเปลี่ยนแปลง pH อย่างรวดเร็ว ที่มีผลต่อระดับความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็กในใบของต้นกล้วยคาลิปัตส์ คามาลดูเลนซิส ดำเนินการโดยปลูกต้นกล้วยในสารละลายธาตุอาหารพืช เพื่อติดตามผลของการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชจากกรดเป็นด่าง (5.7 ± 0.3 เปลี่ยนเป็น 8.5 ± 0.3) ด้วย KOH เทียบกับ KHCO_3 หลังจากระยะเวลาหนึ่งจะให้ pH ที่เป็นด่างกลับลดลงเป็นกรด (8.5 ± 0.3 เปลี่ยนเป็น 5.7 ± 0.3) ระยะเวลาการเปลี่ยน pH อยู่ภายใน 3 วัน เป็นระยะเวลาที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น 2 การทดลอง (รายละเอียดในภาคผนวก) ระหว่างช่วงการทดลองจะวัดและบันทึกสภาพอากาศควบคุมไปด้วย ได้แก่ ความชื้นแสง อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ผลกระทบต่อพืชแสดงด้วยพารามิเตอร์ ได้แก่ pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทส ปริมาณธาตุเหล็กทั้งต้น ปริมาณคลอโรฟิลล์ใบ ประสิทธิภาพการใช้แสง อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด และมวลชีวภาพ โดยวัดหลังจากที่ใบมีอายุได้ 17-19 วัน เก็บข้อมูลเป็นเวลา 25 วัน รวมระยะเวลาวัดค่าต่างๆ 42 วันซึ่งรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

การเตรียมพืชปลูกในสารละลายธาตุอาหารพืช

ต้นกล้วยคาลิปัตส์ คามาลดูเลนซิส เป็นสายต้นเดียวกับที่พบปัญหาในแปลงปลูกที่ อ.ด่านมะขามเตี้ย จ.กาญจนบุรี ซึ่งผ่านการคัดเลือกด้วยวิธีเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อจากห้องปฏิบัติการของบริษัทสยามฟอเรสทรี จำกัด นำต้นกล้วยเพาะในโรงเรือนเป็นเวลา 3 เดือน จนต้นกล้วยมีใบ 3 - 4 คู่ ก่อนย้ายปลูกในกระบะที่ผสมสารละลายธาตุอาหารพืชตามสูตรของ James *et al.* (2002) ที่ประกอบด้วย

ชื่อสารเคมี	ความเข้มข้น ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	ปริมาณที่ใช้ (mg l^{-1})
NH_4NO_3	50.00	4.020
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	400.00	94.060
KH_2PO_4	20.00	2.721
K_2SO_4	600.00	104.556

ชื่อสารเคมี	ความเข้มข้น ($\mu\text{mol l}^{-1}$)	ปริมาณที่ใช้ (mg l^{-1})
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200.00	49.296
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	600.00	88.212
H_3BO_3	5.00	0.309
$\text{NaMoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.03	0.007
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.75	0.215
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.00	0.169
$\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.20	0.056
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.20	0.049
Fe(III)SO_4	10.00	4.000
EDTA	10.00	3.720

ปรับ pH ตามตำรับการทดลอง โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD มี 6 ตำรับ ตำรับละ 3 ซ้ำ คือให้สารละลายเริ่มต้นมี pH กรดและด่าง แล้วให้ระดับ pH เปลี่ยนแปลงตามจริง กับมีการปรับให้ pH สารละลายคงที่ตลอดการทดลอง โดย 4 ตำรับนี้ เป็นสภาพของขอบเขตบนกับล่าง ส่วนอีก 2 ตำรับให้สารละลายมีการปรับ pH เปลี่ยนจากกรดเป็นด่าง ภายใน 3 วัน ด้วย KOH เทียบกับ KHCO_3 หลังจาก pH เป็นด่าง คงที่ 15 วัน จะปรับลดสภาพกลับเป็นกรดภายใน 3 วัน ด้วย HCl รายละเอียดของแต่ละตำรับมีดังนี้

ตำรับที่ 1 เล็งในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับ pH เริ่มต้นให้เท่ากับ 5.7 ± 0.3 ด้วย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH, potassium hydroxide) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl, hydrochloric acid) จากนั้นให้ pH เปลี่ยนแปลงไปตามจริงโดยไม่มีการปรับสภาพ

ตำรับที่ 2 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 5.7 ± 0.3 ด้วย สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วปรับรักษาให้ pH คงที่ตลอดเวลาทดลอง ปรับ pH ทุกวันในช่วงเวลา 7.00 – 9.00 น. และ 16.00 - 18.00 น.

ตำรับที่ 3 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 5.7 ± 0.3 เป็นเวลา 18 วัน แล้วจึงปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ภายในเวลา 3 วัน จนสารละลายธาตุอาหารมี pH เท่ากับ 8.5 ± 0.3 ปรับรักษา pH คงที่ไว้เป็นเวลา 15 วัน แล้วจึงปรับ pH ให้ลดลงเป็น 5.7 ± 0.3 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) อย่างต่อเนื่องภายในเวลา 3 วัน จน pH ของสารละลายธาตุอาหารสุดท้ายเท่ากับ 5.7 ± 0.3 และรักษา pH นี้ให้คงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

ตำรับที่ 4 คือปรับ pH สารละลายธาตุอาหารพืชแนวเดียวกับตำรับที่ 3 แตกต่างกันที่ใช้โพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (KHCO_3 , potassium hydrogen carbonate) เป็นตัวปรับ pH

ตำรับที่ 5 เลี้ยงต้นกล้าในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มี pH เริ่มต้นเท่ากับ 8.5 ± 0.3 โดยปรับสารละลายด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นให้ pH เปลี่ยนแปลงไปตามจริงโดยไม่มีการปรับสภาพ

ตำรับที่ 6 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชมีค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 8.5 ± 0.3 ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วปรับรักษาให้ pH คงที่ตลอดเวลาทดลอง ปรับ pH ทุกวันในช่วงเวลา 7.00 – 9.00 น. และ 16.00-18.00 น.

ตารางที่ 1 สรุปวิธีการทดลองในแต่ละตำรับ

ตำรับ	วิธีการปรับค่า pH ของสารละลาย
T1	pH เริ่มต้น 5.7 และให้ pH เปลี่ยนตามจริง
T2	pH เริ่มต้น 5.7 และปรับให้คงที่ตลอด
T3	pH เริ่มต้น 5.7 เป็นเวลา 18 วัน แล้วปรับเป็น 8.5 ด้วย KOH ภายใน 3 วัน คงค่า pH นี้ 15 วัน จึงปรับลดลงเท่าเดิม
T4	pH เริ่มต้น 5.7 เป็นเวลา 18 วัน แล้วปรับเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3 ภายใน 3 วัน คงค่า pH นี้ 15 วัน จึงปรับลดลงเท่าเดิม
T5	pH เริ่มต้น 8.5 และให้ pH เปลี่ยนตามจริง
T6	pH เริ่มต้น 8.5 และปรับให้คงที่ตลอด

ระหว่างทดลองมีการเปลี่ยนสารละลายทุกสัปดาห์ โดยตำรับที่ 1 และ 5 เมื่อเปลี่ยนสารละลายจะปรับ pH ให้เท่ากับ pH เดิมในสารละลายเก่าขณะนั้น ตำรับที่ 2 และ 6 ปรับ pH ให้ได้ 5.7 ± 0.3 และ 8.5 ± 0.3 สำหรับตำรับที่ 3 และ 4 ทำการปรับ pH ให้ได้ตามที่กำหนดในแต่ละตำรับการทดลอง

สภาพอากาศ

ติดตั้งเครื่องมือวัดและบันทึกสภาพอากาศภายในโรงเรือนตลอดระยะเวลาการทดลอง ข้อมูลอากาศที่วัด ได้แก่ ค่าความเข้มแสงที่พืชใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (PPF, photosynthetic photon flux) ซึ่งเป็นแสงในช่วงคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เพื่อใช้คำนวณแรงดึงระเหยน้ำ (air vapor pressure deficit or difference, VPD_{air}) (สุนทรีและคณะ, 2544) โดยติดตั้งอุปกรณ์กับเสาที่สูงจากพื้น 50 เซนติเมตร กลางบริเวณพื้นที่ปลูก และให้บันทึกค่า ทุก 15 นาที คำนวณค่าเฉลี่ยในแต่ละวัน ค่าแรงดึงระเหยน้ำเป็นค่าความแตกต่างระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัว (e°_T) กับความดันไอน้ำจริง (e_a) ณ อุณหภูมิขณะนั้น

$$e_a = e^{\circ}_T \times \text{RH} \quad (5)$$

$$\text{VPD}_{\text{air}} = e^{\circ}_T - e_a = e^{\circ}_T (1 - \text{RH}) \quad (6)$$

เมื่อ RH_{air} คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (ค่าสัดส่วน) ความดันไอน้ำอิ่มตัว (e°_T) คำนวณได้จาก
 อุณหภูมิกอากาศ (T,C) ขณะนั้น (Anonymous, 1990)

$$e^{\circ}_T = 0.61083 \times 10^{\left[\frac{7.6448T}{242.62+T} \right]} \quad (7)$$

การเลือกตัวอย่างใบ

การศึกษาคั้งนี้แต่ละตำรับแบ่งใบที่ใช้เก็บข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดละ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ต้น
 และใช้ 1 ใบต่อ 1 ต้น ดังนี้

ใบชุดที่ 1 เรียกว่า ใบตัด คือใบคู่ที่ 3 นับจากส่วนยอดที่คลี่ออกเป็นใบแล้ว โดย
 เริ่มต้นตัดใบวัดค่าต่างๆ ขณะที่ใบมีอายุ 17-19 วัน จากต้นที่เลือกแบบสุ่ม

ใบชุดที่ 2 เรียกว่า ใบตาม คือเริ่มต้นวัดค่าต่างๆ จากใบที่มีอายุได้ 17 วัน จากนั้น
 ติดตามวัดค่าในใบเดิม จนใบมีอายุได้ 42 วัน

ตารางที่ 2 ตัวอย่างใบทั้ง 2 ชุด ชุดละ 1 ใบ ใช้ศึกษาพารามิเตอร์ ดังนี้

พารามิเตอร์ที่ศึกษา	ใบตัด	ใบตาม
1. pH ของสารละลายคั้นจากใบ	+	-
2. ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทส	+	-
3. ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ	+	-
4. ประสิทธิภาพการให้แสง	+	+
5. อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด	+	+

พารามิเตอร์ที่ศึกษา

1. pH ของสารละลายคั้นจากใบ (pH of leaf solution)

นำใบสดบรรจุในท่อพลาสติกก่อนแล้วคั้นสารละลายจากใบด้วยเครื่องคั้นแบบลูกกลิ้ง วัดค่า pH ของส่วนใสที่ได้ด้วยเครื่อง pH meter (รุ่น cardy twin pH meter บริษัท Spectrum Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา) สารละลายที่ได้จะถือว่าเป็นส่วนที่อยู่นอกเยื่อหุ้มเซลล์ ได้แก่ ท่อน้ำ ท่ออาหาร ผนังเซลล์ และช่องว่างระหว่างเซลล์ (คือส่วนของอะพoplast เป็นหลัก) วัดค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบตัด ทุก 1-2 วัน ตั้งแต่วันที่ 17 (ก่อนปรับ pH ในสารละลาย) จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

2. ปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทส (Ferric reductase content)

ศึกษาปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในใบ ด้วยวิธีการของ Brain *et al.* (2002) กล่าวคือเจาะแผ่นใบ โดยหลีกเลี่ยงเส้นกลางใบของใบตัด (เป็นใบเดียวกันกับที่ใช้วัดค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ) เป็นวงกลมขนาด 0.6 ตารางเซนติเมตร ที่มีน้ำหนักประมาณ 0.0070 กรัม ใส่ในหลอดแก้วที่มีสารละลายทดสอบปริมาตร 4 มิลลิลิตร ซึ่งประกอบด้วย

CaSO ₄ ·2H ₂ O	0.2	มิลลิโมลต่อลิตร
2-(N-morpholino)-ethylenesulfonic acid	5.0	มิลลิโมลต่อลิตร
Fe(III)EDTA	0.1	มิลลิโมลต่อลิตร
Bathphenanthroline disulfonate)	0.2	มิลลิโมลต่อลิตร

วางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการนำชิ้นส่วนของพีชออก และนำส่วนใสมาอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 535 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยา จากสมการ

$$Za = CV/t \quad (8a)$$

$$C = A / \epsilon b \quad (8b)$$

เมื่อ	Za = Enzyme activity (mmol min ⁻¹)
	A = absorbance reading
	ϵ = extinction coefficient (22.14 mM ⁻¹ cm ⁻¹)
	b = light path length (cm)
	V = volume (l)
	t = time (min)

ปริมาณเอนไซม์ในราก วิเคราะห์โดยนำส่วนปลายรากยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร จำนวน 1-2 ชิ้น ล้างในน้ำกลั่น ชับน้ำให้แห้ง นำไปซึ่งมวลสด แล้วใส่ในหลอดแก้วที่มีสารละลายทดสอบปริมาตร 4 มิลลิลิตร จากนั้นปฏิบัติตามขั้นตอนต่างๆ เหมือนกับการทดสอบในใบ

กำหนด 1 หน่วยเอนไซม์ (U) มีค่าเท่ากับ ปริมาณของเอนไซม์ที่สามารถรีดิวซ์ Fe(III) ให้เป็น Fe(II) ในรูปของ Fe(II)BPDS จำนวน 1 $\mu\text{mol min}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

3. ความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งหมด (Total Fe content)

ศึกษาความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งหมดของทุกตำรับ ตำรับละ 2 ซ้ำ โดยแบ่งต้นกล้า ออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนราก ลำต้นและใบ อบแห้งที่อุณหภูมิ 65 – 70 องศาเซลเซียส แล้ว วิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมด ด้วยวิธีย่อยในกรด (mixed-acid digestion) และวัดความเข้มข้น ด้วยเครื่อง ICP-OES (Perkin Elmer 4300) วิเคราะห์ค่าโดยห้องปฏิบัติการภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิเคราะห์ ตัวอย่าง 2 ครั้ง คือ ตัวอย่างพืชก่อนปรับ pH ในสารละลายตามตำรับการทดลอง 1 วัน (วันที่ 17) และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 42) ค่าที่วิเคราะห์ได้นำมาคำนวณความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยทั้ง ต้น ดังนี้

$$FeT = \frac{(DMR \times FeR) + (DMS \times FeS) + (DML \times FeL)}{DMR + DMS + DML} \quad (9)$$

เมื่อ	FeT	= ความเข้มข้นของเหล็กเฉลี่ยทั้งต้น ($\mu\text{g g}^{-1}$)
	DMR	= มวลแห้งของส่วนราก (g)
	DMS	= มวลแห้งของส่วนลำต้น (g)
	DML	= มวลแห้งของส่วนใบ (g)
	FeR	= ความเข้มข้นของเหล็กส่วนราก ($\mu\text{g g}^{-1}$)
	FeS	= ความเข้มข้นของเหล็กส่วนลำต้น ($\mu\text{g g}^{-1}$)
	FeL	= ความเข้มข้นของเหล็กส่วนใบ ($\mu\text{g g}^{-1}$)

4. ปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll content)

สกัดหาปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ โดยนำใบเจาะเป็นแผ่นวงกลมขนาด 0.6 ตารางเซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วที่บดที่เติมสารดีเอ็มเอฟ (DMF : N,N-Dimethylformamide) ปริมาตร 4 มิลลิลิตร เก็บในที่มืดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันไม่ให้คลอโรฟิลล์ถูกทำลายโดยแสงทิ้งไว้ประมาณ 24 - 48 ชั่วโมง คลอโรฟิลล์จะถูกสกัดออกจากใบทั้งหมด (แผ่นใบจะมีสีเขียวซีด ไม่มีสีเขียวเหลืออยู่) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย (absorbance, A) ที่ความยาวคลื่น 647 และ 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้สารละลายดีเอ็มเอฟบริสุทธิ์ เป็นตัวตั้งค่าที่ศูนย์ ค่าที่ได้นำมาคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวม ซึ่งเป็นผลรวมของคลอโรฟิลล์ทั้งสองชนิด ดังสมการ (Moran, 1982; สุนทรื และคณะ, 2543)

$$\text{Chl}_a = (-2.99A_{647} + 12.64A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{Area} \times 100) \quad (10a)$$

$$\text{Chl}_b = (23.26A_{647} - 5.60A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{Area} \times 100) \quad (10b)$$

$$\text{Chl}_{\text{total}} = (20.27A_{647} + 7.04A_{664}) \times \text{Vol} / (X \times \text{Area} \times 100) \quad (10c)$$

เมื่อ	Chl _a	= ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (g m^{-2})
	Chl _b	= ปริมาณคลอโรฟิลล์บี (g m^{-2})
	Chl _{total}	= ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (g m^{-2})
	A ₆₄₇	= ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 647 นาโนเมตร
	A ₆₆₄	= ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 นาโนเมตร
	Vol	= ปริมาตรของสารเคมี DMF ที่ใช้สกัด (ml)

X	= สัดส่วนการเจือจาง (เท่ากับปริมาณสารละลายเริ่มต้นหารด้วย ปริมาตรสารละลายเจือจาง ใช้เมื่อสารละลายสกัดครั้งแรกมีความ เข้มข้นสูงเกินไปจนค่าดูดแสงอ่านค่าเกิน 0.8)
Area	= พื้นที่แผ่นใบที่ใช้สกัด (cm ²)
100	= คูณกับพื้นที่ใบเพื่อปรับหน่วยจาก g cm ⁻² เป็น g m ⁻²

5. ประสิทธิภาพการใช้แสง (Quantum yield)

ศึกษาระบบรับแสง PSII ในคลอโรพลาสต์ของใบพืช โดยวัดประสิทธิภาพการใช้แสง ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ต่อเข้ากับหัววัดที่เป็นกล่องบรรจุใบแบบ leaf chamber fluorometer โดยเริ่มวัดประสิทธิภาพ การใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) ในช่วงเวลา 20.00 - 23.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่มีแสงเพื่อให้ reaction centers อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ เครื่องจะให้ความเข้มแสงต่ำก่อน (weak modulated beam) เพื่อ อ่านบันทึกค่าการเรืองแสงต่ำสุด คือ F_0 (minimum, quasi-dark fluorescence yield) จากนั้น เครื่องจะส่งแสงความเข้มสูงมากเพื่อให้เกิดการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนเต็มกำลังรับของระบบ PSII (saturating light pulse) เพื่อให้ reaction centers อยู่ในสภาพปิดหมด (plastoquinone อยู่ใน สภาพ reduced) ค่าที่อ่านได้ในช่วงนี้เป็นค่าการเรืองแสงสูงสุด คือ F_m (maximum total fluorescence yield) ผลต่างของสองค่า เรียกว่า F_v (variable fluorescence, $F_v = F_m - F_0$) พารามิเตอร์ที่สนใจคือค่าสัดส่วนของ F_v/F_m เรียกว่า maximum quantum yield เขียนรูปสมการ ได้ดังนี้

$$\phi_{dark} = \frac{F_m - F_0}{F_m} = \frac{F_v}{F_m} \quad (11)$$

ϕ_{dark} เป็นค่าแสดงถึงสัดส่วนของ photon ที่ถูก absorbed โดยใบ แล้วส่งให้ PSII ใช้ใน การเกิด photochemistry เป็นค่าสูงสุดของประสิทธิภาพการใช้แสง ซึ่งวัดได้เมื่อให้ใบอยู่ในที่มีด เพื่อให้ระบบ PSII อยู่ในสภาพเปิดเต็มที่ (plastoquinone อยู่ในสภาพ oxidized)

การวัดในช่วงกลางวันที่มีแสง (ϕ_{PSII}) และให้แสงที่ความเข้มแสงเท่ากับ 1000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ซึ่งได้จากการศึกษาก่อนหน้านี้ที่ระดับความเข้มแสงอิ่มตัวของใบยูคาลิปตัส (สุนทรีและ คัทลียา, 2547) เครื่องจะตรวจจับรังสีฟลูออเรสเซนซ์ควบคู่ไปกับการวัดอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ

สูงสุด ($A_{1,000}$) โดยตรวจจับสนธิฟลูออเรสเซนซ์ที่ได้รับแสงขณะนั้น ค่าที่ได้ คือ F_s (steady state fluorescence)(ขณะที่ PSII บางส่วนอยู่ในสภาพ reduced) จากนั้นเครื่องจึงปล่อยแสงที่มีความเข้มแสงสูงมากเพื่อวัดจับสนธิฟลูออเรสเซนซ์สูงสุด คือค่า F_m' (maximum total fluorescence yield) แล้วจึงปรับแสงที่ให้ใบให้มีอีกครั้ง จับสนธิฟลูออเรสเซนซ์ที่ตรวจจับได้จะเป็น F_o' (minimum fluorescence) พารามิเตอร์ที่สนใจคือ

$$\phi_{PSII} = \frac{F_m' - F_s}{F_m'} \quad (12)$$

ϕ_{PSII} จึงเป็นสัดส่วนของ photon ที่ถูก absorbed โดยใบ แล้วส่งให้ PSII ใช้ในการเกิด photochemistry ในสภาพที่ใบได้รับแสงอยู่ก่อน ค่าที่วัดได้ในสภาพได้แสงนำไปคำนวณอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) หน่วยเป็น $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$

$$ETR = \left(\frac{F_m' - F_s}{F_m'} \right) \times f \times I \times \alpha_{\text{leaf}} \quad (13)$$

เมื่อ f คือ สัดส่วนของแสงที่เข้าสู่ระบบรับแสง PSII และ PSI (พืช C3 ใช้ค่าเท่ากับ 0.5), I คือ ความเข้มแสง และ α_{leaf} คือสัมประสิทธิ์การดูดซับแสงของใบพืช ซึ่งตั้งไว้เท่ากับ 0.85 (Anonymous, 2002) วัดค่านี้ในเวลา 8.00 -13.00 น. ในใบทั้ง 2 ชุด ทุก 1-2 วัน

6. อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด (Maximum net photosynthesis rate, $A_{1,000}$)

วัดอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ภายใต้สภาพที่กำหนด โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบพืช ภายใต้สภาพที่ทำให้ปากใบเปิดได้มากที่สุด ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ใช้กล่องบรรจุใบที่มีอุปกรณ์เสริมที่ให้แสงและวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ (leaf chamber fluorometer) ไปพร้อมกัน ควบคุมสภาพภายในกล่องบรรจุใบให้ได้ ความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ซึ่งเป็นประมาณค่าความเข้มแสงอิ่มตัวของใบยูคาลิปตัส (สุนทรและคัทลียา, 2547) และปรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ $400 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$ ปรับอุณหภูมิของกล่องบรรจุใบให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70-75 % โดยให้ปลายสายอากาศอยู่ใกล้ปากถึง

บรรจุอากาศขนาด 20 ลิตร วัดในช่วงเวลา 8.00 - 13.00 ทุก 1-2 วัน ของใบ 2 ชุด ที่เป็นใบเดียวกับที่ใช้วัดประสิทธิภาพการใช้แสง

7. มวลชีวภาพ (Biomass)

ศึกษาเปรียบเทียบมวลชีวภาพของยูคาลิปตัสใน 6 ตำรับ ตำรับละ 3 ต้น โดยการวัดมวลสด และมวลแห้ง พร้อมทั้งวัดพื้นที่ใบทั้งต้น โดยแบ่งต้นออกเป็น 3 ส่วน คือส่วนของราก ลำต้นและใบ นำตัวอย่างที่เก็บไปชั่งมวลสดทันที จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 - 70 องศาเซลเซียส จนมวลคงที่และนำมาวัดมวลแห้งอีกครั้ง เก็บตัวอย่าง 2 ครั้ง คือ ก่อนมีการปรับ pH ในสารละลาย 1 วัน ในวันที่ 17 และหลังจากสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 42

สถานที่ทำการทดลอง

1. ศูนย์วิจัยพืชผักเขตร้อน
2. ห้องปฏิบัติการพฤกษศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์
3. ห้องปฏิบัติการนิเวศ-สรีรวิทยา ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร

ทั้ง 3 หน่วยงานเป็นของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ. กำแพงแสน

จ. นครปฐม

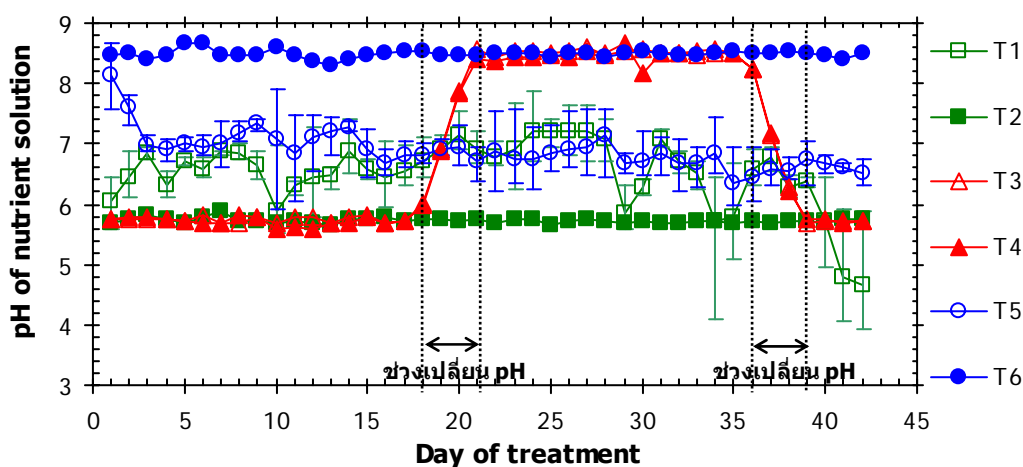
ระยะเวลาทำการทดลอง

เริ่มทำการทดลองเดือนสิงหาคม 2547 และสิ้นสุดเดือนพฤศจิกายน 2547

ผลและการวิจารณ์

1. pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช

ค่า pH ของสารละลายยืนยันค่าตามตำรับการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารทั้ง 6 ตำรับทดลองมีดังนี้ ตำรับ T1 มี pH เริ่มต้น 5.7 และให้ pH เปลี่ยนตามจริง พบว่าค่า pH มีระดับสูงขึ้นกว่าค่าเริ่มต้น โดยมีการแกว่งขึ้นลงอยู่ในช่วง 5.7–7.2 ตลอดการทดลอง จนถึง 2 วันสุดท้ายที่ค่า pH ลดลงต่ำกว่า 5 เพราะความเข้มข้นของธาตุอาหารลดลงจากการดูดใช้อย่างต่อเนื่อง และรากพืชมีการขับ H^+ ออกสู่สารละลายรอบราก ตำรับ T2 มี pH เริ่มต้น 5.7 และปรับรักษาให้คงที่ตลอด จึงมีค่า pH อยู่ที่ 5.7 ตลอดการทดลอง ตำรับ T3 ควบคุม pH ในสารละลายตั้งแต่เริ่มต้นให้อยู่ที่ 5.7 เป็นเวลา 18 วัน จึงปรับเป็น 8.5 ภายใน 3 วัน ด้วย KOH และคงค่า pH นี้ตั้งแต่วันที่ 21–36 เป็นเวลา 15 วัน ในวันที่ 36 จึงปรับค่า pH กลับลดลงเป็น 5.7 ในเวลา 3 วัน และคงค่า pH นี้จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ส่วนตำรับ T4 ทำเหมือนตำรับ T3 เพียงแต่ใช้ $KHCO_3$ เป็นสารปรับ pH โดยให้ pH ของสารละลายมีการปรับเปลี่ยนขึ้นและลงในลักษณะเดียวกัน ตำรับ T5 มี pH เริ่มต้นเท่ากับ 8.5 และปล่อยให้ pH เปลี่ยนตามจริง พบว่าระดับ pH ของสารละลายลดลงจากเริ่มต้นและแกว่งขึ้นลงอยู่ในช่วง 6.4–7.3 ตลอดการทดลอง สุดท้ายคือตำรับ T6 มีค่า pH เริ่มต้น 8.5 และปรับรักษาให้คงที่ จึงมีค่า pH เป็น 8.5 ตลอดการทดลอง



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหาร 6 ตำรับ ตลอดการทดลอง

2. pH ของสารละลายคั้นจากใบ

เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลง pH ในสารละลายธาตุอาหารว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายคั้นจากใบหรือไม่ จึงวัดค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบในตัวอย่างใบที่มีอายุประมาณ 17–19 วัน โดยเริ่มเก็บตัวอย่างหลังจากเลี้ยงในสารละลายแล้วเป็นเวลา 17 วัน

พิจารณาค่า pH เฉลี่ยของสารละลายคั้นจากใบในแต่ละตำรับ (ตารางที่ 1 และภาพที่ 2) พบว่าตำรับที่แสดงค่า pH แตกต่างอย่างชัดเจน คือ ตำรับ T4 (pH เริ่มต้น 5.7 และปรับเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3) ที่สารละลายคั้นจากใบแสดงค่า pH ในแนวเพิ่มขึ้นสูงกว่าตำรับอื่นๆ หลังจากปรับ pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชตามตำรับทดลอง โดยค่าเริ่มต้นของวันที่ 17 คือ 4.46 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่ค่าสุดท้ายในวันที่ 42 และค่าเฉลี่ยในช่วงวันที่ 17–42 คือ 4.71 และ 4.66 ตามลำดับ มีค่าสูงและแตกต่างจากตำรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง นอกจากนี้ยังแสดงได้ว่าค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารกับค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบในทุกตำรับไม่แสดงความสัมพันธ์กันดังภาพที่ 3

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตำรับ T3 (ปรับ pH ด้วย KOH) และตำรับ T4 (ปรับ pH ด้วย KHCO_3) ที่เลี้ยงในสภาพเดียวกัน แตกต่างกันที่สารที่ใช้ปรับ pH พบว่าค่าเฉลี่ยในช่วง 17-42 วันของตำรับ T3 มีค่าต่ำกว่าตำรับ T4 คือมีค่าเฉลี่ย 4.42 เทียบกับ 4.68 (ตารางที่ 1) จึงสรุปได้ว่าการปรับ pH ด้วย KHCO_3 มีผลกระทบทำให้ค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบยุคาลิปตัลสูงชันกว่าการปรับ pH ด้วย KOH

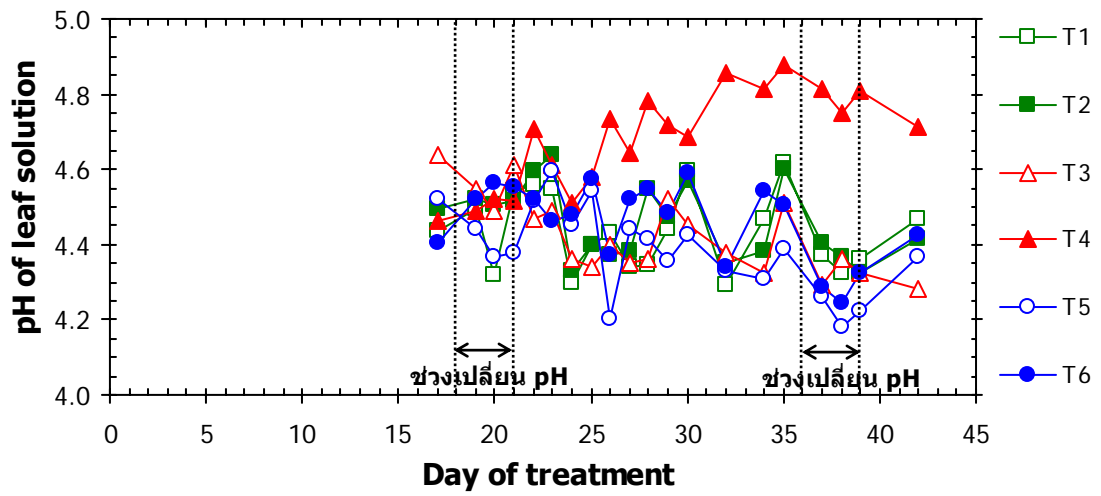
ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ย pH ของสารละลายคั้นจากใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17–42 วัน (เริ่มต้น หมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4)

ตำรับ	pH เริ่มต้น (วันที่ 17)	pH สุดท้าย (วันที่ 42)	pH เฉลี่ยในช่วง (วันที่ 17-42)
T1	4.44	4.47 ^b	4.44 ^{bc}
T2	4.49	4.42 ^{bc}	4.48 ^b
T3	4.55	4.28 ^c	4.42 ^{bc}
T4	4.46	4.71 ^a	4.68 ^a
T5	4.52	4.37 ^{bc}	4.38 ^c
T6	4.41	4.43 ^{bc}	4.45 ^b
P-value	ns	**	**
CV (%)	2.37	1.85	0.71

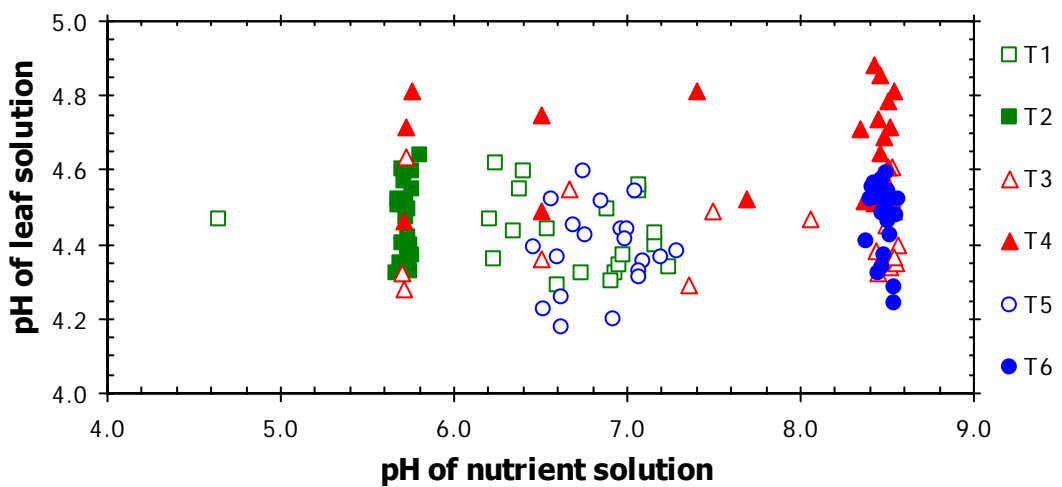
ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายคั้นจากใบของยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17- 42 วัน



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH ของสารละลายธาตุอาหารกับ pH ของสารละลายคั้นจากใบของยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17- 42 วัน

3. ปริมาณเอนไซม์เฟอริกิริดักเทสของยุคาลิปตัส

3.1 ส่วนของราก

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณเอนไซม์เฟอริกิริดักเทสของราก พบว่าปริมาณเอนไซม์ในรากของทุกตำรับมีความผันแปร แต่เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยจะพบว่าตำรับ T4 (pH เริ่มต้น 5.7 ปรับเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3) มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 871 mU g^{-1} ขณะที่ตำรับ T2 (pH เป็น 5.7 ตลอดการทดลอง) มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 659 mU g^{-1} แต่ค่าเฉลี่ยปริมาณเอนไซม์ของรากตลอดช่วงทดลองไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างตำรับ ภาพที่ 4a แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเอนไซม์ในช่วงทดลอง 17-42 วัน พบว่าตำรับ T4 มีปริมาณเอนไซม์ในรากสูงกว่าในช่วง 25 วันแรก แล้วค่าลดลงจนใกล้เคียงกับตำรับอื่น การที่ปริมาณเอนไซม์ในรากของทุกตำรับไม่แสดงความแตกต่างกันนี้เป็นเพราะในสารละลายธาตุอาหารมีธาตุเหล็กในปริมาณสูงเพียงพอ ($10 \text{ }\mu\text{M}$) ผลที่ได้เป็นแนวเดียวกันกับการทดลองปลูกต้นกล้าส้มในสารละลายธาตุอาหารที่มีธาตุเหล็กระดับ 0, 5, 10 และ $20 \text{ }\mu\text{M}$ ที่อยู่ร่วมกับ CaCO_3 ซึ่งพบว่ารากของต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีหรือมีธาตุเหล็กในระดับต่ำ (0 และ $5 \text{ }\mu\text{M}$) มีปริมาณเอนไซม์เฟอริกิริดักเทสสูงกว่าต้นกล้าที่ได้รับธาตุเหล็กสูง (10 และ $20 \text{ }\mu\text{M}$) ถึง 2.5 เท่า (Pestana *et al.*, 2001)

3.2 ส่วนของใบ

ตารางที่ 3 และภาพที่ 4b แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เฟอริกิริดักเทสของใบในช่วงทดลอง 17-42 วัน พบว่าตำรับ T4 มีปริมาณเอนไซม์ในใบสูงชันกว่าตำรับอื่นๆ หลังจากปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารเป็น 8.5 แล้ว โดยค่าเฉลี่ยช่วงวันที่ 17-42 สูงถึง $1,360 \text{ mU g}^{-1}$ ซึ่งแตกต่างจากตำรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ขณะที่ตำรับที่เหลือไม่แสดงความแตกต่างทางสถิติระหว่างตำรับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตำรับ T3 ที่ปรับค่า pH ด้วย KOH กับตำรับ T4 ที่ปรับด้วย KHCO_3 พบว่าค่าเฉลี่ยปริมาณเอนไซม์ส่วนของใบตั้งแต่วันที่ 17-42 ของตำรับ T4 เท่ากับ 1360 mU g^{-1} สูงกว่าตำรับ T3 ที่มีค่าเฉลี่ย 1136 mU g^{-1} อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (ตารางที่ 3) แสดงว่าการปรับ pH ของสารละลายธาตุอาหารด้วย KHCO_3 มีผลทำให้ปริมาณเอนไซม์เฟอริกิริดักเทสในใบสูงกว่าเมื่อปรับ pH ด้วย KOH ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับรายงานของศุภณีย์ (2548) ที่

พบว่าต้นกล้ายูคาลิปตัสที่ปลูกในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนต ปริมาณเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทสในใบมีสูงกว่าต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีไบคาร์บอเนตถึง 2 เท่า

สัดส่วนของปริมาณเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทสในใบต่อราก (ตารางที่ 4) พบว่าค่าเฉลี่ยช่วงวันที่ 17-42 ของทุกตำรับอยู่ในช่วง 1.4 - 2.5 เท่า โดยตำรับ T6 มีค่าต่ำสุด ส่วนตำรับ T4 มีค่าสูงสุด และทุกตำรับไม่แสดงความแตกต่างกันทางสถิติ ปริมาณเอนไซม์ในใบมีค่าสูงกว่าในรากประมาณ 2 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับรายงานของศุภนีย์ (2548) ที่กล่าวว่าปริมาณเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทสในใบยูคาลิปตัสมีค่าสูงกว่าในรากถึง 4 เท่า

สันนิษฐานว่าเมื่อปลูกพืชในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนตสูง การเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กจากรากไปยังส่วนเหนือดินจะถูกขัดขวาง เนื่องจากมีการสังเคราะห์กรดอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งกรดอินทรีย์เหล่านี้จะรวมตัวกับธาตุเหล็กเกิดเป็นสารคีเลตแล้วถูกเก็บสะสมไว้ในแวคิลโลลราก ทำให้มีธาตุเหล็กเพียงส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังส่วนใบได้ (Marschner, 1995) ข้อเสนอนี้ตรงกับรายงานที่ว่าต้นกล้ายูคาลิปตัสที่ปลูกในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนต จะตรวจพบปริมาณกรดอินทรีย์ อันได้แก่ กรดออกซาลิก กรดมาลิก และกรดซิตริก สูงกว่าต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีไบคาร์บอเนต 2, 5 และ 6 เท่าตามลำดับ (ศุภนีย์, 2548) ซึ่งคล้ายกับการทดลองของ Landsberg (1981) ที่ทดสอบพืชในสภาพที่ขาดธาตุเหล็ก พบว่ารากของต้นไคคที่ปลูกในสภาพขาดธาตุเหล็กมีการสังเคราะห์กรดอินทรีย์มากกว่าสภาพไม่ขาดธาตุเหล็กถึง 3 เท่า โดยธาตุเหล็กส่วนใหญ่จะสะสมในส่วนราก และที่ใบมีน้อย จึงเป็นสัญญาณกระตุ้นให้ปริมาณเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทสในใบเพิ่มขึ้น เพื่อดึงธาตุเหล็กในรูป Fe^{2+} ได้มากขึ้น จึงกล่าวได้ว่าเมื่อรากอยู่ในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนตจะมีผลทำให้ปริมาณเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทสในใบเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามพืชที่ปลูกในดินปน ที่ได้รับอิทธิพลของไบคาร์บอเนต แม้แสดงอาการขาดธาตุเหล็ก แต่เมื่อวิเคราะห์ใบพืชอาจมีธาตุเหล็กมากกว่าใบปกติได้ ทั้งนี้เพราะเหล็กอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์มากขึ้น (inactivation) (Nikolic and Romheld, 1999)

รายงานของศุภนีย์ (2548) ยังพบอีกว่าต้นกล้ายูคาลิปตัสสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติทนต่อสภาพดินปน (มีไบคาร์บอเนต) จะมีปริมาณของเอนไซม์เพอริกซ์ดีกเทส สูงกว่าสายพันธุ์ที่ไม่ทนต่อสภาพดินปนทั้งในส่วนของราก และใบ

ตารางที่ 2 ปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในรากยุคาลิปตัส ตลอดช่วง 17–42 วัน

วันที่	ปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในรากยุคาลิปตัส (mU g ⁻¹)						P- value	cv
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	763	771	864	1,307	897	616	ns	42.3
19	1,089	986	878	1,331	561	840	ns	38.7
20	856	826	789	622	351	437	ns	35.1
21	880	977	1,020	1,325	1,211	913	ns	52.3
23	1,069	1,226	916	1,374	658	796	ns	44.5
24	753	876	770	1,124	738	812	ns	23.9
25	1,238	927	1,069	1,339	906	729	ns	39.1
26	531 ^{abc}	412 ^c	685 ^{ab}	707 ^a	591 ^{abc}	457 ^{bc}	*	20.2
27	857	500	1,071	633	919	729	ns	36.9
28	613	385	430	608	400	495	ns	23.4
29	582	429	623	718	495	610	ns	33.2
30	631	673	620	681	517	482	ns	35.5
32	496 ^c	472 ^c	852 ^a	742 ^{ab}	969 ^a	578 ^{bc}	**	17.5
34	439	338	755	697	919	910	ns	43.5
35	757	617	513	634	753	517	ns	34.2
37	844	548	761	570	592	709	ns	41.2
38	762	439	752	809	735	799	ns	26.7
39	448	474	707	507	541	468	ns	31.3
42	936 ^a	648 ^{bc}	636 ^c	823 ^{abc}	910 ^a	882 ^{ab}	*	15.0
เฉลี่ย	765	659	774	871	719	673	ns	31.0

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

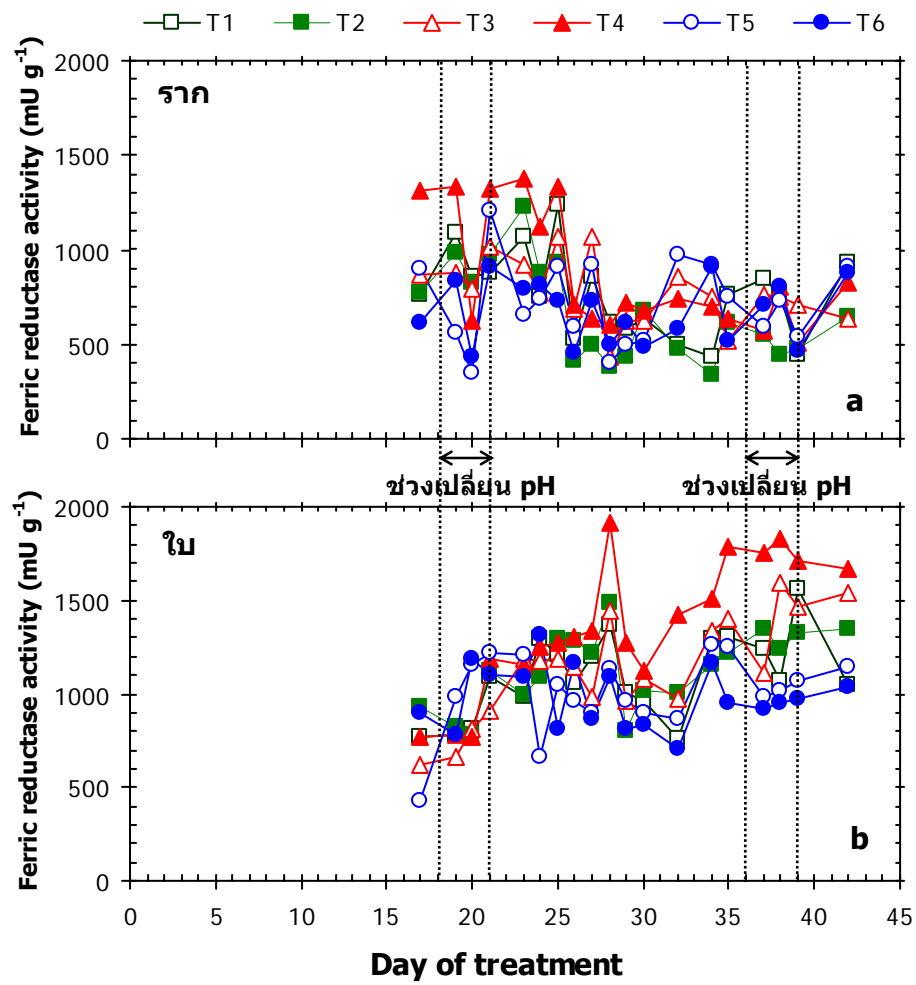
ตารางที่ 3 ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบยูคาลิปตัส ตลอดช่วง 17–42 วัน

วันที่	ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบยูคาลิปตัส (mU g^{-1})						P- value	cv
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	769 ^a	926 ^a	619 ^{ab}	774 ^a	430 ^b	903 ^a	*	20.7
19	777	824	660	783	979	786	ns	28.6
20	809	784	809	767	1,154	1,192	ns	22.3
21	1,096	1,125	914	1,182	1,219	1,099	ns	22.2
23	982	997	1,186	1,154	1,205	1,093	ns	20.2
24	1,297	1,095	1,179	1,255	661	1,314	ns	19.3
25	1,205 ^a	1,299 ^a	1,183 ^a	1,276 ^a	1,049 ^{ab}	809 ^b	*	15.4
26	1,057	1,282	1,142	1,306	965	1,163	ns	29.1
27	1,196	1,214	987	1,340	899	865	ns	17.6
28	1,372 ^b	1,489 ^{ab}	1,443 ^{ab}	1,918 ^a	1,130 ^b	1,087 ^b	*	17.2
29	1,004	805	965	1,276	958	812	ns	18.7
30	964	1,019	1,082	1,124	893	829	ns	12.0
32	755 ^{cd}	1,010 ^b	972 ^{bc}	1,420 ^a	869 ^{bcd}	711 ^d	**	12.9
34	1,298	1,151	1,337	1,509	1,257	1,162	ns	16.5
35	1,304 ^{bc}	1,218 ^{bc}	1,396 ^b	1,791 ^a	1,247 ^{bc}	951 ^c	**	13.9
37	1,236 ^{bc}	1,352 ^b	1,115 ^{bcd}	1,758 ^a	988 ^{cd}	923 ^d	**	10.4
38	1,075 ^c	1,237 ^{bc}	1,591 ^{ab}	1,829 ^a	1,019 ^c	952 ^c	**	16.8
39	1,564	1,325	1,470	1,716	1,070	968	ns	26.3
42	1,052 ^c	1,347 ^{abc}	1,542 ^{ab}	1,668 ^a	1,148 ^{bc}	1,043 ^c	*	16.2
เฉลี่ย	1,095 ^b	1,132 ^b	1,136 ^b	1,360 ^a	1,007 ^b	982 ^b	**	22.2

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริกเรดักเตสในส่วนของ a) ราก และ b) ใบ ของต้นกล้วยคาลิปดัส ในช่วงทดลอง 17-42 วัน

ตารางที่ 4 สัดส่วนปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสในใบต่อรากของต้นกล้วยคาลิปตัด ในช่วง
ทดลอง 17-42 วัน

วันที่	สัดส่วนปริมาณเอนไซม์ในใบต่อราก (เท่า)						P- value	cv
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	1.0 ^{ab}	1.2 ^{ab}	0.7 ^b	0.6 ^b	0.5 ^b	1.5 ^a	*	38.0
19	0.7	0.8	0.8	0.6	1.7	0.9	ns	58.0
20	0.9 ^b	0.9 ^b	1.0 ^b	1.2 ^b	3.3 ^a	2.7 ^a	**	34.4
21	1.2	1.2	0.9	0.9	1.0	1.2	ns	72.1
23	0.9	0.8	1.3	0.8	1.8	1.4	ns	40.7
24	1.7	1.2	1.5	1.1	0.9	1.6	ns	32.8
25	1.0	1.4	1.1	1.0	1.2	1.1	ns	53.4
26	2.0	3.1	1.7	1.8	1.6	2.5	ns	39.3
27	1.4	2.4	0.9	2.1	1.0	1.2	ns	55.5
28	2.2	3.9	3.4	3.2	2.8	2.2	ns	47.3
29	1.7	1.9	1.5	1.8	1.9	1.3	ns	39.8
30	1.5	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	ns	37.2
32	1.5	2.1	1.1	1.9	0.9	1.2	ns	29.8
34	3.0	3.4	1.8	2.2	1.4	1.3	ns	40.9
35	1.7	2.0	2.7	2.8	1.7	1.8	ns	40.7
37	1.5	2.5	1.5	3.1	1.7	1.3	ns	74.3
38	1.4	2.8	2.1	2.3	1.4	1.2	ns	35.8
39	3.5	2.8	2.1	3.4	2.0	2.1	ns	48.5
42	1.1	2.1	2.4	2.0	1.3	1.2	ns	19.4
เฉลี่ย	1.5	2.0	1.5	2.5	2.0	1.4	ns	14.6

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

4. ความเข้มข้นของธาตุเหล็ก

ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนราก ลำต้น และใบของต้นกล้วยคาลิปัส แสดงค่าในตารางที่ 5 และภาพที่ 5 เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือตัวอย่างในวันที่ 17 (ก่อน) และวันที่ 42 (หลังปรับ pH ของสารละลายตัวรับ T3 และ T4) พบว่าทั้ง 2 ครั้งที่วิเคราะห์ทุกตัวรับมีความเข้มข้นของธาตุเหล็กสูงมากที่สุดในส่วนของราก รองลงมาคือใบ และต่ำที่สุดคือลำต้น โดยความเข้มข้นของธาตุเหล็กเกือบทั้งหมด (เกิน 80%) สะสมอยู่ที่ส่วนราก ขณะที่ส่วนอื่นๆ มีธาตุเหล็กอยู่น้อยมาก

พิจารณาในครั้งที่ 1 คือวันที่ 17 ของการทดลอง พบว่าตัวรับ T6 (pH เริ่มต้น 8.5 และคงที่ตลอด) มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนรากสูงที่สุด ขณะที่ลำต้นและใบมีค่าต่ำที่สุด ซึ่งต่างจากตัวรับ T4 ที่ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนรากต่ำที่สุด ส่วนลำต้นกับใบมีค่าสูงกว่า จึงส่งผลให้ค่าเฉลี่ยทั้งต้นของตัวรับ T6 สูงที่สุด และตัวรับ T4 มีค่าต่ำที่สุด แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 5) สำหรับครั้งที่ 2 คือวันที่ 42 ของการทดลอง ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในตัวรับ T6 แสดงผลเช่นเดียวกับตัวอย่างในครั้งที่ 1 คือมีธาตุเหล็กสะสมอยู่ที่รากสูง ส่วนลำต้นและใบมีค่าขณะที่ตัวรับ T4 ให้ผลแตกต่างจากครั้งแรก คือพบความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนของรากสูงขึ้น และส่วนของใบต่ำลง ทำให้ธาตุเหล็กเฉลี่ยทั้งต้นของตัวรับ T4 และ T6 สูงกว่าและแตกต่างจากตัวรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง แสดงว่าการปรับ pH เป็นด่างด้วย KHCO_3 ภายในเวลา 15 วัน มีผลทำให้ต้นกล้วยคาลิปัสมีธาตุเหล็กสะสมอยู่ในส่วนรากมากเหมือนกับต้นกล้วยที่ปลูกในสารละลายต่าง Marschner (1995) อธิบายว่าสารละลายธาตุอาหารที่มี pH เป็นด่างจะมี OH^- อยู่มากทำให้เกิดสารประกอบเหล็กในรูป $\text{Fe}(\text{OH})_2$ หรือ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ที่ตกตะกอนอยู่ในสารละลาย ส่วนไบคาร์บอเนตที่อยู่ในสารละลายยังมีผลให้การยึดตัวของรากและแรงดันภายในรากลดลง พลังงานที่จะใช้ขับเคลื่อนตัวละลายทางไซเลมจากรากไปยังส่วนเหนือดินจึงต่ำลงด้วย และธาตุเหล็กในรากยังรวมตัวกับกรดอินทรีย์เป็นสารคีเลตที่ถูกเก็บไว้ในแวคิวโอลของรากอีก ทำให้ส่วนเหนือดินมีธาตุเหล็กน้อย รายงานที่เปรียบเทียบการปลูกองุ่นในสารละลายที่มีและไม่มีไบคาร์บอเนต ได้ผลว่ารากองุ่นที่อยู่ในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนตมีธาตุเหล็กสูงกว่า (Nikolic และ Kastori, 2000) รายงานของศุภนิย์ (2548) พบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กในใบยูคาลิปัสที่ปลูกในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนตมีระดับต่ำกว่าใบที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีไบคาร์บอเนต

ตารางที่ 6 แสดงค่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กเทียบกับปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริตักเทส ในวันที่ 17 และวันที่ 42 ของส่วนรากและใบยูคาลิปตัส ผลที่ได้ทำให้ทราบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ไม่ทำให้ปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริตักเทส เพิ่มหรือลดลงตามไปด้วย เพราะปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริตักเทสจะขึ้นกับธาตุเหล็กในรูป Fe^{2+} แต่ความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่วิเคราะห์ได้เป็นค่าที่บอกถึงธาตุเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในส่วนของรากและใบ ซึ่งมีส่วนหนึ่งเท่านั้นที่อยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้ คือในรูป Fe^{2+} (Abadia, 1992)

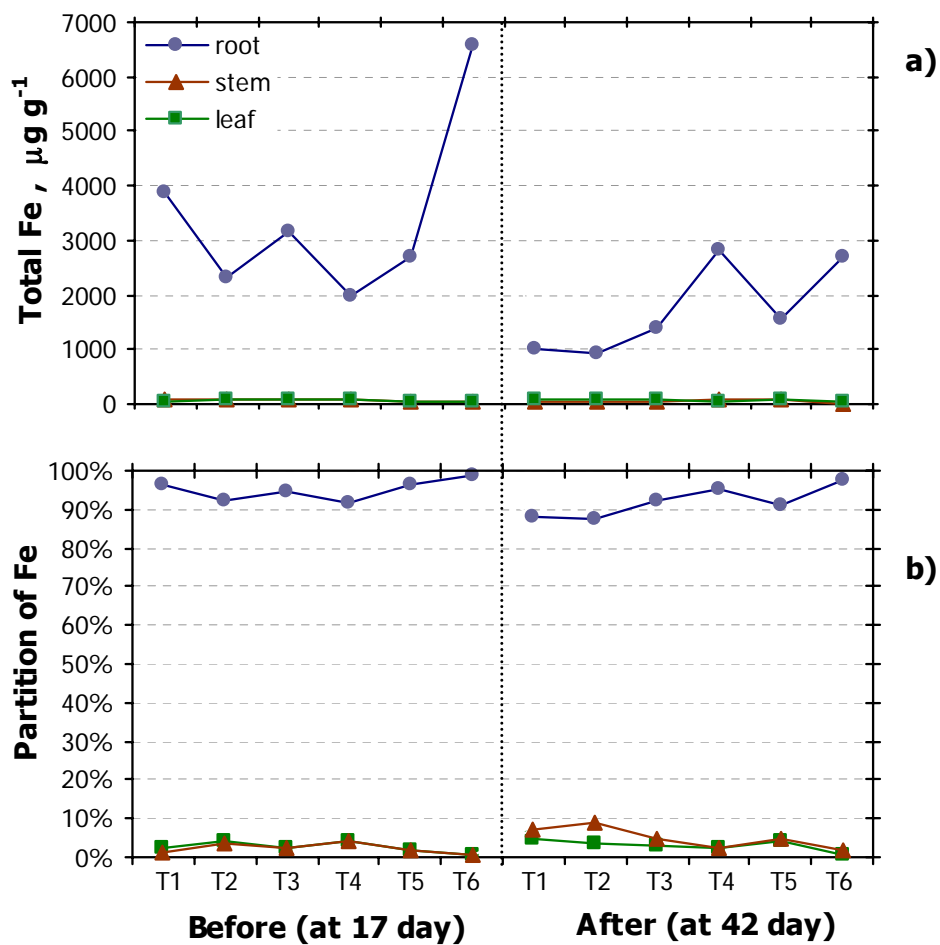
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในส่วนราก ลำต้น และใบของต้นยูคาลิปตัส เปรียบเทียบใน 2 ช่วงเวลาคือ ครั้งที่ 1 วันที่ 17 (ก่อน) และครั้งที่ 2 วันที่ 42 (หลังการปรับ pH ในสารละลายของตัวรับ T3 และ T4)

ตัวรับ	ความเข้มข้นของธาตุเหล็กของส่วนต่างๆ วันที่ 17 ($\mu\text{g g}^{-1}$)				ความเข้มข้นของธาตุเหล็กของส่วนต่างๆ วันที่ 42 ($\mu\text{g g}^{-1}$)			
	ราก	ลำต้น	ใบ	เฉลี่ยทั้งต้น	ราก	ลำต้น	ใบ	เฉลี่ยทั้งต้น
T1	3862 ^b	91 ^a	59 ^b	908	998 ^c	55 ^{ab}	80 ^{ab}	354 ^{bc}
T2	2318 ^c	105 ^a	83 ^a	549	933 ^c	40 ^{bc}	92 ^a	292 ^c
T3	3176 ^{bc}	82 ^a	88 ^a	930	1387 ^b	47 ^b	69 ^{abc}	358 ^{bc}
T4	1965 ^c	89 ^a	85 ^a	460	2824 ^a	74 ^a	62 ^{bc}	674 ^a
T5	2709 ^{bc}	49 ^b	46 ^{bc}	758	1568 ^b	72 ^a	77 ^{abc}	446 ^b
T6	6197 ^a	46 ^b	40 ^c	974	2702 ^a	21 ^c	51 ^c	696 ^a
P-value	**	**	**	ns	**	**	*	**
CV (%)	20.7	18.0	15.9	39.6	12.3	23.9	19.5	17.1

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 5 a) ความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งต้น ($\mu\text{g g}^{-1}$) แบ่งเป็นส่วนราก ลำต้น และใบ b) สัดส่วนธาตุเหล็กของส่วนราก ลำต้น และใบของต้นยูคาลิปตัส

ตารางที่ 6 ความเข้มข้นของธาตุเหล็กกับปริมาณเอนไซม์เฟอร์ริทีนในต้นยูคาลิปตัส

ก. ส่วนของราก

ตำรับ	วันที่ 17 ก่อนปรับ pH ในสารละลาย		วันที่ 42 หลังปรับ pH ในสารละลาย	
	ความเข้มข้นของ ธาตุเหล็ก ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ปริมาณเอนไซม์ เฟอร์ริทีน (mU g^{-1})	ความเข้มข้นของ ธาตุเหล็ก ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ปริมาณเอนไซม์ เฟอร์ริทีน (mU g^{-1})
T1	3862	763	998	936
T2	2318	771	933	648
T3	3176	864	1387	636
T4	1965	1037	2824	823
T5	2709	897	1568	910
T6	6197	616	2702	882

ข. ส่วนของใบ

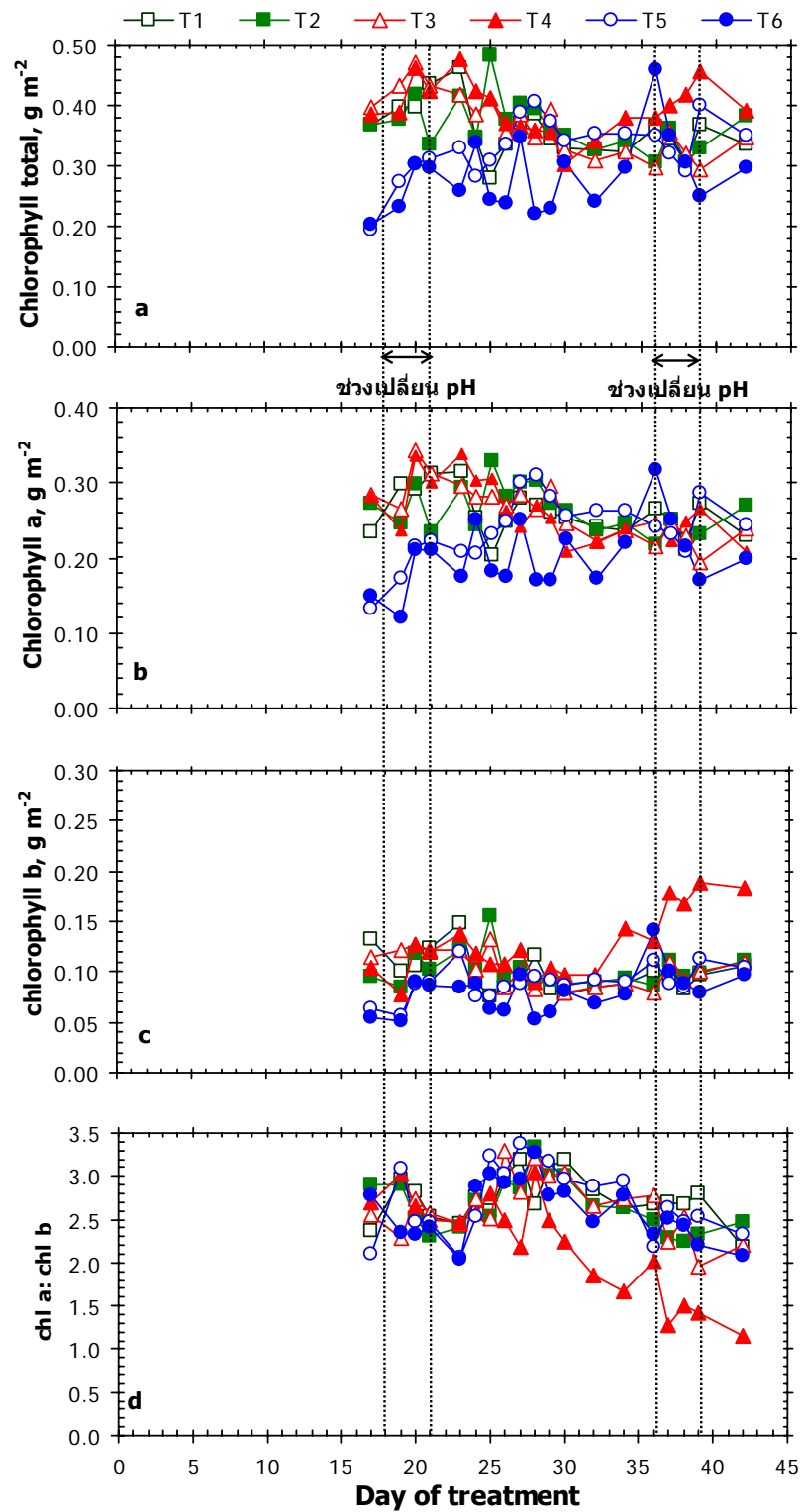
ตำรับ	วันที่ 17 ก่อนปรับ pH ในสารละลาย		วันที่ 42 หลังปรับ pH ในสารละลาย	
	ความเข้มข้นของ ธาตุเหล็ก ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ปริมาณเอนไซม์ เฟอร์ริทีน (mU g^{-1})	ความเข้มข้นของ ธาตุเหล็ก ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ปริมาณเอนไซม์ เฟอร์ริทีน (mU g^{-1})
T1	59	769	80	1052
T2	83	926	92	1347
T3	88	619	69	1542
T4	85	774	62	1668
T5	46	430	77	1148
T6	38	903	51	1043

5. ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ

ภาพที่ 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และคลอโรฟิลล์รวมในช่วงทดลอง 17-42 วัน พบว่าตำรับ T4 มีปริมาณคลอโรฟิลล์รวมสูงกว่าตำรับอื่น จากการมีคลอโรฟิลล์ บีที่สูงกว่า ขณะที่ตำรับ T6 คลอโรฟิลล์รวมต่ำกว่าทุกตำรับ เนื่องจากมีทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์เอ กับคลอโรฟิลล์บีที่ต่ำ ค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และคลอโรฟิลล์รวมในช่วงทดลอง 17-42 วัน แสดงค่าในตารางที่ 7 พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอของตำรับ T6 เท่านั้นที่มีปริมาณต่ำกว่าตำรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์บีของตำรับ T4 มีค่าสูงสุด ขณะที่ตำรับ T6 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ดังนั้นปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของตำรับ T4 จึงมีสูงกว่าตำรับอื่นๆ ส่วนตำรับ T6 คลอโรฟิลล์รวมมีปริมาณต่ำที่สุด แสดงว่าการเลี้ยงต้นกล้าในสารละลายที่เป็นด่างคงที่ (pH 8.5) ทำให้ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในใบต่ำ (ตารางที่ 5) ซึ่งธาตุเหล็กเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เมื่อมีธาตุเหล็กน้อย จึงทำให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง ส่วนการปรับ pH ของสารละลายเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3 มีผลทำให้ใบยูคาลิปตัสสังเคราะห์คลอโรฟิลล์บีเพิ่มมากขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างตำรับ T3 และ T4 เพื่อศึกษาผลของสารที่ใช้ปรับ pH ระหว่าง KOH กับ KHCO_3 พบว่าตำรับ T4 มีปริมาณคลอโรฟิลล์บีสูงกว่าตำรับ T3 จึงทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของตำรับ T4 มีมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ซึ่งพืชสังเคราะห์คลอโรฟิลล์บีเพื่อดูดแสงในช่วงคลื่น 435 และ 643 นาโนเมตร ที่คลอโรฟิลล์เอดูดซับไม่ได้ แล้วถ่ายเทพลังงานเป็นทอดๆ ไปยังคลอโรฟิลล์เอ และศูนย์กลางปฏิกิริยาต่อไป โดยคลอโรฟิลล์บีจะพบที่บริเวณ antenna complex ของระบบรับแสง PSII (Buchanan *et al.*, 2000)

สัดส่วนของคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี ในพืชชั้นสูงทั่วไปมีค่าประมาณ 3 คือ คลอโรฟิลล์บีจะมีในปริมาณ 1 ใน 3 ของคลอโรฟิลล์เอ (Anderson, 1986) ซึ่งพบว่าตำรับ T4 มีค่าเฉลี่ยตลอดการทดลองต่ำที่สุดอยู่ที่ 2.2 และแตกต่างจากตำรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่ง จึงสรุปได้ว่าการปรับ pH ของสารละลายเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3 ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บีเพิ่มขึ้น และสัดส่วนของคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีลดลง



ภาพที่ 6 ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบยูคาลิปตัสตลอดช่วงทดลอง เมื่อ a) ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม b) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ c) ปริมาณคลอโรฟิลล์บี และ d) เป็นสัดส่วนของคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี คลอโรฟิลล์รวม และสัดส่วน
คลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี ของใบยูคาลิปตัสในวันที่ 17-42 ของการทดลอง

ตำรับ	Chl a, g m ⁻²	Chl b, g m ⁻²	Chl t, g m ⁻²	Chl a : Chl b
T1	0.259 ^a	0.099 ^b	0.359 ^b	2.7 ^a
T2	0.263 ^a	0.102 ^b	0.367 ^b	2.6 ^a
T3	0.264 ^a	0.103 ^b	0.369 ^b	2.6 ^a
T4	0.262 ^a	0.127 ^a	0.394 ^a	2.2 ^b
T5	0.238 ^a	0.090 ^c	0.330 ^c	2.7 ^a
T6	0.202 ^b	0.080 ^d	0.285 ^d	2.6 ^a
p-value	**	**	**	**
CV (%)	4.13	4.75	3.87	3.92

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

6. ประสิทธิภาพการให้แสงของไบยูลิปต์

6.1 ประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุด (ϕ_{dark})

ประสิทธิภาพการให้แสงของระบบ PSII ที่วัดในสภาพมืด (ϕ_{dark}) ในช่วง 20 – 23 น. ทุก 1-2 วัน โดยวัดใบชุดที่ 1 (ใบตัด) ที่มีอายุประมาณ 17-19 วัน และใบชุดที่ 2 (ใบตาม) ที่เริ่มวัดตั้งแต่ใบมีอายุได้ 17 วัน ค่าสำหรับใบตัดแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 7a พบว่าค่า ϕ_{dark} ในวันที่ 17, 42 และค่าเฉลี่ยตลอดช่วง 17-42 วัน ของทุกตำรับ มีค่าอยู่ในช่วง 0.80 – 0.83 ซึ่งเป็นค่าของไบยูลิปต์ปกติ ตามรายงานการศึกษาที่พบว่าไบยูลิปต์มีค่าประสิทธิภาพการให้แสงอยู่ในช่วง 0.80 – 0.84 (สุนทรและคัทลียา, 2547) แต่ค่าเฉลี่ยตลอดช่วงทดลองของตำรับ T4 (pH จาก 5.7 เป็น 8.5 ด้วย KHCO_3) มีค่าต่ำที่สุดและแม้จะแตกต่างจากตำรับอื่นเพียงเล็กน้อย แต่เป็นความแตกต่างที่มีนัยสำคัญยิ่ง

สำหรับกรณีตัวอย่างของใบตาม ค่า ϕ_{dark} แสดงผลเช่นเดียวกับใบตัด คือ ค่าเฉลี่ยในช่วง 17-42 วัน ของทุกตำรับไม่ต่ำกว่า 0.80 และตำรับ T4 ยังคงแสดงค่าต่ำที่สุด และแตกต่างจากตำรับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 9) ภาพที่ 7b ค่า ϕ_{dark} ของใบตำรับ T4 ลดลงชัดเจนต่ำกว่า 0.8 หลังจากอยู่ในสภาพต่างนาน 15 วัน แล้วถูกปรับ pH กลับเป็นกรดในวันที่ 36 วัน ของการทดลอง

สรุปได้ว่าต้นกล้วยคาลิปต์ที่ปลูกในสารละลายกรด (pH 5.7) สารละลายต่าง (pH 8.5) หรือสารละลายที่ปรับเป็นต่างด้วย KOH ค่า ϕ_{dark} ของใบมีค่าในช่วงปกติ แต่ต้นกล้วยที่เลี้ยงในสภาพกรด หลังจากนั้นปรับสารละลายเป็นต่างนาน 15 วัน ด้วย KHCO_3 แล้วปรับสารละลายกลับเป็นกรดใหม่ จะมีผลกระทบให้ ϕ_{dark} ของใบมีค่าลดลงต่ำกว่าระดับปกติอย่างชัดเจน คือ ต่ำกว่า 0.80

ตารางที่ 8 ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน (เริ่มต้น หมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4)

ตำรับ	ค่า ϕ dark เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า ϕ dark สุดท้าย (วันที่ 42)	ϕ dark เฉลี่ยตลอดช่วง (วันที่ 17- 42)
T1	0.83 ^a	0.82	0.82 ^a
T2	0.83 ^a	0.81	0.82 ^a
T3	0.83 ^a	0.81	0.82 ^a
T4	0.83 ^a	0.82	0.80 ^c
T5	0.81 ^b	0.82	0.82 ^a
T6	0.81 ^b	0.81	0.81 ^b
P-value	**	ns	**
CV (%)	0.63	1.13	0.41

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

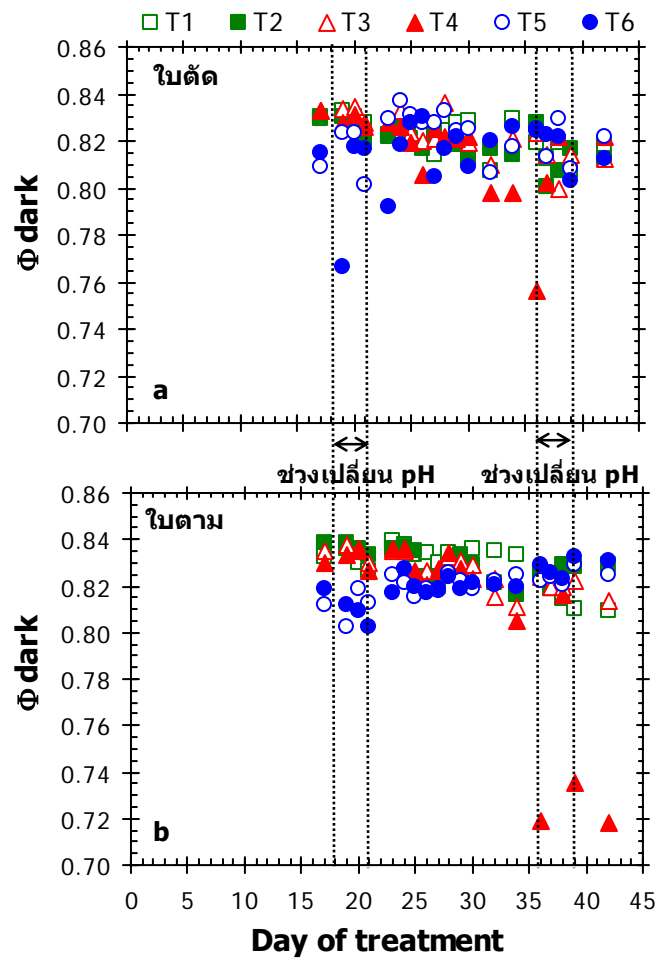
** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 9 ประสิทธิภาพการไว้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน (เริ่มต้น หมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4)

ตำรับ	ค่า ϕ dark เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า ϕ dark สุดท้าย (วันที่ 42)	ϕ dark เฉลี่ยตลอดช่วง (วันที่ 17- 42)
T1	0.83 ^a	0.81 ^a	0.83 ^a
T2	0.84 ^a	0.83 ^a	0.82 ^a
T3	0.84 ^a	0.81 ^a	0.83 ^a
T4	0.83 ^a	0.72 ^b	0.80 ^b
T5	0.82 ^{bc}	0.82 ^a	0.82 ^a
T6	0.81 ^c	0.83 ^a	0.82 ^a
P-value	**	*	*
CV (%)	0.76	3.60	0.93

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT
*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) a) ใบตัด และ b) ใบตาม ในช่วงทดลอง 17-42 วัน

6.2 ประสิทธิภาพการให้แสงขณะใบได้รับแสง (ϕ PSII)

ประสิทธิภาพการให้แสง (ϕ PSII) วัดขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงคงที่เท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ในช่วงเวลา 8.00 – 13.00 น. ทุก 1-2 วัน ในใบตัดและใบตาม

ค่า ϕ PSII ของตัวอย่างใบตัดอธิบายด้วยตารางที่ 10 พบว่าตำรับ T4 (pH เริ่มต้น 5.7 และปรับเป็น 8.5 ด้วย KHCO_3) มีค่า ϕ PSII ในวันที่ 17 สูง แต่แสดงค่าต่ำลงในวันที่ 42 และค่าเฉลี่ยตลอดช่วงทดลองมีค่าต่ำที่สุด แตกต่างจากทุกตำรับอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ภาพที่ 8 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ ϕ PSII และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ตลอดช่วงทดลอง สามารถนำมาอธิบายได้ดังนี้ ภาพที่ 8a ทุกตำรับมีค่า ϕ PSII สูงกว่าระดับ 0.30 ตลอดการทดลอง ยกเว้นตำรับ T4 ที่ค่า ϕ PSII แสดงค่าลดลงกว่า 0.30 อย่างต่อเนื่องหลังจากวันที่ 8 ของการปรับ pH ในสารละลายเป็นด่างแล้ว ส่งผลให้อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนมีค่าลดลงด้วย (ภาพที่ 8b) เพราะค่า ETR เป็นค่าที่คำนวณจากค่า ϕ PSII โดยเป็นค่าที่แสดงถึงแสงที่ใบพืชนำไปใช้ได้ และควบโดยตรงกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของใบพืช ดังนั้นค่า ETR ที่ลดลง จึงตรงกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ที่มีค่าลดลงด้วย (ภาพที่ 8c)

ผลที่ได้ของตัวอย่างใบที่ติดตามใบเดิมต่อเนื่อง ยืนยันการเปลี่ยนแปลงในแนวเดียวกับตัวอย่างใบตัด คือตำรับ T4 มีค่า ϕ PSII สุดท้าย (วันที่ 42) ต่ำกว่าวันเริ่มต้น (วันที่ 17) และมีค่าเฉลี่ยตลอดช่วง 17-42 วัน ต่ำที่สุด (ตารางที่ 11) โดยตำรับ T4 มีค่า ϕ PSII ลดลงอย่างชัดเจน จนต่ำกว่า 0.30 หลังจากปรับ pH ให้เป็นด่างแล้ว 8 วัน ซึ่งขณะนั้นเป็นวันที่ 29 ของการทดลอง (ภาพที่ 9a) เมื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ETR กับ $A_{1,000}$ จะได้รูปแบบเกือบเป็นเส้นตรง จึงแสดงถึงกระบวนการที่ควบกันค่อนข้างแน่นระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิกับระบบให้แสงของใบพืช (ภาพที่ 9c) ทั้งใบตัดกับใบตามมีการทำงานของกระบวนการสังเคราะห์แสงต่ำกว่าตำรับอื่นหลังจากปรับ pH แล้วเห็นได้อย่างชัดเจน

ประสิทธิภาพการให้แสงของระบบรับแสง PSII แสดงถึงสัดส่วนของพลังงานแสงที่ใบพืชดูดซับแล้วนำไปใช้ในกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลการศึกษาค่า ϕ dark และค่า ϕ PSII ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการให้แสงของใบยูคาลิปตัสที่เลี้ยงในสารละลายกรด หรือในสารละลายด่างที่ปรับ pH ด้วย KOH (ทุกตำรับยกเว้น T4) ไม่แตกต่างกัน คือมีค่า ϕ dark อยู่ในช่วง

ของใบปกติ 0.80-0.83 ในขณะที่ต้นที่อยู่ในสารละลายต่างที่ปรับ pH ด้วย KHCO_3 (T4) แล้วปรับกลับเป็นกรดอีกครั้งค่า ϕ_{dark} ลดลงจนต่ำกว่าค่าของใบปกติ เมื่อให้แสงคงที่ ϕ_{PSII} มีค่าลดลงจากระดับก่อนเปลี่ยน pH อย่างมาก รายงานของ Pestana *et al.* (2001) ที่ปลูกส้มในสารละลายที่เติมไบคาร์บอเนตและธาตุเหล็ก พบว่าการขาดธาตุเหล็กเพียงอย่างเดียวไม่มีผลทำให้ ϕ_{dark} ของใบส้มลดลง แต่ถ้าต้นส้มอยู่ในสภาพที่ขาดธาตุเหล็กและมีไบคาร์บอเนตร่วมอยู่ด้วย ค่า ϕ_{dark} จะลดลงและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนต้น sugar beet ที่เลี้ยงในสารละลายที่ขาดธาตุเหล็กพบว่า ϕ_{dark} ของใบมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะเกิด photoinhibition จึงทำให้ประสิทธิภาพของ PSII ลดลง (Abadia, 1992) แต่ในการศึกษานี้วัดค่าต่างๆเพียงช่วงเดียวในรอบวัน และภายใต้แสงคงที่ จึงไม่อาจยืนยันได้ว่าเกิด photoinhibition หรือไม่

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ_{PSII}) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน เมื่อให้แสงคงที่เท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3-T4)

ตำรับ	ค่า ϕ_{PSII} เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า ϕ_{PSII} สุดท้าย (วันที่ 42)	ϕ_{PSII} เฉลี่ยตลอดช่วง (วันที่ 17-42)
T1	0.38 ^a	0.36	0.37 ^{ab}
T2	0.41 ^a	0.34	0.37 ^{ab}
T3	0.43 ^a	0.32	0.36 ^b
T4	0.42 ^a	0.34	0.32 ^c
T5	0.30 ^b	0.35	0.38 ^a
T6	0.33 ^b	0.32	0.37 ^{ab}
P-value	**	ns	**
CV (%)	6.42	10.07	2.30

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

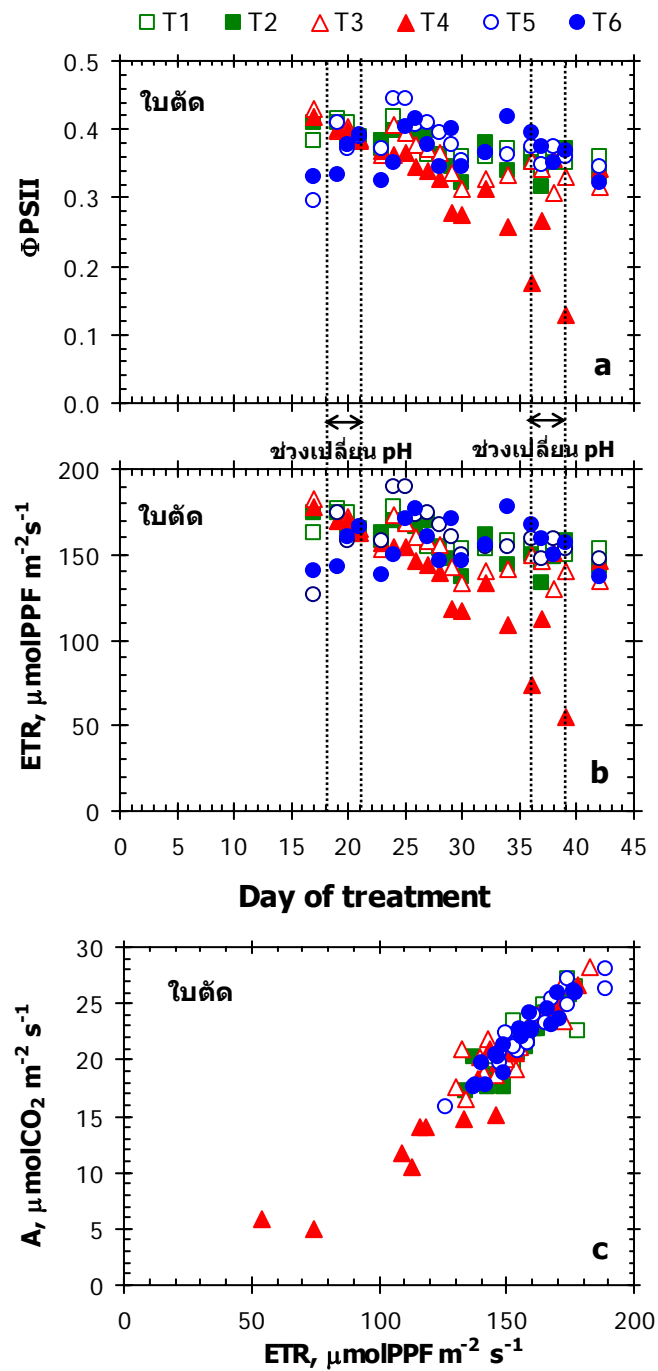
ตารางที่ 11 ประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ PSII) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน เมื่อให้แสงคงที่ เท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (เริ่มต้นหมายถึงก่อนปรับ pH ของตำรับ T3-T4)

ตำรับ	ค่า ϕ PSII เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า ϕ PSII สุดท้าย (วันที่ 42)	ϕ PSII เฉลี่ยตลอดช่วง (วันที่ 17- 42)
T1	0.44 ^a	0.29	0.36
T2	0.42 ^a	0.32	0.38
T3	0.42 ^a	0.24	0.33
T4	0.40 ^{ab}	0.17	0.30
T5	0.32 ^c	0.30	0.31
T6	0.33 ^{bc}	0.28	0.32
P-value	*	ns	ns
CV (%)	10.79	20.75	9.07

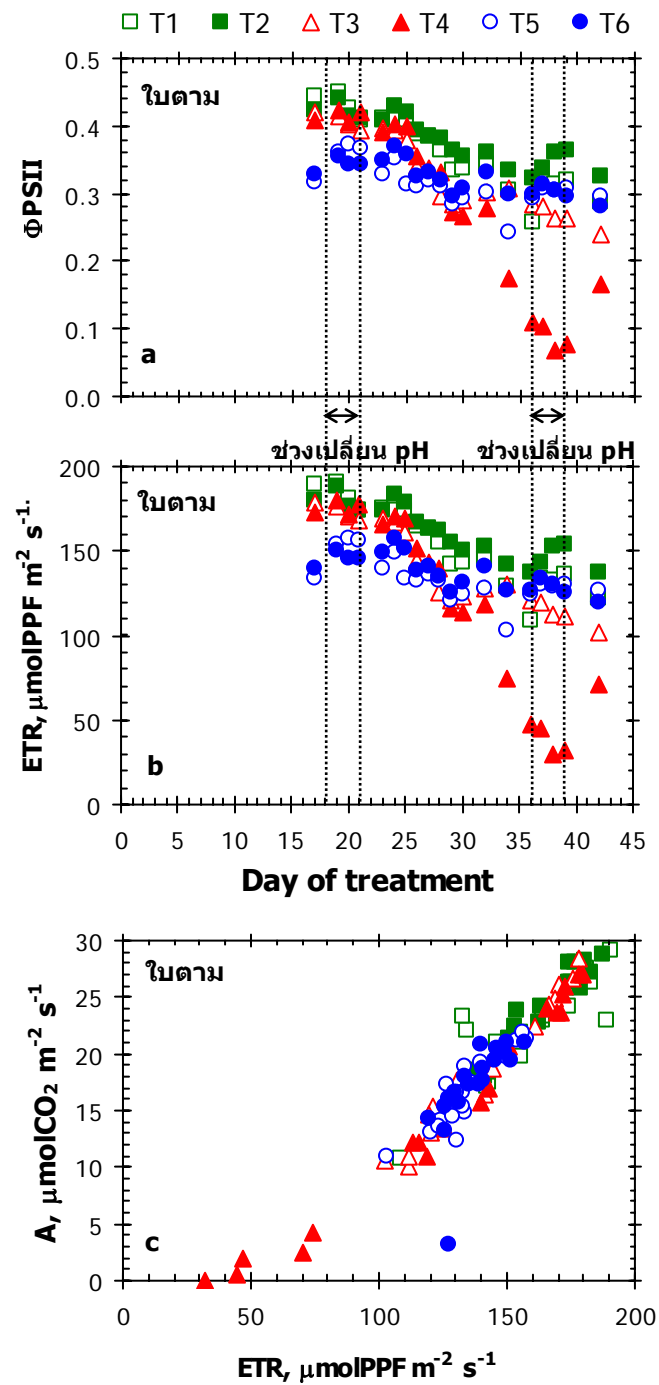
ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 8 ตัวอย่างใบตัด a) ประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบใบได้รับความเข้มแสงคงที่ที่ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ b) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ตลอดช่วงทดลอง และ c) ความสัมพันธ์ของ ETR กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)



ภาพที่ 9 ตัวอย่างใบตาม a) ประสิทธิภาพการใช้น้ำในใบได้รับความเข้มแสงคงที่ที่ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ b) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ตลอดช่วงทดลอง และ c) ความสัมพันธ์ของ ETR กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

7. อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

7.1 ใบตัด

ค่า $A_{1,000}$ วัดในสภาพควบคุมที่ให้ใบยูคาลิปตัสได้รับความเข้มแสงคงที่ที่ 1,000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และสภาพอากาศที่ให้ปากใบเปิดได้เต็มที่ ตารางที่ 12 แสดงผลว่าค่า $A_{1,000}$ ของทุกตำรับในวันที่ 17 (ก่อนปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4) มีค่าสูง โดยตำรับ T3 มีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ $28.3 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และตำรับ T5 มีค่าต่ำสุดเท่ากับ $15.8 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เมื่อพิจารณาว่า $A_{1,000}$ ในวันที่ 42 (วันสุดท้ายของการทดลอง) คำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น พบว่าตำรับ T5 และ T6 มีค่าสูงเกินร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลมาจากการมีค่าเริ่มต้นในวันที่ 17 ต่ำ สำหรับตำรับ T4 พบว่าค่า $A_{1,000}$ ลดลงจากวันเริ่มต้นเหลืออยู่เท่ากับ 57 เปอร์เซ็นต์ และค่าเฉลี่ย $A_{1,000}$ ตลอดช่วงวันที่ 17-42 มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ 66 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น ผลสรุปแสดงว่าใบของต้นที่ปลูกในสารละลายกรดมีอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดใกล้เคียงค่าเริ่มต้น ในขณะที่ตำรับ T4 แสดงการถูกกระทบมากที่สุด และต้นที่ปลูกในสารละลายต่าง พบว่าต้นกล้าถูกกระทบมากในช่วงแรกที่เติบโต ต่อมาสามารถปรับตัวและมีอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงกว่าช่วงแรกได้

ภาพที่ 10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตลอดช่วง 17-42 วัน พบว่าค่าน้ำไหลปากใบ (gs) มีค่าแกว่งขึ้นลงอยู่ในช่วงกว้าง แต่ตำรับ T4 แสดงแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนจนมีค่าเป็นศูนย์หลังจากปรับ pH เป็นต่างแล้วนาน 15 วัน (ภาพที่ 10a) อัตราคายน้ำ (E) มีค่าอยู่ในช่วง 5 - 9 $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ตำรับ T4 ให้ผลในลักษณะเดียวกับค่า gs คือมีแนวโน้มลดลงและต่ำกว่า 5 $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ภาพที่ 10b) กล่าวคือเมื่อปากใบปิดแคบลง จึงส่งผลให้ใบคายน้ำได้น้อยลง ทำให้อุณหภูมิใบ (T_{leaf}) ของตำรับ T4 มีค่าสูงกว่าใบตำรับอื่นๆ ได้ถึง 2 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 10c) ค่าแรงดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{leaf-air}}$) ของทุกตำรับมีค่าอยู่ในช่วง 1.0 - 1.4 kPa ซึ่งควรจะประมาณคงที่ภายใต้กล่องบรรจุใบที่ตั้งไว้ แต่พบว่าใบของตำรับ T4 มีค่าสูงกว่า เพราะอุณหภูมิใบมีค่าสูงขึ้น (ภาพที่ 10d) ค่า $A_{1,000}$ ของตำรับ T4 จึงแสดงแนวโน้มลดลงและต่ำกว่าตำรับอื่นๆ อย่างชัดเจน (ภาพที่ 10e) ค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) มีค่าประมาณ $3.2 \mu\text{molCO}_2 \text{ mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ แต่ตำรับ T4 กลับมีค่าส่วนใหญ่สูงกว่า เพราะปากใบที่ปิดแคบทำให้อัตราคายน้ำลดลง (แม้ว่าแรงดึงคายน้ำจะสูงขึ้น) ในสัดส่วนที่มากกว่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ กล่าวคือการปรับ pH ด้วย KHCO_3 ส่งผลกระทบต่อการปิดแคบของปากใบรุนแรงมากกว่าที่ส่งผลต่อกระบวนการทางชีวเคมีในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์

7.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของไบโตัด

ภาพที่ 11a บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายคั้นจากไบกับค่านำไหลปากไบ พบว่าเมื่อค่า pH ของสารละลายคั้นจากไบสูงขึ้น จะสัมพันธ์กับค่านำไหลปากไบที่ลดลงซึ่งเห็นได้ชัดในตำรับ T4 เมื่อปากไบที่เป็นเส้นทางในการแลกเปลี่ยนแก๊สแคบลง จึงทำให้อัตราคายน้ำลดลงด้วย โดยอัตราคายน้ำมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่านำไหลปากไบ (ภาพที่ 11b) และเมื่อไบคายน้ำได้น้อยลง อุณหภูมิไบจึงเพิ่มสูงขึ้น จึงมีผลให้ค่าแรงดึงคายน้ำของตำรับ T4 สูงแตกต่างจากทุกตำรับ (ภาพที่ 11c-d)

7.1.2 พารามิเตอร์ของไบโตัดที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

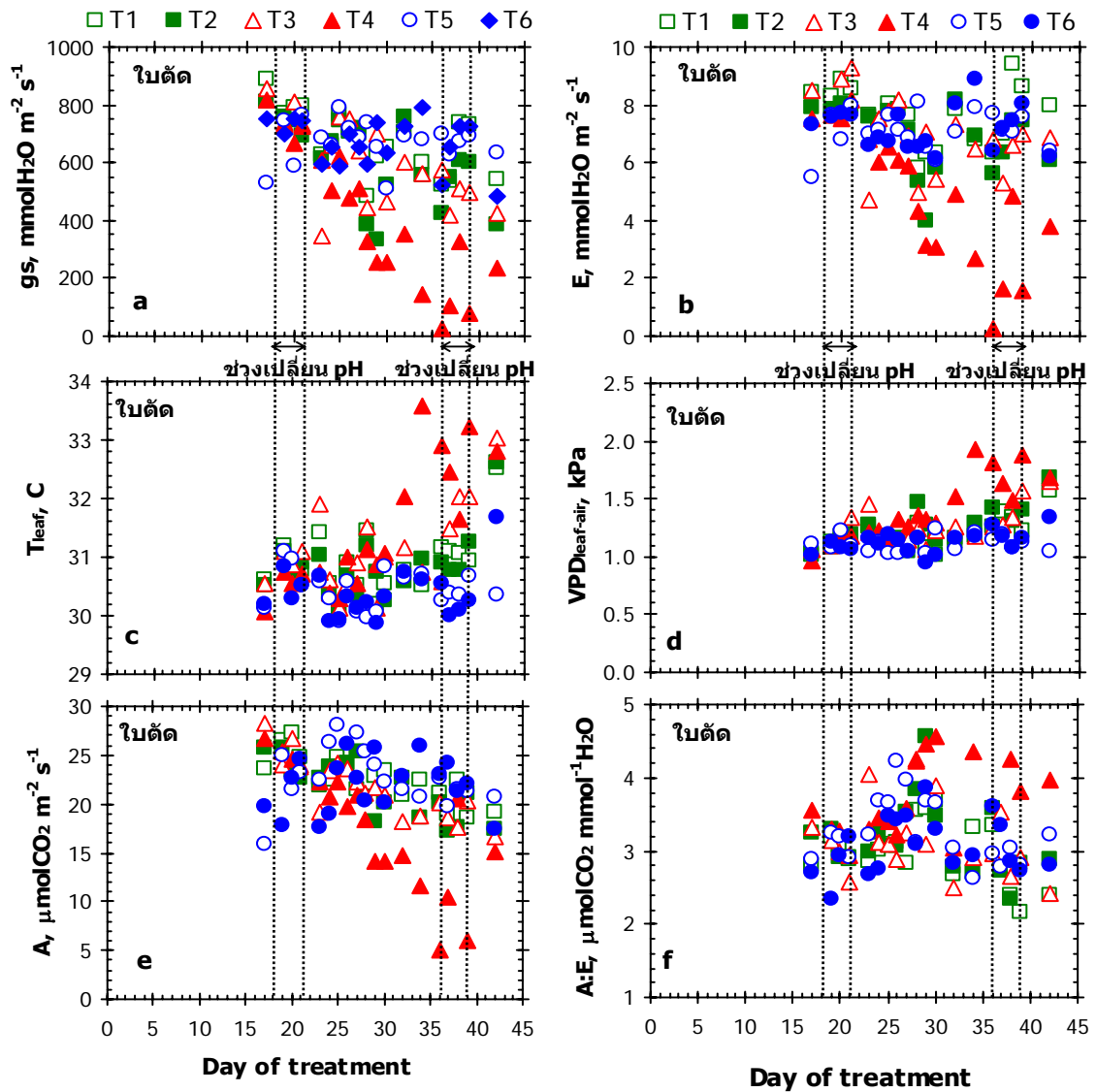
ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่า $A_{1,000}$ พบว่าค่า $A_{1,000}$ แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่านำไหลปากไบและอัตราคายน้ำ และตำรับ T4 แสดงการเปลี่ยนแปลงชัดเจน เมื่อค่านำไหลปากไบและอัตราคายน้ำลดลงจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ $A_{1,000}$ ลดลง (ภาพที่ 12a-b) และอุณหภูมิไบที่เพิ่มสูงขึ้นกับค่าแรงดึงคายน้ำที่สูงขึ้นก็เกิดควบคู่กับ $A_{1,000}$ ที่ลดลงด้วย (ภาพที่ 12c-d)

ตารางที่ 12 อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตัดยูคาลิปตัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น)

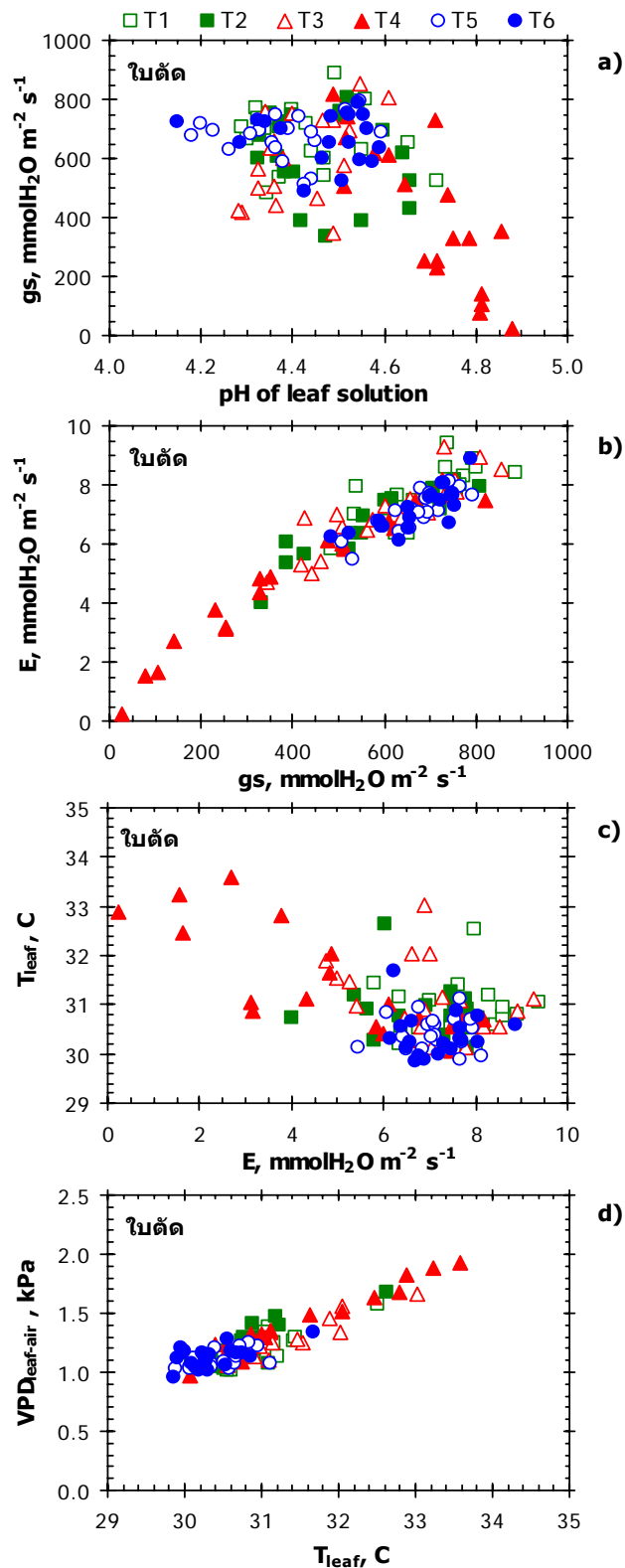
ตำรับ	ค่า $A_{1,000}$ เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า $A_{1,000}$ วันที่ 42 (% ของวันเริ่มต้น)	เฉลี่ยตลอดช่วงวันที่ 17- 42 (% ของวันเริ่มต้น)
T1	23.7 ^b	82 ^b	95 ^{bc}
T2	25.7 ^{ab}	69 ^b	85 ^{cd}
T3	28.3 ^a	59 ^b	77 ^d
T4	26.6 ^{ab}	57 ^b	66 ^d
T5	15.8 ^d	132 ^a	146 ^a
T6	19.8 ^c	90 ^b	112 ^b
P-value	**	**	**
CV (%)	8.7	23.5	10.3

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

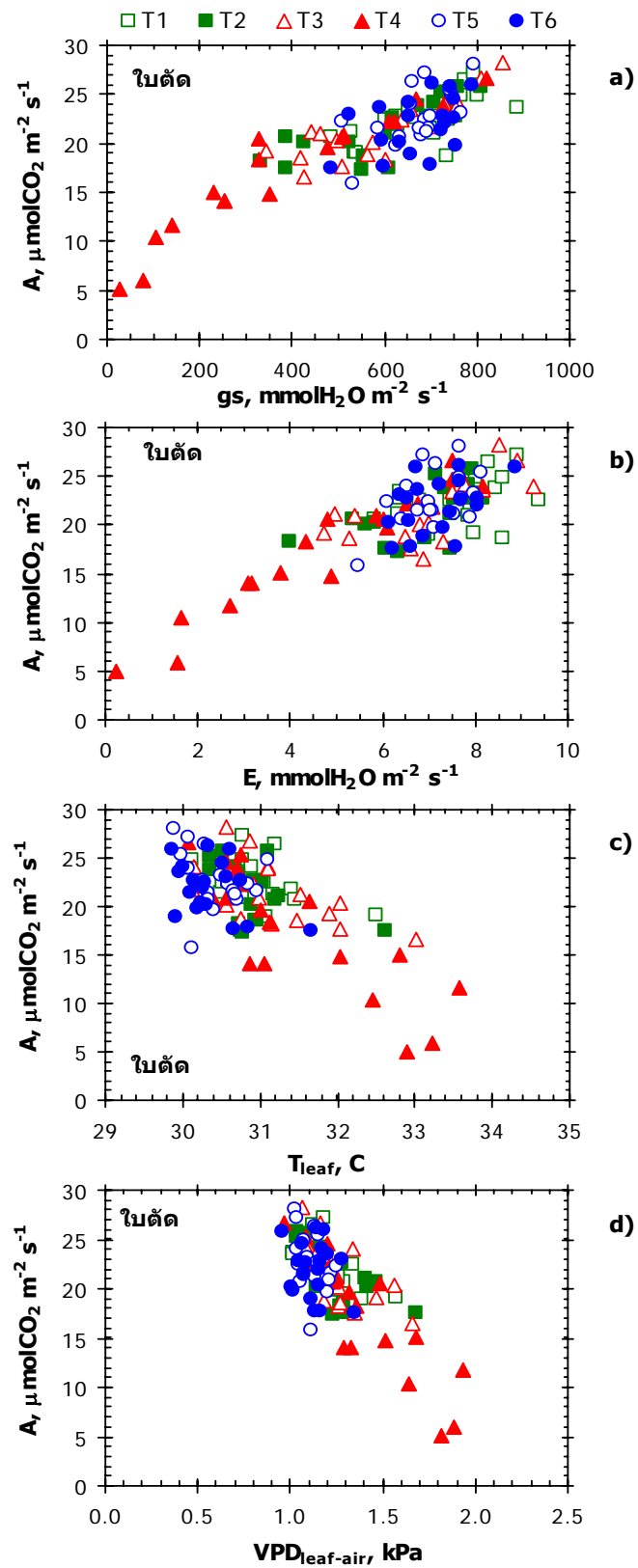
** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 10 พารามิเตอร์ของใบตัด เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ (g_s) b) อัตราคายน้ำ (E) c) อุณหภูมิใบ (T_{leaf}) d) แรงดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{leaf-air}}$) e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ ($A:E$) ในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน



ภาพที่ 11 ตัวอย่างใบตัด a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบกับค่านำไหลปากใบ b) ค่านำไหลปากใบกับอัตราการคายน้ำ c) อัตราการคายน้ำกับอุณหภูมิใบ และ d) อุณหภูมิใบกับแรงดึงคายน้ำ ในช่วง 17 – 42 วัน



ภาพที่ 12 พารามิเตอร์ของใบตัดที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำช่วงทดลอง 17-42 วัน

7.2 ไบโตาม

การวัดค่าของไบโตามตลอดช่วงการทดลอง ทำให้เห็นแนวการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่าค่าที่ได้จากไบที่เปลี่ยนไปทุกครั้งที่วัด ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส และค่าน้ำไหลปากไบของไบตามเป็นในแนวเดียวกับของไบตัด โดยมีระดับการลดลงรุนแรงกว่า ดังตารางที่ 13 ซึ่งยืนยันว่าตำรับ T5 มีค่า $A_{1,000}$ เริ่มต้นต่ำที่สุดเท่ากับ $18.8 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เมื่อถึงวันที่ 42 พบว่าไบของทุกตำรับมีค่าลดลงแสดงถึงสภาพไบที่มีอายุมากขึ้น และตำรับ T4 มีค่าลดลงจนเหลือเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น

ภาพที่ 13 แสดงแนวการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ของไบตาม ค่าน้ำไหลปากไบ และอัตราคายน้ำ มีค่าลดลงไม่เฉพาะตำรับ T4 เท่านั้น โดยไบของตำรับ T4 ยังคงมีค่าต่ำที่สุดจนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (ภาพที่ 13a-b) อุณหภูมิไบสูงกว่าสภาพของไบตัด และไบของตำรับ T4 มีค่าสูงกว่าตำรับอื่นๆ 2-3 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 13c) ส่วนค่าแรงดึงคายน้ำ แสดงผลในแนวเดียวกัน แต่มีค่าสูงกว่า โดยเฉพาะตำรับ T4 (ภาพที่ 13d) ที่ค่า $A_{1,000}$ ของไบทุกตำรับแสดงแนวลดลงตามอายุไบชัดเจนและตำรับ T4 มีค่าลดลงมากกว่าไบของตำรับอื่นๆ จนมีค่าเกือบเป็นศูนย์ (ภาพที่ 13e) ที่น่าสนใจคือค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) พบว่าไบของตำรับ T1-T2 มีค่าสูงประมาณ $3.0-5.0 \mu\text{molCO}_2 \text{ mmol}^{-1}\text{H}_2\text{O}$ แต่ตำรับ T5 และ T6 มีค่าต่ำกว่า แสดงว่าไบของต้นกล้าที่เจริญเติบโตในสารละลายต่างๆจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ภายในคลอโรพลาสต์เกิดในอัตราต่ำกว่าไบของต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่เป็นกรด ส่วนไบตำรับ T3 และ T4 ผลกระทบจากการเปลี่ยน pH ทำให้ปากไบปิดแคบลง โดยที่ A:E มีค่าสูงกว่าตัวอย่างอื่นในช่วงที่รักษา pH ให้คงที่ ซึ่งแสดงว่าอัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกระทบน้อยกว่าค่าน้ำไหลปากไบ คือยืนยันผลที่ได้ข้างต้นของไบตัด แต่เมื่อปรับ pH จากต่างให้กลับเป็นกรดใหม่ พบว่าไบไม่สามารถปรับตัวตามได้ ค่า A:E ตกลงอย่างชัดเจนในวันที่ 38 ซึ่งหมายถึงไบที่มีอายุ 38 วัน เป็นต้นไป กระบวนการสังเคราะห์แสงถูกกระทบจนเสียหาย นอกเหนือจากปากไบปิดแคบแล้ว (ภาพที่ 13f) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ชี้ว่าเป็นระบบรับแสง (ϕdark ในภาพที่ 7a-b และ ϕPSII ในภาพที่ 8a และ9a) ที่เสียหาย

7.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของใบตาม

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำไหลปากใบกับอัตราคายน้ำ ดังภาพที่ 14a แสดงผลเช่นเดียวกับของใบตัด เพียงแต่ว่าตำรับ T1-T2 และ ตำรับ T5 -T6 มีค่าน้ำไหลปากใบผันแปรในช่วงกว้างกว่าของใบตัด และใบของตำรับ T4 ยังคงมีค่าน้ำไหลปากใบต่ำที่สุด ขณะที่ปากใบปิดแคบ และอัตราคายน้ำลดลงนี้ ทำให้อุณหภูมิลำต้นเพิ่มขึ้น จึงมีผลให้ค่าแรงดึงคายน้ำเพิ่มขึ้นด้วย (ภาพที่ 14b-c)

7.2.2 พารามิเตอร์ของใบตามที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

ภาพที่ 15 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด พบว่าค่าน้ำไหลปากใบ และอัตราคายน้ำที่มีค่าลดลงของใบตาม แสดงแนวเดียวกับผลของใบตัด โดยมีแนวการเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงกว่า และตำรับ T4 แสดงผลชัดเจนกว่าตำรับอื่นๆ (ภาพที่ 15a-b) สำหรับอุณหภูมิลำต้นและค่าแรงดึงคายน้ำพบว่าเพิ่มสูงกว่าสภาพของใบตัด ซึ่งเกิดควบคู่ไปกับค่า $A_{1,000}$ ที่ลดลงเช่นเดียวกัน (ภาพที่ 15c-d)

สรุปได้ว่าค่า $A_{1,000}$ ที่วัดในสภาพควบคุมที่ให้แรงขับเคลื่อน คือ ความแตกต่างของ CO_2 และความเข้มแสงคงที่ ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิถูกควบคุมโดยค่าน้ำไหลปากใบ ซึ่งเป็นช่องทางกรไพล์ของคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้พบว่าต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายต่าง (pH 8.5) และปรับ pH ด้วย $KHCO_3$ จะถูกระบบทำให้ค่าน้ำไหลปากใบลดลง ทำให้ใบคายน้ำลดลง อุณหภูมิลำต้นสูงขึ้น โดยที่ระบบสังเคราะห์แสงในคลอโรพลาสต์ยังไม่ถูกระบบให้เสียหายโดยตรง แต่หลังจากปรับ pH ให้เป็นต่างได้ 15 วัน แล้วปรับ pH อีกครั้งให้กลับเป็นกรด จะเป็นช่วงที่สร้างความเสียหายให้กับระบบสังเคราะห์แสงในส่วนของระบบรับแสง (PSII) โดยตรง นอกจากนี้ยังพบว่าใบที่เติบโตในสภาพ pH ต่าง (T5-T6) จะมีอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดต่ำกว่าใบที่เติบโตในสภาพกรด (T1-T2)

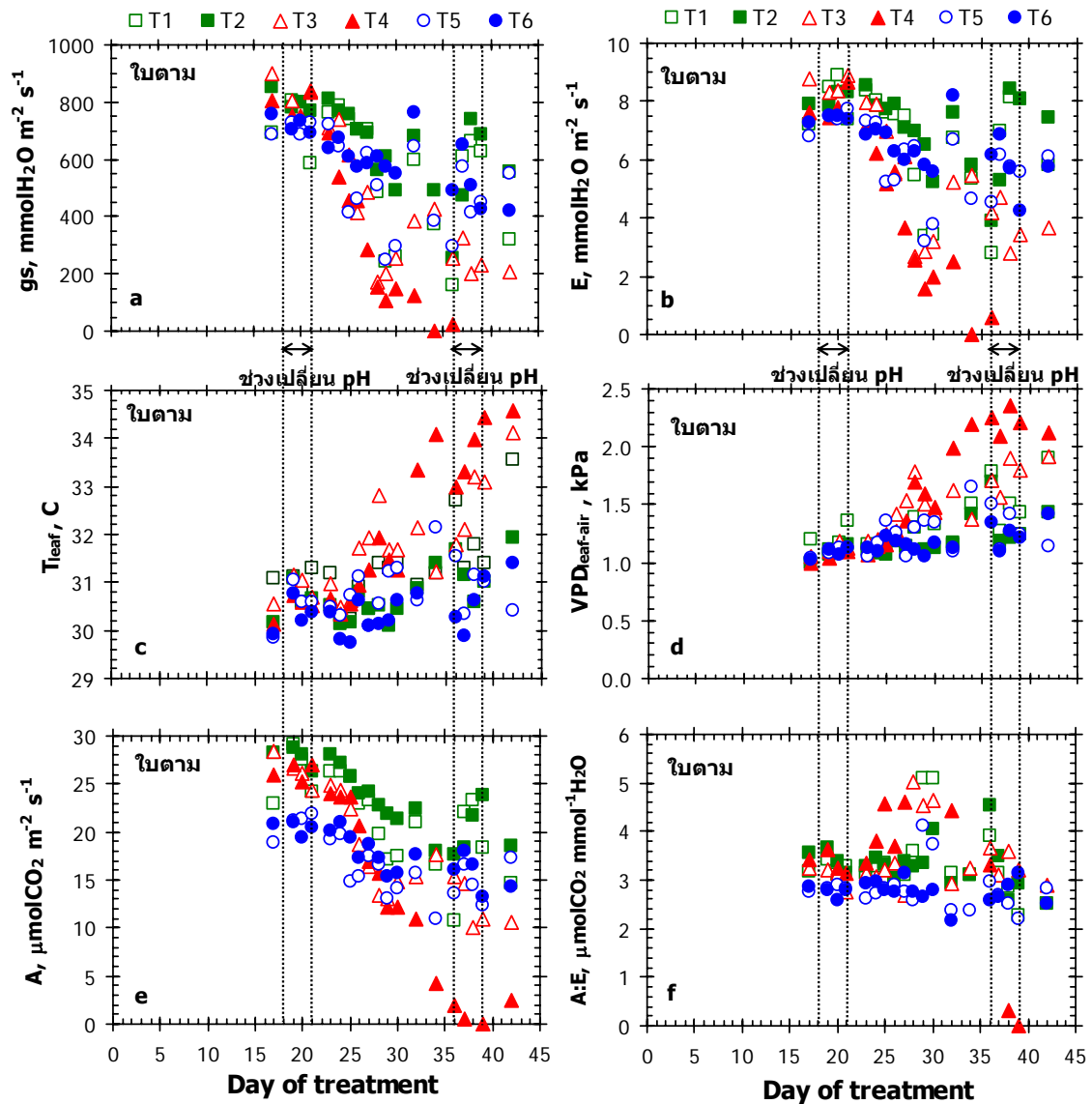
ตารางที่ 13 อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตามยุคาลิปดัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น)

ตำรับ	ค่า $A_{1,000}$ เริ่มต้น (วันที่ 17)	ค่า $A_{1,000}$ วันที่ 42 (% ของวันเริ่มต้น)	เฉลี่ยตลอดช่วงวันที่ 17- 42 (% ของวันเริ่มต้น)
T1	23.0	61 ^{ab}	113
T2	28.2	66 ^{ab}	88
T3	28.4	37 ^{bc}	64
T4	26.0	10 ^c	60
T5	18.8	89 ^a	88
T6	20.8	75 ^{ab}	85
P-value	ns	*	ns
CV (%)	23.9	36.8	32.8

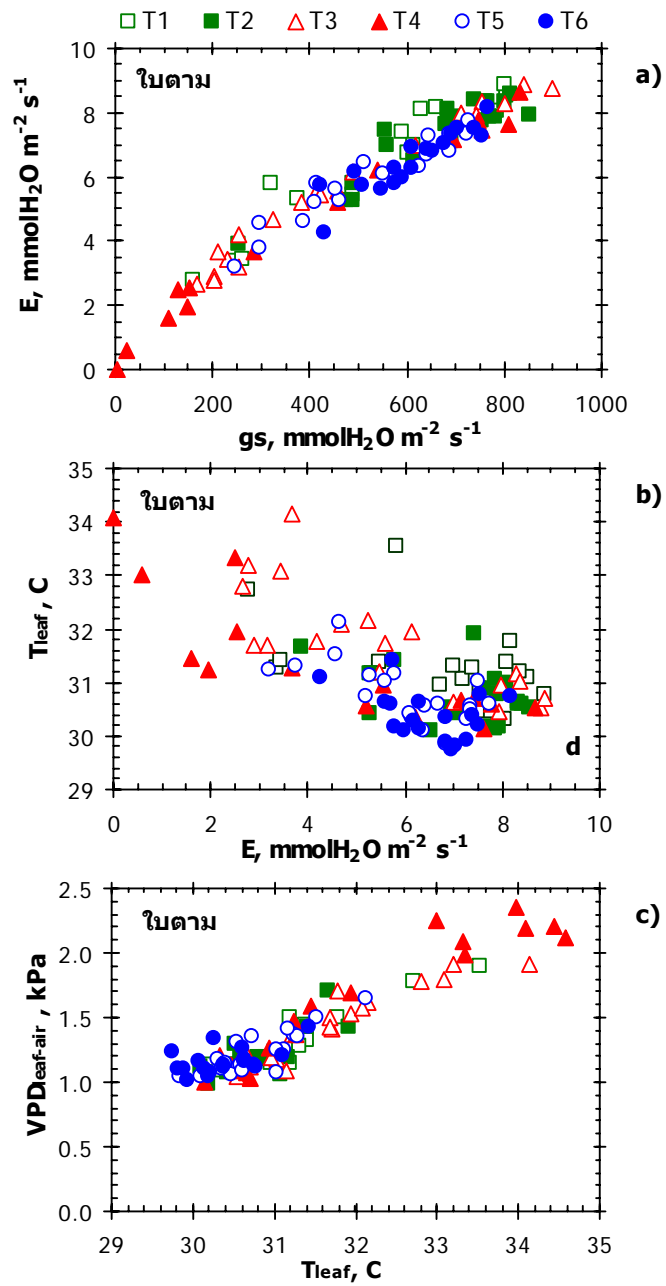
ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

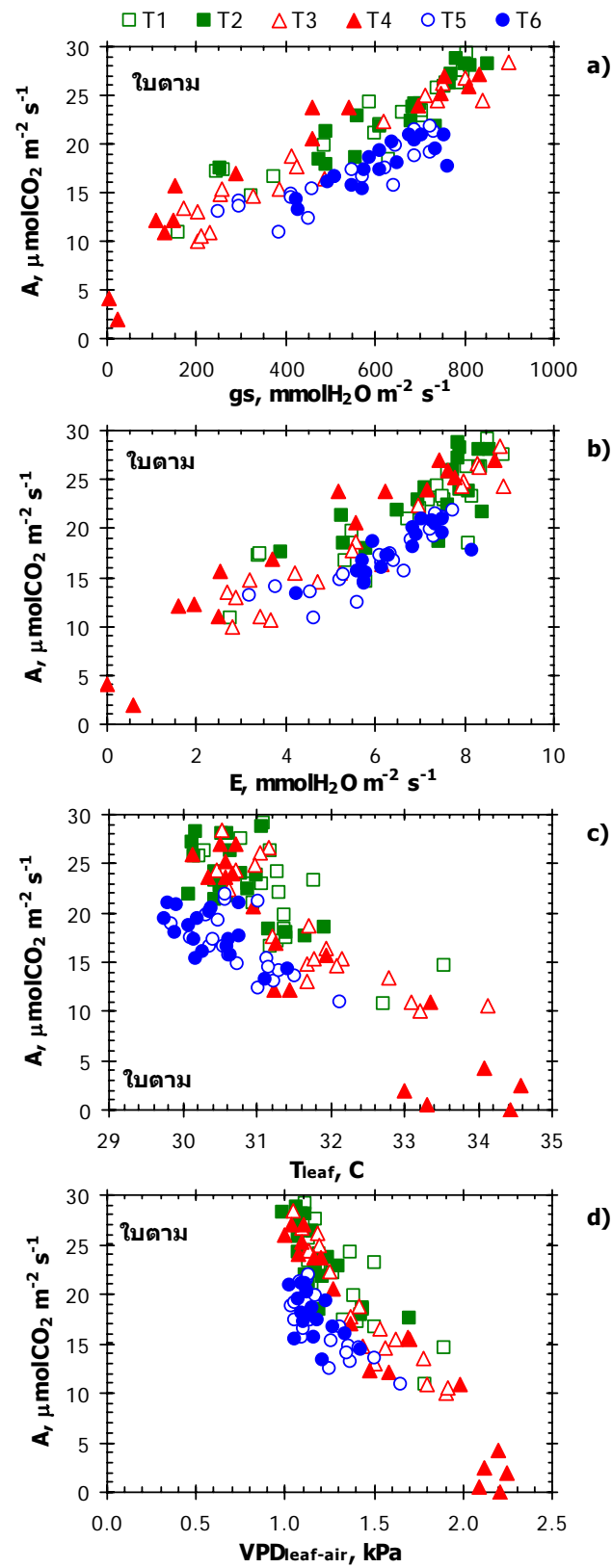
ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 13 พารามิเตอร์ของใบตาม เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ (gs) b) อัตราคายน้ำ (E) c) อุณหภูมิใบ (T_{leaf}) d) แรงดึงคายน้ำ ($VPD_{\text{leaf-air}}$) e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) ในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน



ภาพที่ 14 ตัวอย่างใบตาม a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่านำไหลปากใบกับอัตราคายน้ำ b) อัตราคายน้ำกับอุณหภูมิใบ และ c) อุณหภูมิใบกับแรงดึงคายน้ำ ในช่วงทดลอง 17-42 วัน



ภาพที่ 15 พารามิเตอร์ของใบตามที่สัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำในช่วง 17 – 42 วัน

8. มวลชีวภาพ (Biomass)

มวลชีวภาพของต้นกล้ายูคาลิปตัสทั้ง 6 ตำรับ ที่ได้จากการวิเคราะห์ 2 ครั้ง คือครั้งที่ 1 เป็นตัวอย่างวันที่ 17 (ก่อน) และครั้งที่ 2 เป็นตัวอย่างวันที่ 42 (หลังปรับ pH ของสารละลายตำรับ T3 และ T4) สามารถบอกถึงอัตราการเจริญเติบโตและผลกระทบของตำรับทดลองที่มีต่อการพัฒนาของต้นกล้ายูคาลิปตัสได้ โดยครั้งที่ 1 ก่อนปรับ pH พบว่ามวลสดทั้งต้น มวลแห้งทั้งต้น และพื้นที่ใบทั้งต้นของตำรับ T4 มีค่ามากที่สุด ขณะที่ตำรับ T6 มีค่าน้อยที่สุด และครั้งที่ 2 มวลสดทั้งต้น มวลแห้งทั้งต้น และพื้นที่ใบทั้งต้นของตำรับ T4 กลับมีค่าต่ำที่สุด (ตารางที่ 14) แสดงถึงผลกระทบอย่างมากของสาร KHCO_3 ที่ใช้ปรับ pH

เมื่อพิจารณามวลสดแต่ละส่วนของต้นในทุกตำรับ โดยแยกเป็นส่วนของราก ลำต้น และใบ (ตารางที่ 15 และภาพที่ 16a) พบว่าครั้งที่ 1 ตำรับ T4 มีมวลของทั้ง 3 ส่วนสูงที่สุด ในขณะที่ต้นที่ปลูกในสารละลายต่าง คือตำรับ T6 มีค่าทุกส่วนน้อยที่สุด แต่หลังจากปรับ pH ของตำรับ T3 และ T4 แล้ว พบว่าผลกระทบของการปรับ pH ด้วย KHCO_3 ทำให้มวลสดทุกส่วนของตำรับ T4 กลับกลายเป็นมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งมวลแห้งในแต่ละส่วนก็แสดงผลเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 16 และภาพที่ 16b) และการกระจายตัวของมวลแห้งในส่วนของราก ลำต้น และใบของทั้ง 2 ตำรับไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 16c) แม้ตำรับ T4 และตำรับ T6 จะมีมวลสดและมวลแห้งต่ำกว่าตำรับอื่นๆ แต่ค่าสัดส่วนเนื้อดินต่อรากที่แสดงถึงการนำสารประกอบคาร์บอนที่ได้ไปใช้ในการสร้างส่วนเนื้อดินกลับไม่แตกต่างจากตำรับอื่น แสดงว่าที่มวลของตำรับ T4 และ ตำรับ T6 มีค่าน้อยกว่าตำรับอื่นๆ เพราะมวลของรากมีน้อย จึงส่งผลให้มีการสร้างส่วนยอดได้น้อยตามไปด้วย ดังนั้นระบบรากที่เล็กจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จำกัดการเจริญเติบโตของต้นกล้ายูคาลิปตัส

Pestana *et al.* (2001) พบว่าต้นกล้าส้มที่อยู่ในสารละลายที่มีไบคาร์บอเนต ร่วมกับมีธาตุเหล็กระดับต่ำ (0 และ 5 μM) จะพบว่ามีรากล้นน้อยกว่าต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีไบคาร์บอเนต โดยปลายรากประมาณ 2-4 มิลลิเมตร มีลักษณะพอง บวม การแตกแขนงน้อย และมีสีค่อนข้างแดง ซึ่งรายงานของ Alhendawi *et al.* (1997) กล่าวว่าไว้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตในสารละลาย มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากข้าวบาเลย์ ข้าวฟ่าง และข้าวโพด

สำหรับต้นกล้าตำรับ T5-T6 ที่เลี้ยงในสารละลายที่เป็นต่าง พบว่าหลังจาก 42 วัน มวลแห้งทั้งต้นจะต่ำกว่าต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายกรด (T1-T2) ชัดเจน และการเลี้ยงในสารละลายที่ปรับให้เป็นต่าง (pH 8.5) คงที่ (T6) จะลดการเจริญเติบโตได้มากกว่าในตำรับ T5 ที่เริ่มต้นเป็นต่างแล้วปล่อยให้ pH เปลี่ยนตามจริง

ตารางที่ 14 มวลสด มวลแห้ง และพื้นที่ใบทั้งต้นของยูคาลิปตัส 6 ตำรับ ใน 2 ช่วงเวลา คือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของตำรับ T3-T4) และ ครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายตำรับ T3-T4)

ครั้งที่	ตำรับ	มวลสดทั้งต้น (Mf), กรัม	มวลแห้งทั้งต้น (Md), กรัม	พื้นที่ใบทั้งต้น (LA), ตร.ซม.
1	T1	5.1	1.2	86.5
	T2	6.5	1.3	105.6
	T3	5.8	1.1	86.5
	T4	7.1	1.6	110.1
	T5	5.6	1.2	88.4
	T6	3.9	0.9	64.7
	<i>P-value</i>	ns	ns	ns
	CV (%)	21.0	23.9	23.7
2	T1	32.5 ^{ab}	6.6 ^{abc}	341.7 ^{abc}
	T2	37.8 ^a	9.0 ^a	445.8 ^a
	T3	32.2 ^{ab}	7.8 ^{ab}	377.0 ^{ab}
	T4	16.7 ^c	3.5 ^d	205.0 ^c
	T5	24.0 ^{bc}	5.2 ^{bcd}	282.7 ^{bc}
	T6	19.9 ^{bc}	4.3 ^{cd}	277.5 ^{bc}
	<i>P-value</i>	**	**	*
	CV (%)	24.0	21.8	22.0

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 15 มวลสดของส่วนราก ลำต้น ใบ และสัดส่วนเนื้อดินต่อราก ของต้นกล้วยคาลิปดัส 6 ตำรับ ใน 2 ช่วงเวลาคือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของ ตำรับ T3-T4) และครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายตำรับ T3-T4)

วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ตำรับ	มวลสดราก, กรัม	มวลสดลำต้น, กรัม	มวลสดใบ, กรัม	สัดส่วนเนื้อดินต่อราก
17	T1	2.2	0.9	2.1	1.4
	T2	2.9	1.1	2.5	1.3
	T3	2.8	0.9	2.1	1.1
	T4	3.4	1.1	2.5	1.1
	T5	2.8	0.8	2.1	1.1
	T6	1.7	0.6	1.5	1.3
P-value		ns	ns	ns	ns
CV (%)		24.3	23.8	22.3	20.2
42	T1	17.5 ^{ab}	6.0 ^{ab}	9.0 ^{abc}	0.9
	T2	19.0 ^a	6.9 ^a	11.9 ^a	1.0
	T3	15.6 ^{abc}	6.6 ^a	9.8 ^{ab}	1.1
	T4	8.3 ^c	3.1 ^c	5.4 ^c	1.0
	T5	12.6 ^{abc}	4.3 ^{bc}	7.2 ^{bc}	0.9
	T6	9.6 ^{bc}	3.5 ^{bc}	6.8 ^{bc}	1.1
P-value		*	*	*	ns
CV (%)		28.7	24.6	21.9	19.6

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

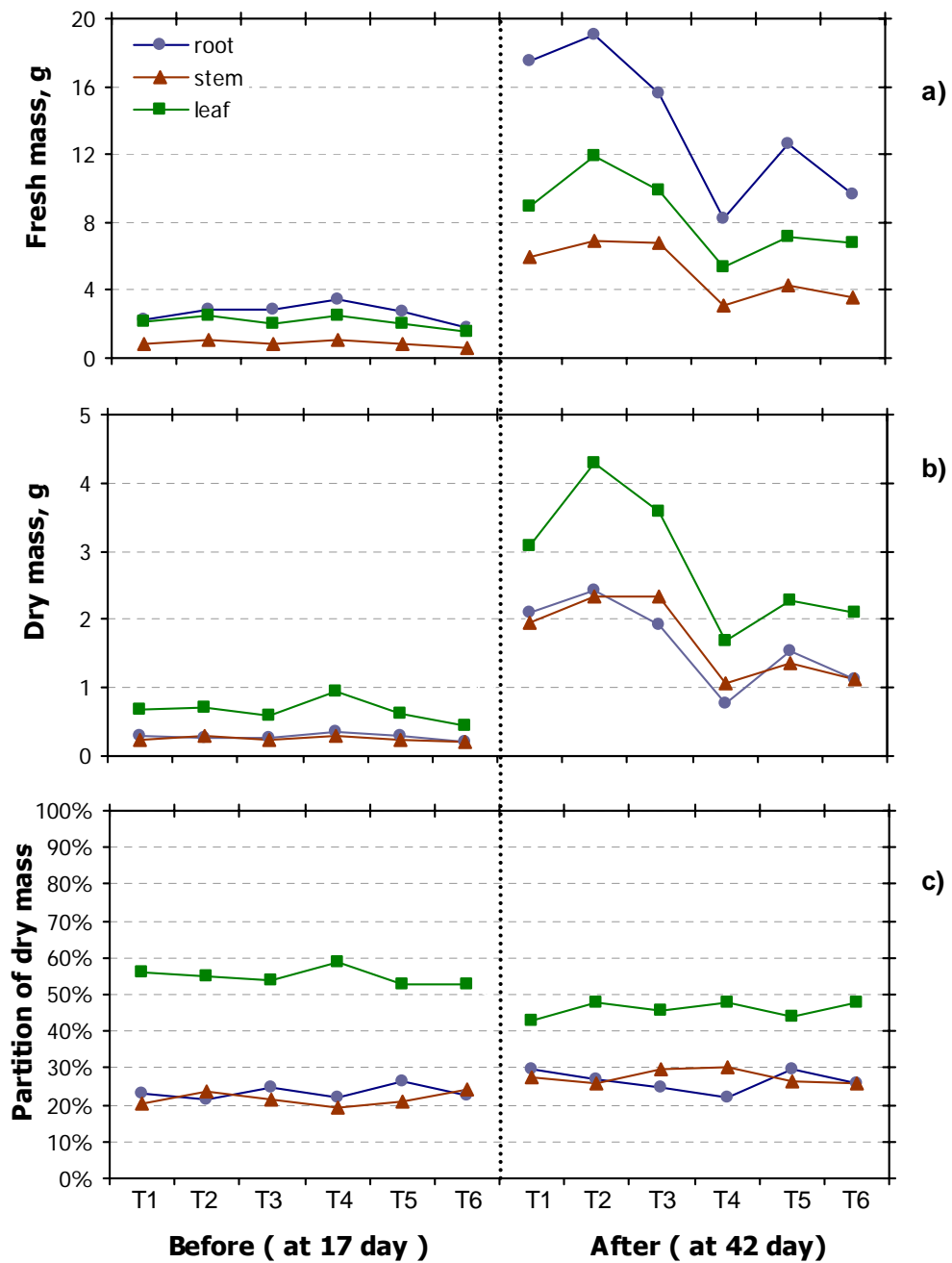
ตารางที่ 16 มวลแห้งของส่วนราก ลำต้น ใบ และสัดส่วนเนื้อดินต่อราก ของต้นกล้วยคาลิปัส 6 ดำรับ ใน 2 ช่วงเวลาคือ ครั้งที่ 1 (วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลายของ ดำรับ T3-T4) และครั้งที่ 2 (วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลายดำรับ T3-T4)

วันที่เก็บตัวอย่าง	ดำรับ	มวลแห้งราก, กรัม	มวลแห้งลำต้น, กรัม	มวลแห้งใบ, กรัม	สัดส่วนเนื้อดินต่อราก
17	T1	0.3	0.3	0.7	3.4
	T2	0.3	0.3	0.7	3.7
	T3	0.3	0.2	0.6	3.2
	T4	0.4	0.3	0.9	3.6
	T5	0.3	0.2	0.6	2.8
	T6	0.2	0.2	0.5	3.3
P-value		ns	ns	ns	ns
CV (%)		19.5	24.9	32.5	26.5
42	T1	1.9 ^{ab}	2.0 ^{ab}	3.1 ^{ab}	2.6
	T2	2.4 ^a	2.3 ^a	4.3 ^a	2.7
	T3	1.9 ^{ab}	2.3 ^a	3.6 ^{ab}	3.2
	T4	0.8 ^d	1.1 ^c	1.7 ^c	3.6
	T5	1.6 ^{bc}	1.4 ^{bc}	2.3 ^{bc}	2.4
	T6	1.2 ^{cd}	1.1 ^c	2.1 ^{bc}	2.8
P-value		**	**	**	ns
CV (%)		22.0	21.5	24.8	18.9

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ



ภาพที่ 16 a) มวลสด b) มวลแห้ง และ c) สัดส่วนมวลแห้งในส่วนต่างๆ ของต้นยูคาลิปตัส ใน 2 ช่วงเวลาคือ ครั้งที่ 1 วันที่ 17 ก่อนการปรับ pH ในสารละลาย และครั้งที่ 2 วันที่ 42 หลังการปรับ pH ในสารละลาย

สรุปผลการทดลอง

เมื่อปลูกต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายกรด (pH 5.7 สำหรับ T1-T2) พบว่า pH ของสารละลายคืบจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทส และปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของทั้งสองตำรับไม่แสดงความแตกต่างกันตลอดการทดลอง เมื่อวิเคราะห์ธาตุเหล็ก พบว่าธาตุเหล็กส่วนมากสะสมอยู่ที่ส่วนราก รองลงมาคือใบ และลำต้น ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการให้แสงนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 0.80-0.83 ซึ่งเป็นระดับปกติของต้นยูคาลิปตัส เมื่อควบคุมสภาพให้เหมาะสม พบว่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ ($A_{1,000}$) ของใบมีสูง และระบบรากที่มากกว่า จึงมีมวลแห้งทั้งต้นสูงกว่าตำรับอื่นๆ

ต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายด่าง (pH 8.5 สำหรับ T5-T6) พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์รวมในใบมีต่ำ เพราะความเข้มข้นของธาตุเหล็กในใบที่วิเคราะห์ได้มีน้อย ในส่วนของระบบรับแสงพบว่าไม่ถูกกระทบ เพราะมีค่าอยู่ในระดับปกติ แต่อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิของใบต่ำ ส่งผลให้มวลแห้งทั้งต้นน้อยกว่าต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายที่เป็นกรด (pH 5.7) ส่วนต้นกล้าในสารละลายที่เป็นกรด (pH 5.7) และปรับ pH เป็นด่าง (pH 8.5) ด้วย KOH นั้น พารามิเตอร์ต่างๆ แสดงผลเช่นเดียวกับต้นที่ปลูกในสารละลายที่เป็นกรด (5.7)

สำหรับต้นกล้าที่ปลูกในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน (pH 5.7) และปรับ pH ในสารละลายเป็นด่าง (pH 8.5) ด้วย KHCO_3 นาน 15 วัน (T4) นั้นได้รับผลกระทบอย่างมาก คือ pH ของสารละลายคืบจากใบและปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบเพิ่มสูงขึ้น เมื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุเหล็กทั้งต้น พบว่ามีการสะสมในส่วนรากมาก ขณะที่ใบมีอยู่น้อย ซึ่งคาดว่าเกิดจากการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กทางไซเลมไปยังส่วนเหนือดินเป็นไปได้น้อย จึงพบธาตุเหล็กในใบน้อย สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดที่พบนั้น สูงกว่าการเลี้ยงในสารละลายที่เป็นกรดอ่อน (pH 5.7) เพราะมีปริมาณคลอโรฟิลล์บีที่มีมากกว่า ส่งผลให้สัดส่วนระหว่างคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีลดลงต่ำกว่าระดับปกติ ส่วนผลกระทบที่มีต่อระบบรับแสง PSII นั้นพบว่าจะเกิดชัดเจนเมื่อปรับลด pH จากด่าง (หลังจาก 15 วัน) กลับเป็นกรดอีกครั้ง เพราะค่า ϕ_{dark} ของใบลดลงอย่างชัดเจนจนต่ำกว่าค่าของใบยูคาลิปตัสปกติ และทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงถูกกระทบให้เสียหายไปด้วย อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิลดลง เนื่องมาจากค่านำไหลปากใบที่ลดลง โดยที่ค่านำไหลปากใบเริ่มแสดงแนวโน้มลดลงตั้งแต่ปรับ pH จากกรดเป็นด่าง จนมีค่าเกือบเป็น

ศูนย์เมื่อปรับ pH กลับลดลงเป็นกรดอีกครั้ง โดยค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบที่เพิ่มสูงขึ้นพบว่าสอดคล้องกับปากใบที่ปิดแคบลง อีกทั้งระบบรากที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้ต้นยูคาลิปตัสสร้างส่วนยอดได้น้อย มวลแห้งทั้งต้นจึงน้อยกว่าทุกตำรับ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกษม สุขสถาน. 2515. **อ้อย**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 9. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ดีพร้อม ไชยวงศ์เกียรติ. 2527. **ยูคาลิปตัส**. ชมรมถ่ายทอดเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

เกียรติชัย พรหมมุล. 2527. การเก็บรักษาเมล็ดและอัตราการงอกของเมล็ดไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส. น. 70-89. ใน **รายงานการสัมมนาไม้ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส, 30 ตุลาคม – 1 พฤศจิกายน 2527**. กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.

ปรีชา อบอาย, ชูบ เข็มขนาด, ไสภณ สีนุประมา, เครือมาศ ละเอียดอ่อน, เผด็จ กาญจนกุล, จรุงศรี บุญมาก, บุญวงศ์ ไทยอุตสาห, บุญชูบ บุญทวี, เรียงชัย เผ่าสัจจ และ พิทยา เพชรมาก. ม.ป.ป. **ผลกระทบของการปลูกไม้ยูคาลิปตัส และมันสำปะหลังต่อดินระบบนิเวศ และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ**. สวนปลูกป่าภาคเอกชน สำนักส่งเสริมการปลูกป่า กรมป่าไม้.

ประเสริฐ อะมริต. 2528. **ศึกษาปัญหาจุลธาตุอาหาร (เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง) ที่เป็นปัจจัยจำกัดผลผลิตของถั่วลิสงที่ปลูกในดินชุดตาคลิและแนวทางแก้ไข**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฝ่ายส่งเสริมและเผยแพร่ กองอนุรักษ์ต้นน้ำ กรมป่าไม้. 2533. **ยูคาลิปตัสพันธุ์ไม้เศรษฐกิจที่มีค่าทั้งปัจจุบันและอนาคต**. ฝ่ายส่งเสริมและเผยแพร่ กองอนุรักษ์ต้นน้ำ กรมป่าไม้ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ไพบุลย์ วิวัฒน์วงศ์วนา. 2546. **เคมีดิน**. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- มุกดา สุขสวัสดิ์. 2544. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน**. สำนักงานโอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- ยงยุทธ ไชยสถ. 2546. **ธาตุอาหารพืช**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิเศษ อัครวิทยานุกูล. 2534. **การปลูกส้มโอ**. โครงการหนังสือเกษตรชุมชน, กรุงเทพมหานคร.
- ศุภณีย์ อินทอง. 2548. **อิทธิพลของไนเตรตและโบรอนต่ออาการคลอโรซิสจากการขาดธาตุเหล็กในยูคาลิปตัส**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, จินตนา บางจัน และ จิตรฤทัย ชูมาก. 2543. ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 69-79. ใน **รายงานโครงการวิจัย วิธีการให้อากาศเพื่อกักชีวิตต้นมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง**. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์ และ ธาดา ชัยสีหา. 2543. Chlorophyll Fluorescence ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 85-90. ใน **รายงานโครงการวิจัย วิธีการให้อากาศเพื่อกักชีวิตต้นมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง**. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, คัทลียา ฉัตรเที่ยง, ไกรวุฒิ เจริญศิริ และ ภูริพงษ์ ดำรงวุฒิ. 2544. สภาพอากาศและน้ำในดินของแปลงส้มเขียวหวาน. น. 10-45. ใน **รายงานโครงการพัฒนาวิชาการ ข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาของส้มเขียวหวาน**. คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรีย์ ยิงษ์ชวัลย์. 2546. ผลการศึกษาการประเมินกระบวนการสังเคราะห์แสงและปริมาณธาตุอาหารในต้นกล้วยคาลิปัตส์ที่ปรับสภาพหลังแสดงอาการใบเหลืองซีด. ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรีย์ ยิงษ์ชวัลย์และ คัทลียา ฉัตรเที่ยง. 2547. ข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาเพื่อความเข้าใจปัญหาการเกิดอาการยอดตายของยูคาลิปต์สในเขตภาคตะวันตก. ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรีย์ ยิงษ์ชวัลย์และสุทิน หิรัญอ่อน. 2547. คุณค่าคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นมะม่วงที่ถูกน้ำท่วม. คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน, ถวิล ครูฑกุล, ไพบุลย์ ประพฤติธรรม และ อำนาจ สุวรรณฤทธิ์. 2527. ความอุดมสมบูรณ์ของดิน. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Abadia, J. 1992. Leaf responses to Fe deficiency: a Review. *J. Plant Nutr.* 15: 1699-1713.

Alhendawi R.A., V. Romheld, E. A. Kirkby and H. Marschner. 1997. Influence of increasing bicarbonate concentrations on plant growth, organic acid accumulation in roots and uptake by barley, sorghum, and maize. *J. Plant Nutr.* 20: 1731-1753.

Anderson, J.M. 1986. Photorelation of thylakoid membranes. *Annu. Rev. Plant. Physiol.* 37: 93-136.

Anonymous. 1990. LI-6262 CO₂/H₂O Analyzer: Intruccion Manual. LI-COR, Inc., USA.

Anonymous. 2002. Leaf Chamber Fluorometer. Portable Photosynthesis System (LI-6400) Manual. LI-COR, Inc., Nebraska, USA.

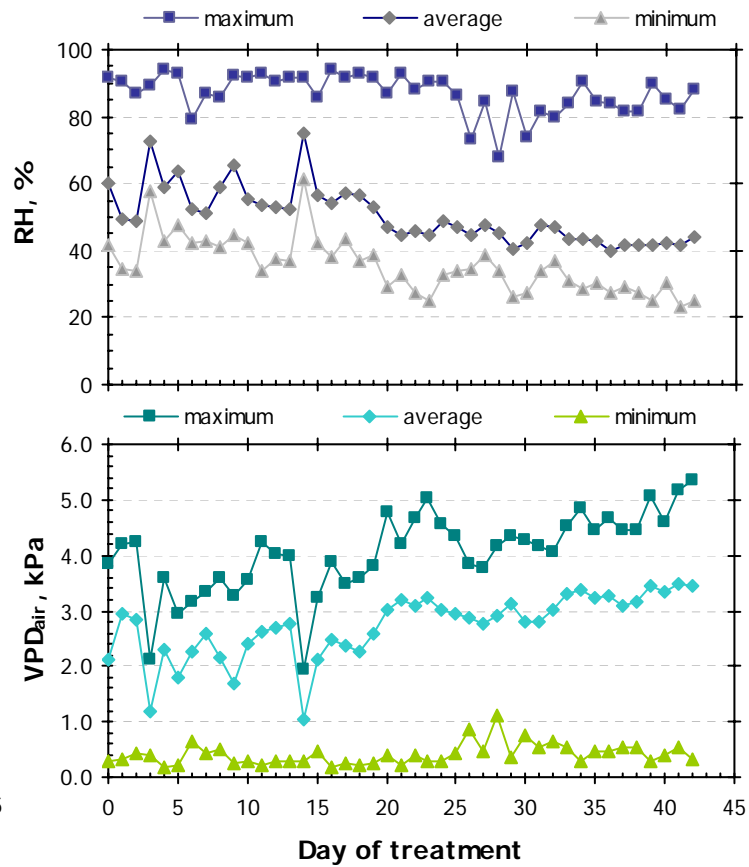
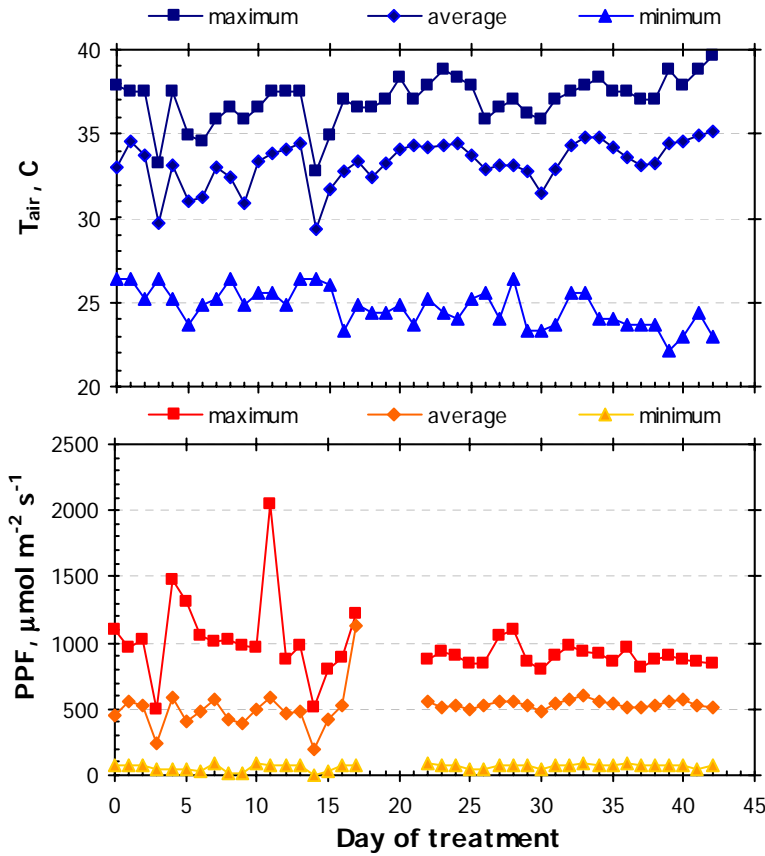
- Brian M. W., D. D. Blevins and D. J. Eide. 2002. Characterization of FRO2, a pea ferric chelate reductase involved in root iron acquisition. **Plant Physiol.** 129 : 85-94.
- Buchanan, B. B., W. Gruissen and R. L. Jone. 2000. **Biochemistry & Molecular Biology of Plants**. Courien Company, Inc. U.S.A. 1367p.
- Chaney, RL., J.C. Brown and L.O. Tiffin. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybean. **Plant Physiol.** 50: 208-213.
- Chen, Y. and P. Barak. 1982. Iron nutrition of plants in calcareous soil. **Adv. Agron.** 35: 217-241
- Elena B. GonZalez-Vallejo, Fwrmin Morales, Luis Cistue, Abadia and Javier Abadia. 2000. Iron deficient decreases the Fe(III)- chelate reducing activity of leaf protoplasts. **Plant Physiol.** 122 : 337-344.
- F.A.O. 1981. **Eucalyptus for planting**. Rome, Italy.
- Huang, D.D., N.Y. Wang, S.P. Gough and C. Gg. Kannangara. 1984. D-amino levonilic acid synthesizing enzymes need and RNA moiety for activity. **Science.** 225: 1482-1484
- James, S.A., D.T. Bell and A.D. Robson. 2002. Growth response of highly tolerant *Eucalyptus* species to alkaline pH, bicarbonate and low iron supply. **Aust. J. Experiment Agric.** 42: 65-70.
- Loeppert, R. H., and L. R. Hossner. 1984. Reactions of Fe²⁺ and Fe³⁺ with calcite. **Clays and Clay Minerals.** 32: 213-222.

- Marschner, H. 1995. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2nd ed. Academic Press, New York. 312-404
- Mengel, K. 1995. Iron availability in plant tissue-iron chlorosis on calcareous soil. pp.389-397. *In* J. Abadia, ed., **Iron Nutrition in Soils and Plants**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Moran, R. 1982. Formulae for determination of chlorophyllous pigments extracted with N, N-dimethylformamide. **Plant Physiol.** 69 : 1376-1381.
- Morales, F., R. Belkhodja, A. Abadia and J. Abadia. 2000. energy dissipation in the leaves of Fe-deficient pare trees grown in the field. **J. Plant. Nutri.** 23(11-12): 1709-1716.
- National Academy of Science. 1980. **Firewood Crops Shrub and Tree**. Species for Energy Production. Washington, D.C.
- Nikolic, M. and R. Kastori. 2000. Effects of bicarbonate and Fe Supply on Fe nutrition of grapevine. **J. Plant Nutr.** 23: 1619-1627.
- Nikaolic, M. and V. Romheld. 1999. Mechanism of Fe uptake by leaf symplast: Is Fe inactivation in leaf a cause of Fe deficiency chlorosis. **Plant and Soil.** 215: 229-237.
- Nishio, J.N., S.E. Taylor and N. Terry. 1985. Changes in thylakoid galactolipids and proteins during iron nutrition-mediated chloroplast development. **Plant Physiol.** 77: 705-711

- Pestana, M., M. David, A. Varennes, J. Abadia and E.A. Faria. 2001. Response of "newhall" orange trees to iron deficiency in hydroponics: effects on leaf chlorophyll, photosynthetic efficiency, and root ferric chelate reductase activity. **J. Plant. Nutri.** 24(10): 1609-1622.
- Schmidt, W. and Janiesch. P, 1991. Specificity of the electron donor for transmembrane redox system in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) roots. **J. Plant Physiol.** 138: 450-453.
- Seatz, L. F. and H. B. Peterson. 1964. Acid, saline and sodic soils. p. 292-319. In F. E. Bear(ed.) Chemistry of the soil. **Am. Chem. Soc. Monograph Series.** Reinhold Publishing Co.,New York, NY.
- Terry, N. 1980. Limiting factors in photosynthesis. I. Use of iron stress to control photophysical capacity in vivo. **Plant Physiol.** 65: 114-120.
- Terry N. and G. Low . 1982. Leaf Chlorophyll content and its relation to the intercellular localization of iron. **J. Plant Nutr.** 5: 301-310.
- Terry, N. and J. Abadia. 1986. Function of iron in chloroplast. **J. Plant Nutr.** 9: 604-646.
- Turnbull, J.W. 1974. An outstanding provenance of river red gum. Inst. **For. Aust. Newsl.** 15(4): 1-23.
- Yoshisuji, B. and T. Kawasoe. 1961. Studies on relation between pH value of water culture solution and the growth of *Eucalyptus* spp. **For. Abstr.** 22(2): 240

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก



ภาพผนวกที่ 1 ค่าเฉลี่ยของอากาศในช่วงเวลากลางวัน (7.00 - 17.00น.) ของโรงเรือนใช้ที่ปลูกต้นกล้วยคาลิปัสตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

ตารางภาคผนวกที่ 1 ค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน

วันที่	pH ของสารละลายคั้นจากใบ						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	4.44	4.49	4.64	4.46	4.52	4.41	ns	2.4
19	4.49	4.52	4.55	4.49	4.44	4.52	ns	1.3
20	4.32	4.50	4.49	4.52	4.37	4.56	ns	2.9
21	4.54	4.51	4.61	4.52	4.38	4.55	ns	2.9
23	4.56	4.60	4.47	4.71	4.52	4.52	ns	2.2
24	4.55	4.64	4.49	4.61	4.60	4.46	ns	2.4
25	4.40	4.40	4.34	4.58	4.55	4.57	ns	2.3
26	4.43 ^b	4.37 ^b	4.40 ^b	4.74 ^a	4.20 ^b	4.37 ^b	*	2.9
27	4.34	4.38	4.35	4.64	4.44	4.52	ns	2.8
28	4.34 ^b	4.55 ^{ab}	4.36 ^b	4.78 ^a	4.42 ^b	4.55 ^{ab}	*	2.9
29	4.44 ^{bc}	4.47 ^{bc}	4.52 ^b	4.72 ^a	4.36 ^c	4.48 ^{bc}	**	1.8
30	4.60 ^{ab}	4.57 ^{abc}	4.45 ^{bc}	4.69 ^a	4.43 ^c	4.59 ^{ab}	**	1.7
32	4.29 ^b	4.35 ^b	4.38 ^b	4.86 ^a	4.33 ^b	4.34 ^b	**	2.3
34	4.47 ^b	4.38 ^b	4.32 ^b	4.81 ^a	4.31 ^b	4.54 ^{ab}	*	3.4
35	4.62 ^b	4.60 ^b	4.51 ^{bc}	4.88 ^a	4.39 ^c	4.51 ^{bc}	**	2.0
37	4.37 ^b	4.40 ^b	4.29 ^b	4.81 ^a	4.26 ^b	4.29 ^b	**	2.5
38	4.32 ^{bc}	4.37 ^b	4.36 ^b	4.75 ^a	4.18 ^{cd}	4.15 ^d	**	2.0
39	4.36 ^b	4.32 ^b	4.32 ^b	4.81 ^a	4.23 ^b	4.32 ^b	**	2.0
42	4.47 ^b	4.42 ^{bc}	4.28 ^c	4.71 ^a	4.37 ^{bc}	4.43 ^{bc}	**	1.9
เฉลี่ย	4.44 ^{bc}	4.48 ^b	4.42 ^{bc}	4.68 ^a	4.38 ^c	4.45 ^b	**	1.7

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 2 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอของใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน

วันที่	ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ (g m ⁻²)						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.23 ^a	0.27 ^a	0.28 ^a	0.28 ^a	0.13 ^b	0.15 ^b	**	16.1
19	0.29 ^a	0.27 ^a	0.31 ^a	0.29 ^a	0.20 ^b	0.16 ^b	**	15.6
20	0.29 ^{ab}	0.30 ^a	0.34 ^a	0.34 ^a	0.22 ^b	0.21 ^b	*	14.5
21	0.31	0.23	0.31	0.30	0.22	0.21	ns	18.1
23	0.31 ^a	0.29 ^{ab}	0.30 ^{ab}	0.34 ^a	0.21 ^c	0.18 ^c	*	17.1
24	0.25 ^{ab}	0.24 ^{ab}	0.28 ^a	0.30 ^a	0.21 ^b	0.20 ^b	*	14.9
25	0.20	0.33	0.28	0.31	0.23	0.18	ns	23.2
26	0.25	0.28	0.27	0.26	0.25	0.18	ns	15.8
27	0.28	0.30	0.28	0.24	0.30	0.25	ns	17.0
28	0.21 ^{bc}	0.30 ^a	0.26 ^{ab}	0.27 ^{ab}	0.31 ^a	0.17 ^c	**	12.2
29	0.26 ^a	0.27 ^a	0.30 ^a	0.25 ^a	0.28 ^a	0.17 ^b	**	11.0
30	0.25	0.26	0.25	0.21	0.25	0.18	ns	13.7
32	0.24 ^{ab}	0.24 ^{ab}	0.22 ^{ab}	0.14 ^c	0.26 ^a	0.17 ^{bc}	*	17.0
34	0.24	0.25	0.24	0.24	0.26	0.22	ns	20.4
35	0.26 ^{ab}	0.22 ^b	0.22 ^b	0.25 ^b	0.24 ^b	0.32 ^a	*	13.0
37	0.25	0.25	0.25	0.22	0.23	0.25	ns	19.9
38	0.22	0.21	0.23	0.20	0.21	0.22	ns	21.1
39	0.27 ^a	0.20 ^{ab}	0.19 ^{ab}	0.22 ^{ab}	0.22 ^{ab}	0.11 ^b	*	37.0
42	0.23	0.27	0.24	0.21	0.24	0.20	ns	13.6
เฉลี่ย	0.26 ^a	0.26 ^a	0.27 ^a	0.26 ^a	0.24 ^a	0.20 ^b	**	4.1

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 3 ปริมาณคลอโรฟิลล์พีของใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน

วันที่	ปริมาณคลอโรฟิลล์พี (g m ⁻²)						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.18	0.10	0.11	0.11	0.06	0.05	ns	57.7
19	0.10 ^{ab}	0.08 ^{bc}	0.12 ^a	0.08 ^{bc}	0.06 ^c	0.05 ^c	**	21.6
20	0.11	0.12	0.12	0.13	0.09	0.09	ns	17.2
21	0.13	0.09	0.11	0.12	0.09	0.09	ns	22.4
23	0.13 ^a	0.11 ^a	0.12 ^a	0.14 ^a	0.09 ^b	0.08 ^b	**	12.0
24	0.09	0.11	0.10	0.12	0.09	0.09	ns	31.0
25	0.08	0.19	0.15	0.12	0.08	0.07	ns	69.4
26	0.07	0.09	0.09	0.11	0.10	0.06	ns	33.1
27	0.08	0.10	0.10	0.14	0.09	0.12	ns	29.7
28	0.11	0.09	0.08	0.08	0.10	0.05	ns	42.9
29	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.06	ns	16.4
30	0.08	0.08	0.08	0.10	0.09	0.08	ns	21.0
32	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.07	ns	18.6
34	0.09 ^b	0.10 ^b	0.09 ^b	0.14 ^a	0.10 ^b	0.07 ^b	**	17.0
35	0.10	0.09	0.07	0.13	0.11	0.13	ns	23.9
37	0.10 ^b	0.12 ^b	0.11 ^b	0.17 ^a	0.10 ^b	0.10 ^b	**	16.7
38	0.08 ^b	0.10 ^b	0.09 ^b	0.18 ^a	0.08 ^b	0.09 ^b	**	12.8
39	0.10 ^{bc}	0.11 ^b	0.09 ^{bc}	0.19 ^a	0.12 ^b	0.08 ^c	**	13.8
42	0.11 ^b	0.11 ^b	0.11 ^b	0.18 ^a	0.10 ^b	0.10 ^b	**	14.9
เฉลี่ย	0.10 ^b	0.10 ^b	0.10 ^b	0.13 ^a	0.09 ^c	0.08 ^d	**	4.8

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 4 ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมของใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง 17 – 42 วัน

วันที่	ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม (g m ⁻²)						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.37 ^a	0.37 ^a	0.40 ^a	0.39 ^a	0.19 ^b	0.20 ^b	**	9.5
19	0.40 ^a	0.38 ^a	0.43 ^a	0.39 ^a	0.27 ^b	0.23 ^b	**	13.4
20	0.40 ^{ab}	0.42 ^a	0.47 ^a	0.46 ^a	0.30 ^b	0.30 ^b	*	14.1
21	0.44	0.34	0.43	0.42	0.31	0.30	ns	17
23	0.46 ^a	0.41 ^{ab}	0.42 ^{ab}	0.48 ^a	0.33 ^{bc}	0.26 ^c	**	12.9
24	0.34	0.35	0.38	0.42	0.28	0.34	ns	15.9
25	0.28	0.48	0.41	0.41	0.31	0.25	ns	27.2
26	0.33 ^a	0.38 ^a	0.35 ^a	0.37 ^a	0.33 ^a	0.24 ^b	*	14.2
27	0.37	0.40	0.38	0.36	0.39	0.35	ns	12.5
28	0.39	0.39	0.35	0.36	0.41	0.22	ns	20.8
29	0.34 ^a	0.36 ^a	0.40 ^a	0.36 ^a	0.37 ^a	0.23 ^b	**	10.1
30	0.33	0.35	0.33	0.30	0.34	0.31	ns	8.7
32	0.33	0.33	0.31	0.34	0.35	0.24	ns	15.1
34	0.32	0.34	0.32	0.38	0.35	0.30	ns	18.5
35	0.36 ^b	0.30 ^b	0.30 ^b	0.38 ^{ab}	0.35 ^b	0.46 ^a	*	12.8
37	0.34	0.36	0.36	0.40	0.32	0.35	ns	18.1
38	0.31	0.31	0.32	0.42	0.29	0.30	ns	17.2
39	0.37	0.28	0.29	0.45	0.40	0.25	ns	23.1
42	0.34	0.38	0.35	0.39	0.35	0.30	ns	11.5
เฉลี่ย	0.36 ^b	0.36 ^b	0.37 ^b	0.39 ^a	0.33 ^c	0.29 ^d	**	3.9

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 5 สัดส่วนปริมาณคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีของใบยูคาลิปตัสในช่วง
ทดลอง 17 – 42 วัน

วันที่	สัดส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บี						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	2.4	2.9	2.6	2.7	2.1	2.8	ns	13.9
19	2.9	2.7	2.6	2.9	2.7	2.3	ns	11.8
20	2.8	2.5	2.7	2.7	2.5	2.3	ns	8.8
21	2.5	2.3	2.6	2.5	2.5	2.4	ns	7.3
23	2.4	2.4	2.4	2.5	2.0	2.0	ns	14.0
24	2.8	2.7	2.7	2.6	2.5	2.9	ns	9.9
25	2.6	2.5	2.5	2.8	3.2	3.0	ns	17.8
26	3.0	2.9	3.3	2.5	3.0	2.9	ns	16.2
27	3.2	2.9	2.8	2.2	3.4	3.0	ns	19.3
28	2.4	3.3	3.2	3.1	3.3	3.3	ns	19.1
29	3.1	3.0	3.0	2.5	3.2	2.8	ns	8.8
30	3.2	3.0	3.1	2.2	3.0	2.8	ns	12.1
32	2.9 ^{ab}	2.7 ^{ab}	2.7 ^{ab}	1.8 ^c	2.9 ^a	2.5 ^b	**	6.8
34	2.6 ^a	2.6 ^a	2.7 ^a	1.7 ^b	2.9 ^a	2.8 ^a	**	9.0
35	2.7	2.5	2.8	2.0	2.2	2.3	ns	13.6
37	2.7 ^a	2.3 ^{ab}	2.2 ^b	1.3 ^c	2.6 ^{ab}	2.5 ^{ab}	**	8.2
38	2.7 ^a	2.2 ^a	2.5 ^a	1.5 ^b	2.5 ^a	2.4 ^a	**	8.6
39	2.8 ^a	1.9 ^{bc}	2.0 ^{bc}	1.4 ^c	2.5 ^{ab}	2.2 ^{ab}	*	19.8
42	2.2 ^a	2.5 ^a	2.2 ^a	1.2 ^b	2.3 ^a	2.1 ^a	**	11.2
เฉลี่ย	2.7 ^a	2.6 ^a	2.7 ^a	2.2 ^b	2.7 ^a	2.6 ^a	**	3.9

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 6 ประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน

วันที่	ประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตัด						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^a	0.81 ^b	0.81 ^b	**	0.6
19	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^a	0.82 ^a	0.77 ^b	**	2.7
20	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	ns	0.8
21	0.83	0.82	0.83	0.83	0.80	0.82	ns	1.3
23	0.82	0.82	0.83	0.83	0.83	0.79	ns	2.7
24	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84	0.82	ns	1.0
25	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83	0.83	ns	1.4
26	0.82 ^a	0.82 ^{ab}	0.82 ^{ab}	0.81 ^b	0.83 ^a	0.83 ^a	**	0.9
27	0.81	0.82	0.82	0.83	0.83	0.81	ns	1.4
28	0.82	0.82	0.84	0.82	0.83	0.82	ns	0.9
29	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	ns	1.0
30	0.83	0.81	0.82	0.82	0.83	0.81	ns	1.0
32	0.81	0.82	0.81	0.80	0.81	0.82	ns	1.8
34	0.83	0.81	0.82	0.80	0.82	0.83	ns	1.8
35	0.82 ^a	0.83 ^a	0.82 ^a	0.76 ^b	0.83 ^a	0.82 ^a	**	2.5
37	0.81	0.80	0.81	0.80	0.81	0.82	ns	1.5
38	0.82	0.81	0.80	0.82	0.83	0.82	ns	1.6
39	0.81 ^a	0.82 ^a	0.81 ^a	0.62 ^b	0.81 ^a	0.80 ^a	**	6.9
42	0.82	0.81	0.81	0.82	0.82	0.81	ns	1.1
เฉลี่ย	0.82 ^a	0.82 ^a	0.82 ^a	0.80 ^c	0.82 ^a	0.81 ^b	**	0.4

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 7 ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน

วันที่	ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ dark) ของใบตาม						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.83 ^a	0.84 ^a	0.84 ^a	0.83 ^{ab}	0.81 ^c	0.82 ^b	**	0.8
19	0.84 ^a	0.84 ^a	0.84 ^a	0.83 ^a	0.80 ^b	0.81 ^b	*	1.3
20	0.83 ^a	0.84 ^a	0.84 ^a	0.83 ^a	0.82 ^b	0.81 ^b	**	0.7
21	0.83 ^{ab}	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^{ab}	0.81 ^{bc}	0.80 ^c	**	1.0
23	0.84 ^a	0.84 ^a	0.83 ^a	0.84 ^a	0.83 ^{ab}	0.82 ^b	*	0.9
24	0.84	0.84	0.84	0.84	0.82	0.83	ns	0.8
25	0.83	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	ns	1.2
26	0.83	0.82	0.83	0.82	0.82	0.82	ns	1.5
27	0.83	0.82	0.83	0.83	0.82	0.82	ns	1.3
28	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	ns	0.8
29	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82	0.82	ns	0.8
30	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82	ns	1.1
32	0.84	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	ns	1.6
34	0.83	0.82	0.81	0.81	0.83	0.82	ns	1.6
35	0.83	0.83	0.82	0.72	0.82	0.83	ns	5.5
37	0.82	0.82	0.82	0.67	0.82	0.83	ns	7.9
38	0.81	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	ns	2.5
39	0.81 ^a	0.83 ^a	0.82 ^a	0.74 ^b	0.83 ^a	0.83 ^a	*	3.3
42	0.81 ^a	0.83 ^a	0.81 ^a	0.72 ^b	0.82 ^a	0.83 ^a	*	3.6
เฉลี่ย	0.83 ^a	0.83 ^a	0.83 ^a	0.80 ^b	0.82 ^a	0.82 ^a	*	0.9

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกัน ไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 8 ประสิทธิภาพการให้แสง (ϕ PSII) ของใบตัดในช่วงทดลอง 17-42 วัน

วันที่	ประสิทธิภาพการให้แสง (ϕ PSII) ของใบตัด						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.38 ^a	0.41 ^a	0.43 ^a	0.42 ^a	0.30 ^b	0.33 ^b	**	6.4
19	0.42	0.41	0.40	0.40	0.41	0.33	ns	7.5
20	0.41	0.39	0.40	0.40	0.37	0.38	ns	6.1
21	0.39	0.38	0.39	0.38	0.39	0.39	ns	8.1
23	0.37	0.38	0.36	0.37	0.37	0.33	ns	13.9
24	0.42	0.40	0.41	0.36	0.45	0.35	ns	10.3
25	0.40	0.40	0.40	0.36	0.45	0.40	ns	6.2
26	0.40 ^a	0.39 ^a	0.38 ^{ab}	0.35 ^b	0.41 ^a	0.42 ^a	*	5.0
27	0.36	0.40	0.37	0.34	0.41	0.38	ns	7.7
28	0.36 ^b	0.36 ^{ab}	0.37 ^{ab}	0.33 ^c	0.40 ^a	0.34 ^{bc}	*	4.5
29	0.36 ^a	0.35 ^{ab}	0.34 ^{ab}	0.28 ^b	0.38 ^a	0.40 ^a	*	10.2
30	0.36	0.32	0.31	0.27	0.35	0.35	ns	13.3
32	0.36	0.38	0.33	0.31	0.36	0.37	ns	11.4
34	0.37 ^{ab}	0.34 ^{ab}	0.33 ^{bc}	0.26 ^c	0.36 ^{ab}	0.42 ^a	*	11.8
35	0.36 ^a	0.35 ^a	0.35 ^a	0.18 ^b	0.37 ^a	0.39 ^a	**	16.5
37	0.34	0.32	0.34	0.27	0.35	0.37	ns	16.1
38	0.37	0.35	0.31	0.36	0.37	0.35	ns	10.7
39	0.35 ^a	0.37 ^a	0.33 ^a	0.13 ^b	0.36 ^a	0.37 ^a	**	14.4
42	0.36	0.34	0.32	0.34	0.35	0.32	ns	10.1
เฉลี่ย	0.38 ^a	0.37 ^{ab}	0.36 ^b	0.32 ^c	0.38 ^a	0.37 ^{ab}	**	2.3

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 9 ประสิทธิภาพการให้แสง (ϕ PSII) ของใบตามในช่วงทดลอง 17-42 วัน

วันที่	ประสิทธิภาพการให้แสง (ϕ PSII) ของใบตาม						P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6		
17	0.44 ^a	0.42 ^a	0.42 ^a	0.41 ^{ab}	0.32 ^c	0.33 ^{bc}	*	10.8
19	0.45 ^a	0.44 ^a	0.41 ^{ab}	0.42 ^{ab}	0.36 ^b	0.35 ^b	*	9.0
20	0.43	0.42	0.40	0.40	0.37	0.34	ns	9.6
21	0.41	0.41	0.39	0.42	0.37	0.34	ns	11.2
23	0.41	0.41	0.40	0.39	0.33	0.35	ns	12.3
24	0.43	0.43	0.39	0.40	0.35	0.37	ns	10.2
25	0.41	0.42	0.38	0.40	0.31	0.36	ns	10.2
26	0.39	0.39	0.34	0.36	0.31	0.33	ns	11.8
27	0.39	0.38	0.33	0.34	0.32	0.33	ns	12.5
28	0.37	0.38	0.30	0.33	0.31	0.32	ns	15.4
29	0.33	0.36	0.28	0.27	0.28	0.30	ns	17.1
30	0.34	0.35	0.29	0.27	0.29	0.31	ns	18.9
32	0.34	0.36	0.30	0.28	0.30	0.33	ns	11.8
34	0.30	0.33	0.31	0.18	0.24	0.30	ns	20.7
35	0.26 ^a	0.32 ^a	0.28 ^a	0.11 ^b	0.29 ^a	0.30 ^a	**	19.9
37	0.32 ^a	0.34 ^a	0.28 ^a	0.11 ^b	0.31 ^a	0.31 ^a	**	13.6
38	0.31 ^{ab}	0.36 ^a	0.26 ^b	0.07 ^c	0.30 ^{ab}	0.31 ^{ab}	**	14.8
39	0.32 ^{ab}	0.36 ^a	0.26 ^b	0.08 ^c	0.31 ^{ab}	0.30 ^{ab}	**	13.8
42	0.29	0.32	0.24	0.17	0.32	0.28	ns	19.6
เฉลี่ย	0.36	0.38	0.33	0.28	0.32	0.32	ns	9.1

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 10 อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตัดยูคาลิปตัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และ ค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น)

วันที่	อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ของใบตัด							P- value	cv
	T1	T2	T3	T4	T5	T6			
17	23.7 ^b	25.7 ^{ab}	28.3 ^a	26.6 ^{ab}	15.8 ^d	19.8 ^c	**	8.7	
19	112 ^b	100 ^b	85 ^b	95 ^b	158 ^a	90 ^b	**	17.9	
20	115 ^b	91 ^b	94 ^b	92 ^b	136 ^a	114 ^{ab}	*	14.3	
21	105 ^{bc}	88 ^c	85 ^c	90 ^c	147 ^a	124 ^b	**	9.8	
23	92	88	68	84	142	89	ns	27.0	
24	95 ^b	92 ^b	83 ^b	78 ^b	167 ^a	95 ^b	**	14.8	
25	105 ^{bc}	93 ^c	85 ^c	83 ^c	178 ^a	119 ^b	**	11.2	
26	102 ^{bc}	94 ^c	83 ^c	74 ^c	191 ^a	132 ^b	**	16.3	
27	91 ^b	98 ^b	79 ^b	79 ^b	172 ^a	115 ^b	**	18.7	
28	87 ^{bc}	80 ^c	75 ^c	69 ^c	161 ^a	103 ^b	**	13.4	
29	96 ^{bc}	71 ^c	77 ^c	53 ^c	152 ^a	130 ^{ab}	**	24.5	
30	99 ^b	78 ^{bc}	74 ^{bc}	53 ^c	141 ^a	102 ^b	**	21.7	
32	88 ^{bc}	88 ^{bc}	65 ^c	56 ^c	136 ^a	115 ^{ab}	**	21.4	
34	95 ^b	73 ^{bc}	67 ^{bc}	44 ^c	132 ^a	131 ^a	**	18.6	
35	89 ^b	78 ^b	71 ^b	19 ^c	144 ^a	116 ^{ab}	**	30.2	
37	80 ^{ab}	67 ^b	66 ^b	39 ^b	125 ^a	122 ^a	**	28.6	
38	95 ^{bc}	68 ^c	62 ^c	77 ^{bc}	136 ^a	108 ^{ab}	*	21.4	
39	79 ^{bc}	82 ^{bc}	72 ^c	22 ^d	134 ^a	111 ^{ab}	**	23.3	
42	81 ^b	68 ^b	59 ^b	57 ^b	131 ^a	88 ^b	*	23.5	
เฉลี่ย	95 ^{bc}	84 ^{cd}	76 ^d	66 ^d	146 ^a	111 ^b	**	10.3	

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

*, ** = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ตารางภาคผนวกที่ 10 อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบตามยุคาลิปตัส เมื่อเริ่มต้น ($A_{1,000}$ หน่วยเป็น $\mu\text{molC}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ค่าเปรียบเทียบเมื่อสิ้นสุดการปรับ pH และ ค่าเฉลี่ยในช่วงปรับ pH (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น)

วันที่	อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ของใบตาม							P- value	CV (%)
	T1	T2	T3	T4	T5	T6			
17	23.0	28.2	28.4	26.0	18.8	20.8	ns	23.9	
19	166	102	94	104	113	104	ns	43.9	
20	151	100	92	97	114	96	ns	38.6	
21	137	93	86	104	116	100	ns	40.1	
23	151	100	88	92	102	98	ns	45.9	
24	148	96	86	91	105	104	ns	43.3	
25	138	92	79	91	79	97	ns	39.1	
26	120	86	66	79	81	85	ns	35.4	
27	128	86	58	65	93	90	ns	43.5	
28	89	81	47	60	88	84	ns	24.8	
29	93	78	46	47	70	76	ns	44.5	
30	103	76	52	47	75	75	ns	6.0	
32	104	79	54	42	83	89	ns	30.1	
34	83	64	62	16	59	6	ns	73.5	
35	56 ^a	63 ^a	54 ^a	7 ^b	72 ^a	83 ^a	*	38.1	
37	119	66	51	2	88	92	ns	51.1	
38	103 ^a	77 ^{ab}	35 ^{bc}	0 ^c	77 ^{ab}	87 ^{ab}	**	37.5	
39	94	84	38	0	66	74	ns	49.6	
42	61 ^{ab}	66 ^{ab}	37 ^{bc}	10 ^c	89 ^a	75 ^{ab}	*	33.5	
เฉลี่ย	113	88	64	60	88	85	ns	32.8	

ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันที่ตามด้วยอักษรเหมือนกันไม่แตกต่างทางสถิติ โดยวิธี DMRT

* = มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ns = ไม่แตกต่างทางสถิติ

ภาคผนวก ข

ช่วงก่อนทดลองได้ศึกษาระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช จากกรด (pH 5.7) เพิ่มเป็นด่าง (pH 8.5) และจากด่าง (pH 8.5) ที่เติมโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (KHCO_3) ร่วมกับแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ลดลงเป็นกรด (pH 5.7) ในต้นกล้า ยูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่ 1

ศึกษาระยะเวลาในการปรับเปลี่ยน pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชจากกรด (pH 5.7) เพิ่มเป็นด่าง (pH 8.5) ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 4 ตำรับ ตำรับละ 3 ซ้ำ ดังนี้

ตำรับ T1 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชมีค่า pH 5.7 ± 0.3 ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ตลอดเวลาทดลอง

ตำรับ T2 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 5.7 ± 0.3 เป็นเวลา 20 วัน แล้วจึงปรับ pH ให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ภายในเวลา 3 วัน จนสารละลายธาตุอาหารพืชสุดท้ายมี pH เท่ากับ 8.5 ± 0.3 คงที่ pH นี้ไว้จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

ตำรับ T3 ปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชเช่นเดียวกับตำรับ T2 ต่างกันที่เวลาในการปรับค่า pH ให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง คือปรับภายในเวลา 7 วัน

ตำรับ T4 ปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชเช่นเดียวกับตำรับ T2 ต่างกันที่เวลาในการปรับค่า pH ให้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง คือปรับภายในเวลา 10 วัน

กำหนดพารามิเตอร์ที่ศึกษา 5 ประการ ได้แก่ pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในส่วนของราก และใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ประสิทธิภาพการใช้แสง และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ ($A_{1,000}$)

วิธีการ

นำต้นกล้ายูคาลิปตัส คามาลดูเลนซิส จากห้องปฏิบัติการของบริษัทสยามฟอเรสทรี จำกัด ที่เพาะในโรงเรือนเป็นเวลา 3 เดือน ปลูกในกระบะที่ผสมสารละลายธาตุอาหารพืชตามสูตรของ James *et al.* (2002) ซึ่งปรับ pH ตามตำรับการทดลอง และสุ่มเลือกใบคู่ที่ 3 นับจากยอดที่มีอายุประมาณ 18 - 21 วัน เพื่อนำมาศึกษาพารามิเตอร์ดังนี้

1. pH ของสารละลายคั้นจากใบ

นำใบสดบรรจุในท่อพลาสติกอ่อนแล้วคั้นสารละลายจากใบ ด้วยเครื่องคั้นแบบลูกกลิ้ง และวัดค่า pH ของส่วนใสด้วยเครื่อง pH meter (model IQ150 pH meter บริษัท spectrum technologies Inc. USA.)

2. ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในรากและใบ

ศึกษาปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในราก ตามวิธีการของ Brain *et al.* (2002) โดยตัดปลายรากยาวประมาณ 2-3 เซนติเมตร 1-2 ชิ้น ล้างในน้ำกลั่น ซับน้ำให้แห้ง นำไปซั่งมวลด จากนั้นใส่ในหลอดแก้วที่มีสารละลายทดสอบปริมาตร 4 มิลลิลิตร วางตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที หยุดปฏิกิริยาโดยการนำชิ้นส่วนของพืชออก และนำส่วนใสมาอ่านค่าการดูดกลืนแสงที่ 535 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ คำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ค่า extinction coefficient (ϵ) = $22.14 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ สำหรับปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบ ทำโดยเจาะใบขนาด 0.6 ตารางเซนติเมตร ใส่ในหลอดแก้วที่มีสารละลายทดสอบปริมาตร 4 มิลลิลิตร และปฏิบัติตามขั้นตอนเช่นเดียวกับ การทดสอบในราก

3. ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ

สกัดหาปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ โดยนำใบเจาะเป็นแผ่นวงกลมขนาด 0.6 ตารางเซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วที่เติมสารเคมีดีเอ็มเอฟปริมาตร 4 มิลลิลิตร เก็บในที่มืดที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 24 - 48 ชั่วโมง จนคลอโรฟิลล์ถูกสกัดออกจากใบทั้งหมด (แผ่นใบ

จะมีสีเขียวซีด ไม่มีสีเขียวเหลืออยู่) วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย (absorbance, A) ที่ความยาวคลื่น 647 และ 664 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้สารละลายดีเอ็มเอฟบริสุทธิ์ เป็นตัวตั้งค่าที่ศูนย์ ค่าที่ได้นำมาคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวม

4. ประสิทธิภาพการให้แสง

ศึกษาระบบรับแสง PSII ในคลอโรพลาสต์ของใบพืช โดยวัดประสิทธิภาพการให้แสงด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ต่อเข้ากับหัววัดที่เป็นกล่องบรรจุใบแบบ leaf chamber fluorometer โดยเริ่มวัดประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) ในช่วงเวลา 20.00 - 23.00 น. และวัดค่า ϕ_{PSII} ในเวลา 8.00 - 13.00 น. ทุก 1-2 วัน

5. อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

วัดค่า $A_{1,000}$ โดยใช้เครื่องวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สระบบเปิด (รุ่น LI6400-40 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) ที่ต่อกับกล่องบรรจุใบที่ให้แสงและวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ (leaf chamber fluorometer) ไปพร้อมกัน โดยควบคุมสภาพภายในกล่องบรรจุใบให้ ความเข้มแสงเท่ากับ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ปรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ให้คงที่ที่ $400 \mu\text{molCO}_2 \text{mol}^{-1}$ อุณหภูมิของกล่องบรรจุใบให้เท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เป็น 70-75 % วัดในช่วงเวลา 8.00 - 13.00 ทุก 1-2 วัน

ผลการศึกษา

ภาพผนวกที่ 11a แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชตามตำรับ การทดลอง โดยตำรับ T1 มี pH เริ่มต้น 5.7 และปรับรักษาให้คงที่ตลอด จึงมีค่า pH อยู่ที่ 5.7 ± 0.3 ตลอดการทดลอง ตำรับ T2 สารละลายธาตุอาหารพืชมี pH เริ่มต้นเป็น 5.7 ± 0.3 เป็นเวลา 23 วัน จึงค่อยๆ เปลี่ยนเป็น 8.5 ± 0.3 ภายใน 3 วัน อย่างต่อเนื่อง และมีค่า pH นี้ตลอดการทดลอง ตำรับ T3 และตำรับ T4 แสดงผลคล้ายตำรับ T2 คือสารละลายธาตุอาหารพืชมี pH เริ่มต้นเป็น 5.7 ± 0.3 เป็นเวลา 23 วัน แต่ตำรับ T3 ค่า pH เปลี่ยนเป็น 8.5 ± 0.3 ภายใน 7 วัน และตำรับ T4 ค่า pH เปลี่ยนเป็น 8.5 ± 0.3 ภายใน 10 วัน

ภาพผนวกที่ 11b แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายคั้นจากใบตลอดการทดลอง พบว่าตำรับ T1 มีค่าแกว่งขึ้นลงในช่วง 4.4-4.9 ตลอดทั้งการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับอื่นๆ พบว่าทุกตำรับไม่แสดงความแตกต่างกัน และแสดงแนวการเปลี่ยนแปลงในทางเดียวกัน

ภาพผนวกที่ 11c-d แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในรากและใบของยูคาลิปตัสตลอดการทดลอง พบว่าตำรับ T1 มีปริมาณเอนไซม์ในรากอยู่ในช่วง 200 - 400 mU g^{-1} และทุกตำรับแสดงค่าในแนวเดียวกับตำรับ T1 โดยค่าเฉลี่ยของทุกตำรับตลอดการทดลอง คือ 393 mU g^{-1} สำหรับปริมาณเอนไซม์ในใบนั้นก็แสดงผลในทางเดียวกับปริมาณเอนไซม์ในราก คือมีปริมาณเอนไซม์ในใบของทุกตำรับอยู่ในช่วง 500-1,000 mU g^{-1} ซึ่งค่าเฉลี่ยทุกตำรับตลอดการทดลองเป็น 690 mU g^{-1} และยังพบอีกว่าปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในใบมีมากกว่าในรากเป็น 2 เท่า

สรุปได้ว่าต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ควบคุมให้ค่า pH เป็นกรด (5.7) ตลอดการทดลอง กับต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับ pH จากกรด (5.7) เป็นด่าง (8.5) ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วัน แสดงค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริกรีดักเทสในรากและใบของต้นกล้ายูคาลิปตัส ไม่แตกต่างกัน

ภาพผนวกที่ 12a-c แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวม ตลอดจนการทดลอง พบว่าทุกตัวรับมีค่าขึ้นลงตลอดการทดลองใกล้เคียงกัน ซึ่งปริมาณคลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี และคลอโรฟิลล์รวมเฉลี่ยทุกตัวรับตลอดการทดลองเป็น 0.33, 0.13 และ 0.45 g m^{-2} ตามลำดับ โดยตัวรับ T1 มีปริมาณต่ำกว่าตัวรับอื่นๆ จนหลังจากวันที่ 33 จึงกลับมีค่าสูงกว่าทุกตัวรับ สำหรับค่าสัดส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีของทุกตัวรับมีค่าอยู่ในช่วง 2-3 และมีค่าเฉลี่ยรวมเป็น 2.7

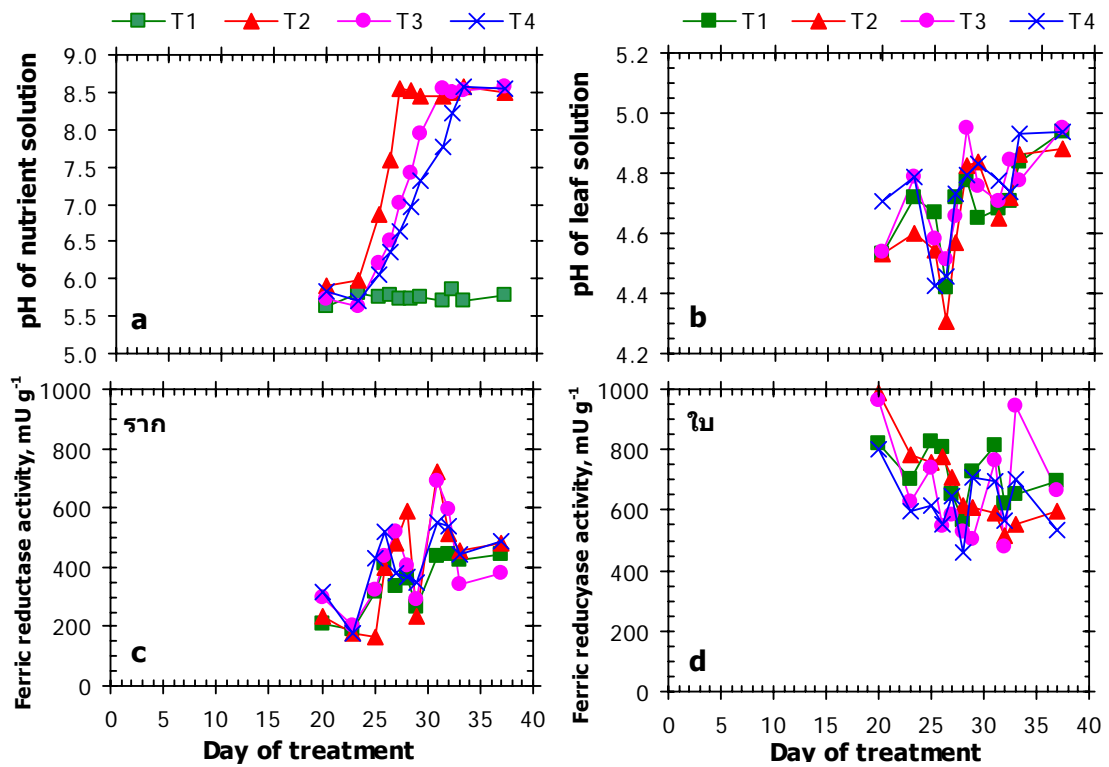
ค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ_{dark}) เป็นค่าสูงสุดของประสิทธิภาพการใช้แสงของใบนั้น ซึ่งภาพผนวกที่ 13a แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า ϕ_{dark} ตลอดการทดลอง พบว่าทุกตัวรับมีค่าอยู่ในช่วง 0.80-0.84 ซึ่งเป็นค่าของใบยูคาลิปตัสปกติ สำหรับค่าประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงคงที่ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ϕ_{PSII}) นั้นเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพการใช้แสงในเวลาที่ใบได้รับแสงอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งค่าที่แสดงมีแนวการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันในทุกตัวรับ เช่นเดียวกับค่า ϕ_{dark} และ T1 มีค่าต่ำกว่าทุกตัวรับ (ภาพผนวกที่ 13b) เมื่อพิจารณาค่าอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) พบว่าในทุกตัวรับแสดงการเปลี่ยนแปลงตามกัน โดยค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ $175 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เมื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ดังภาพผนวกที่ 13c-d จะได้ความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงและทุกตัวรับไม่แสดงความแตกต่างกันเด่นชัด จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง PSII ของต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ pH เป็นกรด (5.7) กับต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับ pH จากกรด (5.7) เป็นด่าง (8.5) ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วัน มีค่าของใบปกติ และการปรับค่า pH ในสารละลายภายในเวลาที่ต่างกัน ไม่แสดงค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ_{dark} และ ϕ_{PSII}) ที่แตกต่างกัน

ภาพผนวกที่ 14a-f แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ตลอดช่วงทดลอง ขณะที่ใบได้รับความเข้มแสง $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และอยู่ในสภาพที่อำนวยความสะดวกเปิดปากใบอย่างเต็มที่ พบว่าทุกพารามิเตอร์ของตัวรับ T1 และตัวรับอื่นๆ แสดงแนวการเปลี่ยนแปลงในทางเดียวกันตลอดการทดลอง โดยค่าน้ำไหลปากใบ (gs) มีค่าอยู่ในช่วง $500 - 850 \text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ค่าอัตราคายน้ำ (E) แกว่งขึ้นลงในช่วง $4.0 - 8.2 \text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ อุณหภูมิใบ (T_{leaf}) อยู่ในช่วง 26-31 องศาเซลเซียส ค่าแรงดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{leaf-air}}$) มีค่า 0.7-1.4 kPa ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ส่วนใหญ่ของทุกตัวรับมีค่าในช่วง

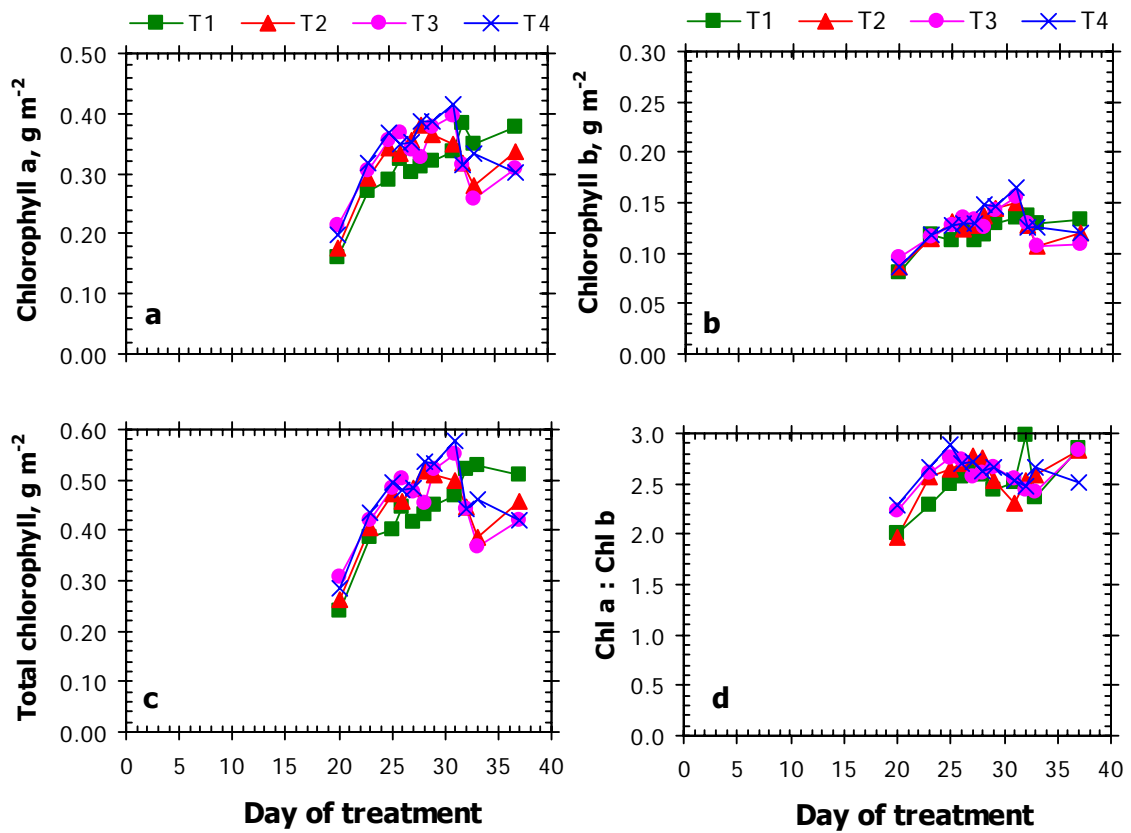
22-30 $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ สุดท้ายคือค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) พบว่ามีค่าในช่วง 2-8 $\mu\text{molCO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) กับปัจจัยควบคุม (ภาพผนวกที่ 15a-d) พบว่าค่านำไหลปากใบและอัตราคายน้ำที่สูง อุณหภูมิใบกับแรงดึงคายน้ำที่ต่ำ ทำให้ค่า $A_{1,000}$ สูง และไม่พบว่ามีค่าต่างกันในช่วงดาร์บ

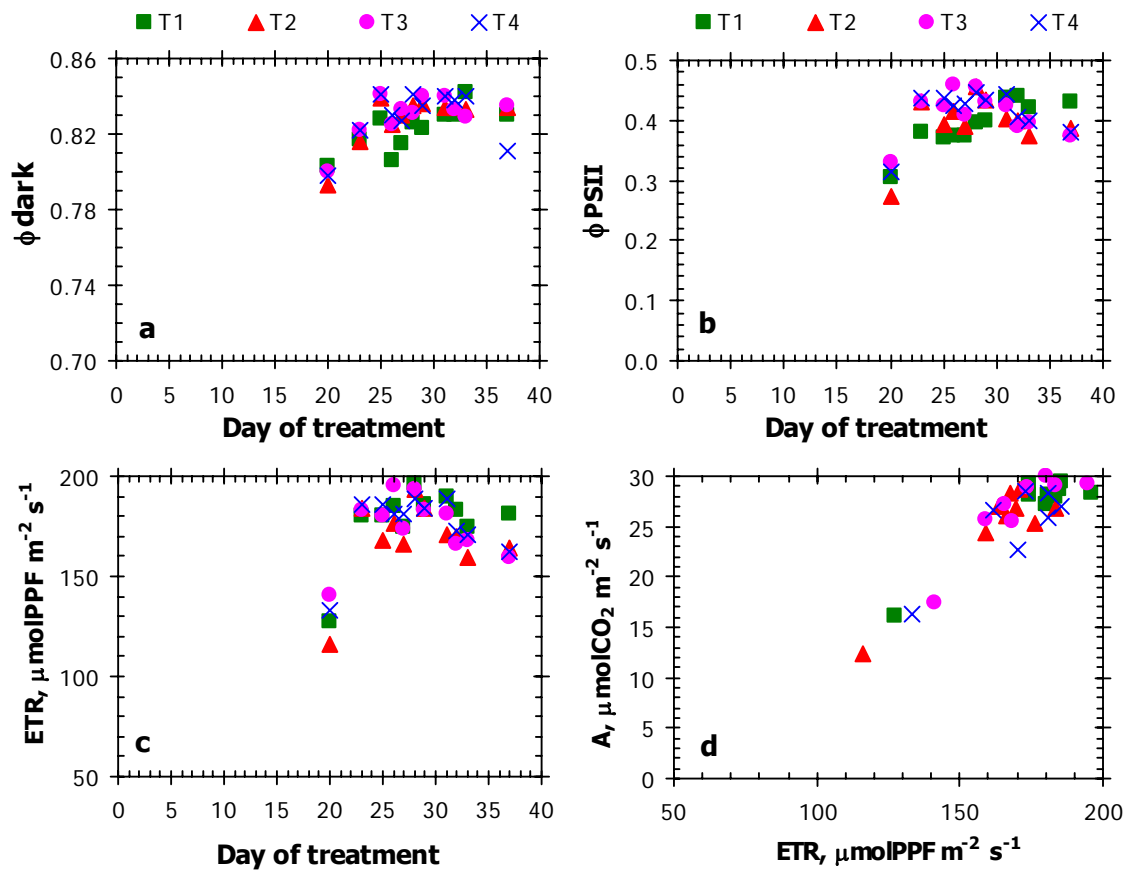
สรุปว่าการเลี้ยงต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับ pH เป็นกรด (5.7) กับต้นกล้ายูคาลิปตัสที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับ pH จากกรด (5.7) เป็นด่าง (8.5) ที่ปรับด้วย KOH ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วัน อย่างต่อเนื่องนั้นค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอร์ริคติกเทสในใบและราก ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม ประสิทธิภาพการใช้น้ำของระบบรับแสง PSII และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของต้นกล้ายูคาลิปตัส แสดงค่าในแนวเดียวกัน จึงกล่าวได้ว่าเวลาในการปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ปรับด้วย KOH ในเวลา 3, 7 และ 10 วัน ไม่แสดงความแตกต่างกันเด่นชัดในแต่ละพารามิเตอร์ที่ศึกษา และให้ผลแนวเดียวกับต้นกล้า ยูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่ pH เป็นกรด (5.7)



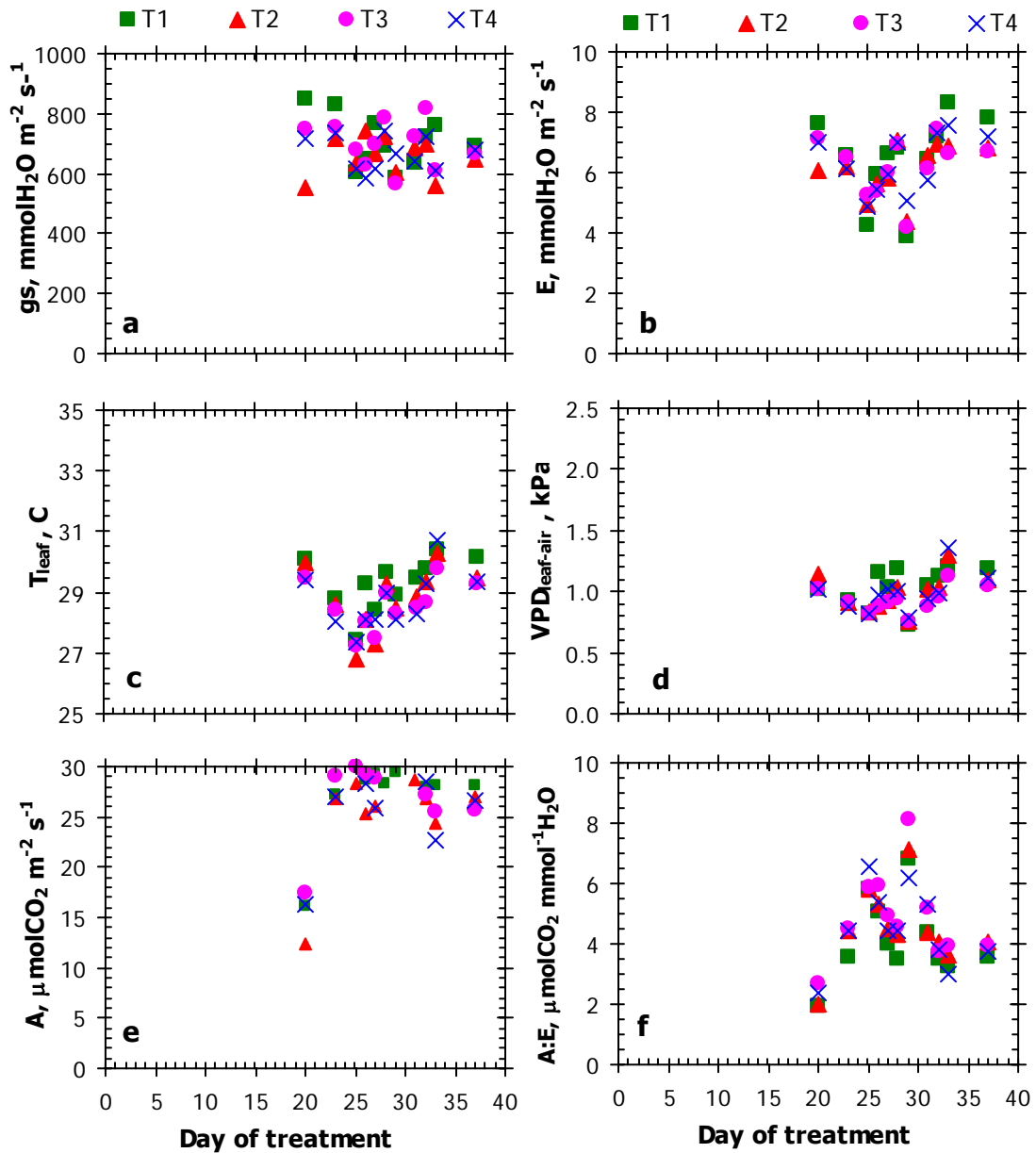
ภาพผนวกที่ 11 a) ค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช b) ค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ และปริมาณเอนไซม์เฟอริกเรดักเทสใน c) ราก และ d) ใบของต้นกล้วยคา ลิปัตส์



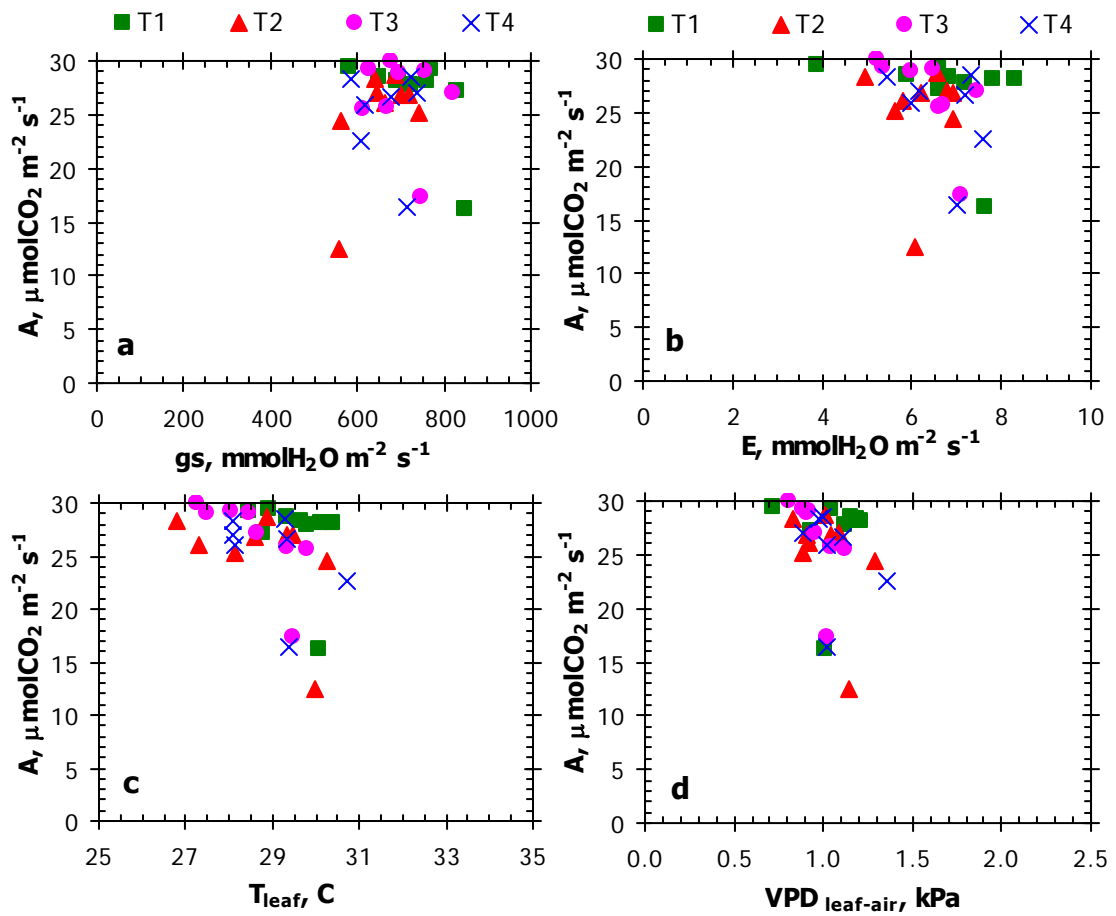
ภาพผนวกที่ 12 a) คลอโรฟิลล์เอ b) คลอโรฟิลล์บี c) คลอโรฟิลล์รวม และ d) สัดส่วน
คลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีของใบยูคาลิปตัส



ภาพผนวกที่ 13 a) ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) b) ประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบได้รับความเข้มแสงคงที่ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ϕ_{PSII}) c) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) และ d) ความสัมพันธ์ของอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ของใบยูคาลิปตัส



ภาพผนวกที่ 14 ปัจจัยที่สัมพันธ์กับค่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดที่ความเข้มแสง 1,000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ d) แรงดึงคายน้ำ e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำของใบยูคาลิปตัส



ภาพผนวกที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) กับปัจจัยควบคุมเมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำของใบยูคาลิปตัส

การทดลองที่ 2

ศึกษาระยะเวลาในการปรับเปลี่ยนค่า pH ของสารละลายต่าง (pH 8.5) ที่เติม KHCO_3 ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ร่วมกับ CaCO_3 ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ที่ลดลงเป็นกรด (pH 5.7) ในต้นกล้ายูคาลิปตัส วางแผนการทดลองแบบ CRD มี 4 ตำรับ ตำรับละ 3 ซ้ำ

ตำรับ T1 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชที่เติม KHCO_3 ร่วมกับ CaCO_3 ให้มี pH 8.5 ± 0.3 ตลอดเวลาทดลอง

ตำรับ T2 ปรับให้สารละลายธาตุอาหารพืชที่เติม KHCO_3 ร่วมกับ CaCO_3 ให้มี pH เริ่มต้นเท่ากับ 8.5 ± 0.3 นาน 20 วัน แล้วจึงปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชให้ลดลงอย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ภายในเวลา 3 วัน จนสารละลายธาตุอาหารพืชสุดท้ายมี pH เท่ากับ 5.7 ± 0.3 คงที่ pH นี้ จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

ตำรับ T3 ปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชเช่นเดียวกับตำรับ T2 ต่างกันที่เวลาในการปรับค่า pH ให้ลดลงอย่างต่อเนื่อง คือปรับภายในเวลา 7 วัน

ตำรับ T4 ปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชเช่นเดียวกับตำรับ T2 ต่างกันที่เวลาในการปรับค่า pH ให้ลดลงอย่างต่อเนื่อง คือปรับภายในเวลา 10 วัน

กำหนดพารามิเตอร์ที่ศึกษา 5 ประการ ได้แก่ pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณ เอนไซม์เพอริกรีดักเทสในส่วนของราก และใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ ประสิทธิภาพการใช้แสง และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$)

วิธีการ

นำต้นกล้วยคาลิปัตส์ คามาลดูเลนซิส จากห้องปฏิบัติการของบริษัทสยามฟอเรสทรี จำกัด ที่เพาะในโรงเรือนเป็นเวลา 2 เดือน ปลูกในกระบะที่ผสมสารละลายธาตุอาหารพืชตามสูตรของ James *et al.* (2002) ซึ่งปรับ pH ตามตำรับการทดลอง และสุ่มเลือกใบคู่ที่ 3 นับจากยอดที่มีอายุประมาณ 17 - 20 วัน เพื่อศึกษาพารามิเตอร์เดียวกันกับการทดลองที่ 1 และมีวิธีการทดลองทำเหมือนกัน ยกเว้นการวัดค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบที่ใช้เครื่อง pH meter รุ่น candy twin pH meter (บริษัท Spectrum Technologies ประเทศสหรัฐอเมริกา) ในการวัด

ผลการศึกษา

ภาพผนวกที่ 16a แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชตามตำรับการทดลอง โดยตำรับ T1 pH เริ่มต้น 8.5 และปรับรักษาให้คงที่ตลอด จึงมีค่า pH อยู่ที่ 8.5 ± 0.3 ตลอดการทดลอง ตำรับ T2 สารละลายธาตุอาหารพืชแสดงค่า pH เป็น 8.5 ± 0.3 เป็นเวลา 20 วัน จึงค่อยๆ ลดลงเป็น 5.7 ± 0.3 ในเวลา 3 วัน อย่างต่อเนื่องและคงค่า pH นี้ตลอดการทดลอง ตำรับ T3 และตำรับ T4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชเช่นเดียวกับตำรับ T2 แต่ต่างกันที่ตำรับ T3 ค่า pH เปลี่ยนเป็น 5.7 ± 0.3 ภายใน 7 วัน และตำรับ T4 ค่า pH เปลี่ยนเป็น 5.7 ± 0.3 ภายใน 10 วัน

ภาพผนวกที่ 16b แสดงค่าการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายคั้นจากใบตลอดการทดลอง พบว่าตำรับ T1 (รักษา pH ที่ 8.5) มีค่าแกว่งขึ้นลงในช่วง 4.4 - 4.9 ตลอดทั้งการทดลอง และเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับอื่นๆ พบว่าทุกตำรับแสดงแนวการเปลี่ยนแปลงในทางเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยตลอดช่วงของทุกตำรับมีค่า 4.9

ภาพผนวกที่ 16c-d แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณเอนไซม์เพอริกวีตักเทสในรากและใบของกล้วยคาลิปัตส์ตลอดการทดลอง พบว่าแต่ละตำรับมีการเปลี่ยนแปลงในแนวเดียวกันตลอดการทดลอง คือค่าแกว่งในช่วง $400-1,200 \text{ mU g}^{-1}$ และค่าเฉลี่ยตลอดช่วงทดลองเท่ากับ 673 mU g^{-1} สำหรับปริมาณเอนไซม์ในใบนั้นก็แสดงผลในทางเดียวกันทุกตำรับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละ

ตำรับ โดยมีค่าผันแปรในช่วง 400-1,900 mU g^{-1} และค่าเฉลี่ยทุกตำรับตลอดช่วงทดลองมีค่า 1,366 mU g^{-1} อีกทั้งยังพบว่าปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในใบมีสูงกว่าในรากถึง 2 เท่า

สรุปได้ว่าต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโบคาร์บอนต์ที่มีค่า pH เป็นต่าง (8.5) จะทำให้ pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในรากและใบของต้นกล้ายูคาลิปตัส ไม่แตกต่างกับต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีโบคาร์บอนต์และปรับ pH จากต่าง (8.5) เป็นกรด (5.7) ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วัน

ภาพผนวกที่ 17a-c แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ บี และคลอโรฟิลล์รวม ในช่วงทดลอง พบว่าทุกตำรับแสดงค่าในระดับต่ำ คือปริมาณคลอโรฟิลล์เอมีค่าในช่วง 0.06 - 0.14 g m^{-2} ตลอดการทดลอง ขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์บีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกตำรับ คือมีค่าในช่วง 0.03 - 0.15 g m^{-2} ส่งผลให้คลอโรฟิลล์รวมของทุกตำรับมีค่าแกว่งในช่วง 0.09 - 0.26 g m^{-2} ซึ่งจากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างระหว่างตำรับ สำหรับค่าสัดส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีของทุกตำรับมีค่าอยู่ในช่วง 0.7 - 2.7 และค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 1.2 เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าปกติของพืชที่มีค่าประมาณ 3 ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณคลอโรฟิลล์เอในทุกตำรับแสดงค่าต่ำ

ภาพผนวกที่ 18a แสดงค่าประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) ตลอดช่วงทดลอง ซึ่งค่า ϕ_{dark} เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นกับระบบทำงานของ PSII โดยค่าของใบยูคาลิปตัสปกติอยู่ในช่วง 0.80-0.84 และผลที่ได้พบว่าทุกตำรับมีค่าอยู่ในช่วง 0.68 - 0.81 ส่วนค่าเฉลี่ยตลอดช่วงเท่ากับ 0.76 ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าค่าปกติ และตำรับ T1 (pH เป็นต่าง (8.5) แสดงแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ตำรับ T2 (pH จากต่าง (8.5) เปลี่ยนเป็นกรด (5.7) ภายใน 3 วัน) มีแนวโน้มสูงขึ้นหลังจากปรับ pH เป็นกรดแล้วในวันที่ 26

ค่าประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ใบใบได้รับความเข้มแสงคงที่ 1,000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (ϕ_{PSII}) เป็นค่าที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการใช้แสงในเวลาที่ใบได้รับแสงอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งค่าที่แสดงมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคล้ายกันในทุกตำรับเช่นเดียวกับค่า ϕ_{dark} คือมีค่าอยู่ในช่วง 0.13 - 0.30 และตำรับ T1 แสดงค่าต่ำกว่าทุกตำรับ (ภาพผนวกที่ 18b) เมื่อพิจารณาค่าอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) พบว่าในทุกตำรับแสดงการเปลี่ยนแปลงตามกัน โดยค่าส่วนใหญ่อยู่ที่ 82

$\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ เมื่อหาความสัมพันธ์กับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ดังภาพผนวกที่ 18d จะได้ความสัมพันธ์เกือบเป็นเส้นตรงในทุกตำรับ และตำรับ T1 มีค่าในระดับต่ำกว่าตำรับอื่น ส่วนตำรับ T2 แสดงค่าในระดับสูงกว่าทุกตำรับ ทำให้สรุปได้ว่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง PSII ของต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชร่วมกับไบคาร์บอเนตที่ปรับ pH เป็นด่าง (8.5) กับต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีไบคาร์บอเนตและปรับ pH จากด่าง (8.5) เป็นกรด (5.7) ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วัน แสดงค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (ϕ_{dark} และ ϕ_{PSII}) ของใบต่ำกว่าปกติ และเวลาที่ใช้ปรับค่า pH ภายใน 3 วัน แสดงค่าในแนวเพิ่มขึ้น

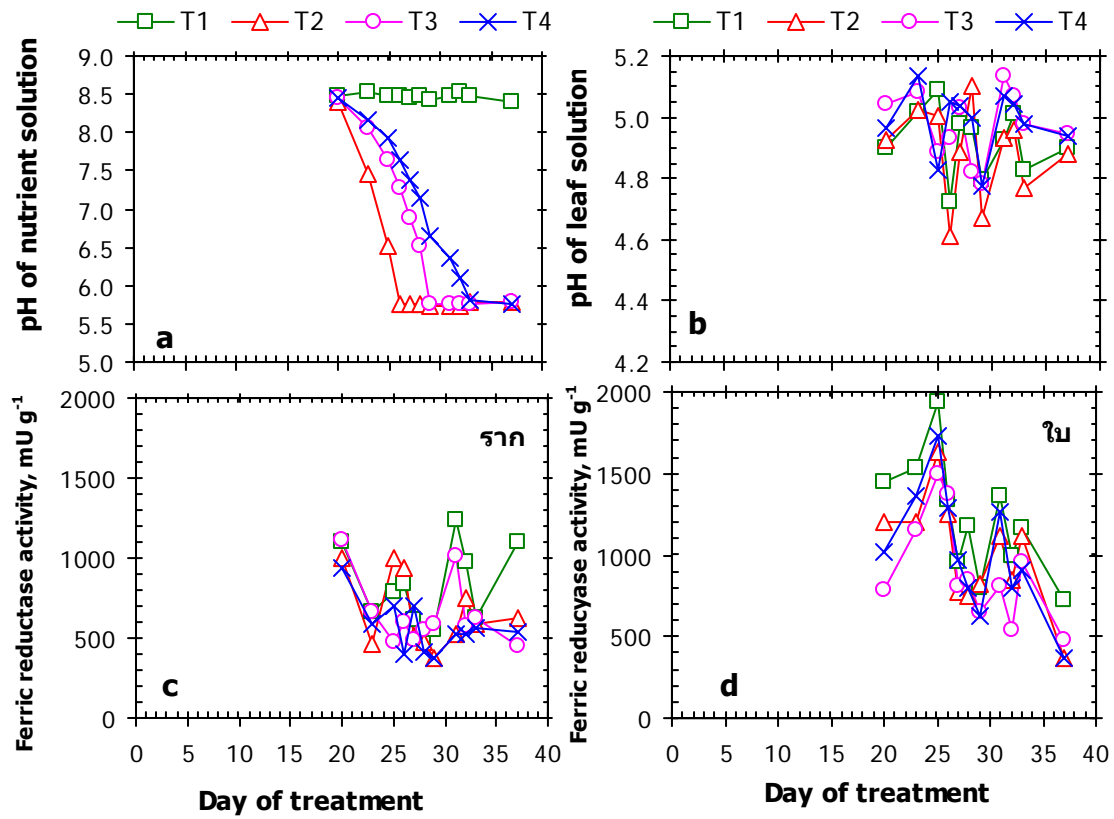
ภาพผนวกที่ 19a – f แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) ตลอดช่วงทดลอง ขณะที่ใบได้รับความเข้มแสง $1,000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ และอยู่ในสภาพที่อำนวยความสะดวกเปิดปากใบเต็มที่ พบว่าทุกตำรับแสดงแต่ละพารามิเตอร์ในแนวเดียวกันตลอดการทดลอง โดยค่าน้ำไหลปากใบ (gs) มีค่าอยู่ในช่วง $96 - 335 \text{ mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ค่าอัตราคายน้ำ (E) แกว่งขึ้นลงในช่วง $1.8 - 4.6 \text{ mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ อุณหภูมิใบ (T_{leaf}) อยู่ในช่วง 31-34 องศาเซลเซียส ค่าแรงดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{leaf-air}}$) มีค่า $1.3 - 2.0 \text{ kPa}$ ทำให้ค่า $A_{1,000}$ ของทุกตำรับอยู่ในช่วง $3.9 - 14.6 \mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ สุดท้ายค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำ (A:E) ที่ค่าส่วนใหญ่อยู่ในช่วง $1.8 - 4.4 \mu\text{molCO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด ($A_{1,000}$) กับปัจจัยควบคุม (ภาพผนวกที่ 20a-d) พบว่าค่าน้ำไหลปากใบและอัตราคายน้ำมีระดับต่ำ กับอุณหภูมิใบและแรงดึงคายน้ำที่สูง ส่งผลต่อค่า $A_{1,000}$ ที่ต่ำ โดยเฉพาะตำรับ T1 และทุกตำรับแสดงการเปลี่ยนแปลงแนวเดียวกัน

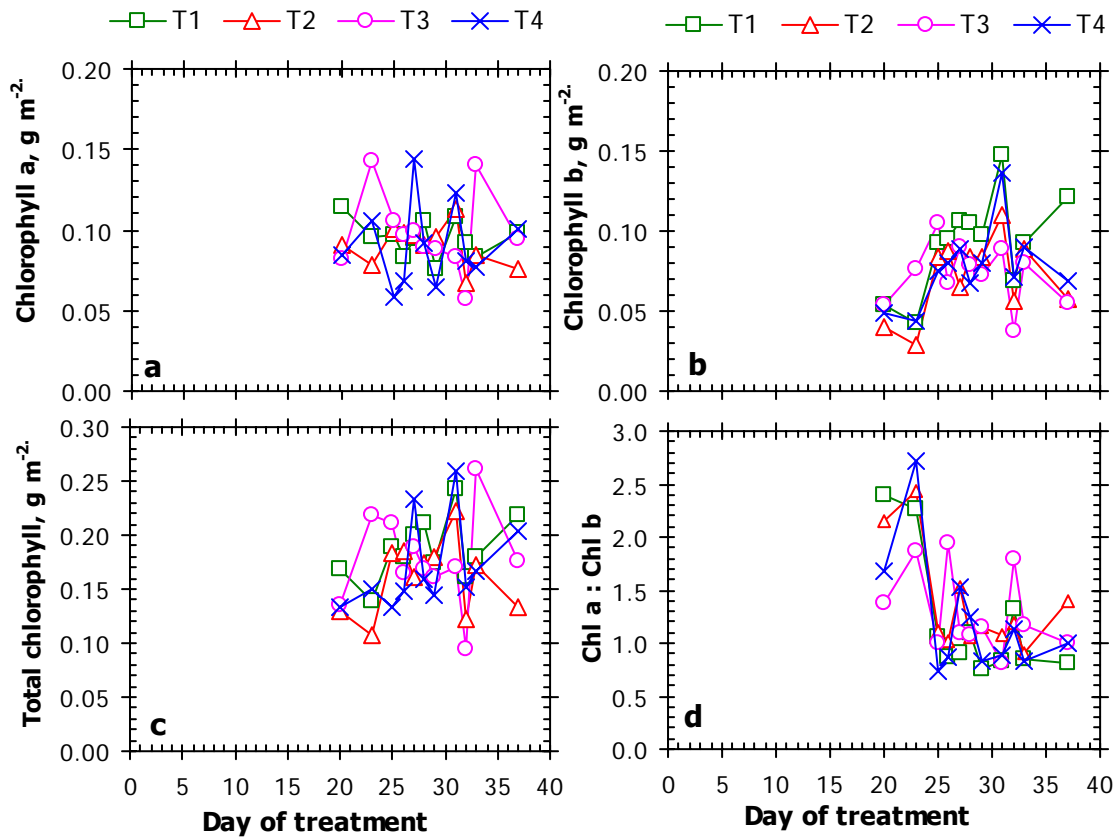
สรุปว่าการเลี้ยงต้นกล้ายูคาลิปตัสในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีไบคาร์บอเนตแล้วปรับรักษา pH เป็นด่าง (8.5) กับต้นกล้ายูคาลิปตัสที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีไบคาร์บอเนตที่มี pH จากด่าง (8.5) แล้วปรับเป็นกรด (5.7) ด้วย HCl ภายในเวลา 3, 7 และ 10 วันอย่างต่อเนื่อง แสดงค่า pH ของสารละลายคั้นจากใบ ปริมาณเอนไซม์เพอริรีดักเทสในใบและราก ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม ในแนวเดียวกัน สำหรับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง PSII และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของต้นกล้ายูคาลิปตัส พบว่าเมื่อปรับ pH จากด่างเป็น

กรดภายใน 3 วัน ไบยูคาลิปตัสแสดงค่าสูงกว่าตำรับอื่น โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับใบของต้นกล้าที่เลี้ยงในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีไบคาร์บอเนตแล้วปรับรักษา pH เป็นด่าง ที่แสดงค่าต่ำกว่าทุกตำรับ จึงกล่าวได้เมื่อปรับ pH ในสารละลายธาตุอาหารพืชในเวลา 3 วัน ระบบรับแสง PSII แสดงแนวการปรับตัวที่ดีขึ้นจากค่าที่สูงขึ้น และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของต้นกล้ายูคาลิปตัสมีค่าสูงขึ้นจากปากใบที่เปิดกว้างขึ้น

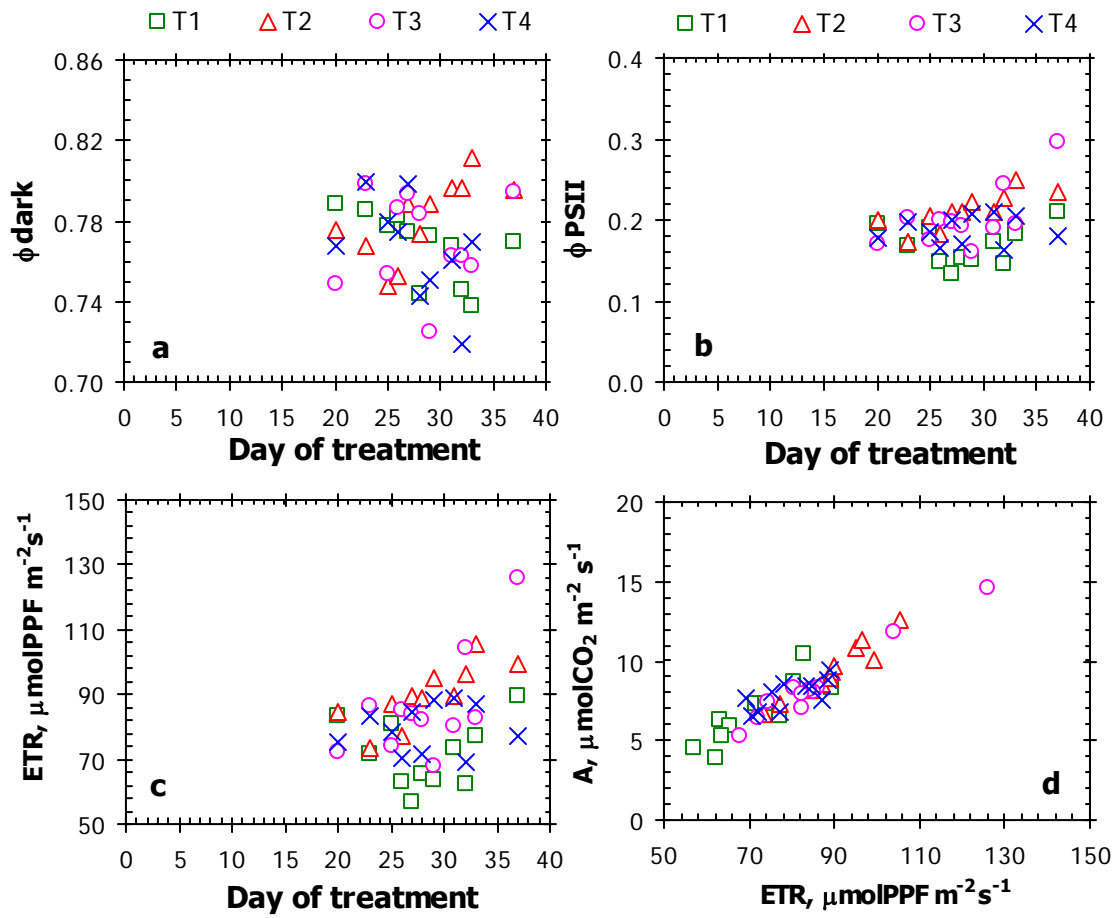
จากผลการศึกษาทั้ง 2 การทดลองในภาคผนวกถูกนำมาปรับใช้กับการทดลองข้างต้น คือ ใช้การปรับ pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชจากกรด (5.7) เป็นด่าง (8.5) ภายในเวลา 3 วัน เนื่องจากพบว่าเวลาที่ใช้ปรับ pH จากกรดเป็นด่างที่ 3, 7 และ 10 วัน แสดงค่าในแนวเดียวกัน (การทดลองที่ 1) ก็กับการปรับ pH ของสารละลายธาตุอาหารพืชที่เติม KHCO_3 ร่วมกับ CaCO_3 จากด่าง (8.5) เป็นกรด (5.7) ภายในเวลา 3 วัน จากผลที่ว่าประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสง PSII และอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิของต้นกล้ายูคาลิปตัส แสดงแนวการปรับตัวที่ดีขึ้นกว่าตำรับอื่นๆ (การทดลองที่ 2)



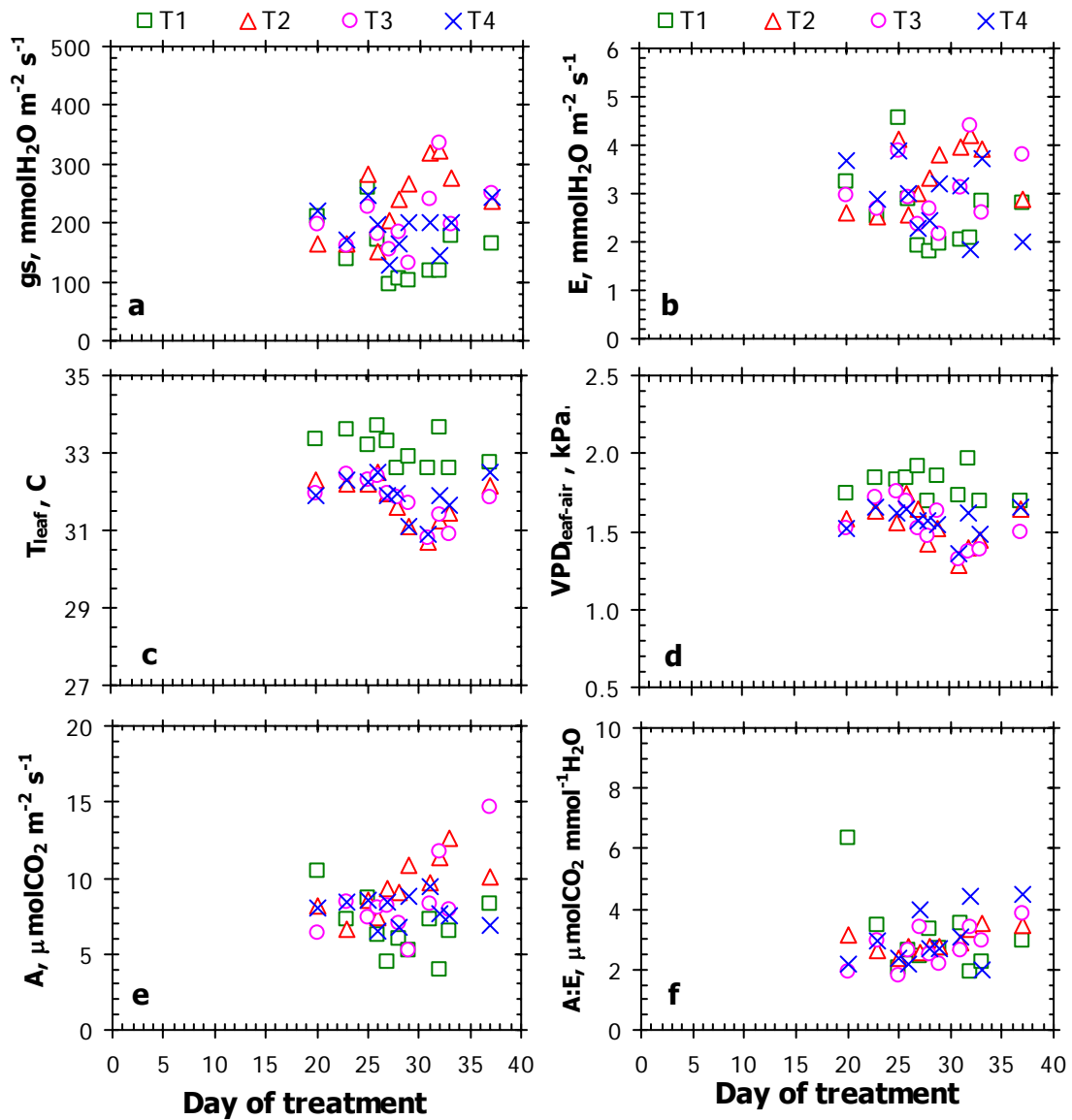
ภาพผนวกที่ 16 a) pH ของสารละลายธาตุอาหารพืช b) pH ของสารละลายคั้นจากใบ และ ปริมาณเอนไซม์เฟอริกรีดักเตส c) ใบ และ d) ราก ของยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง



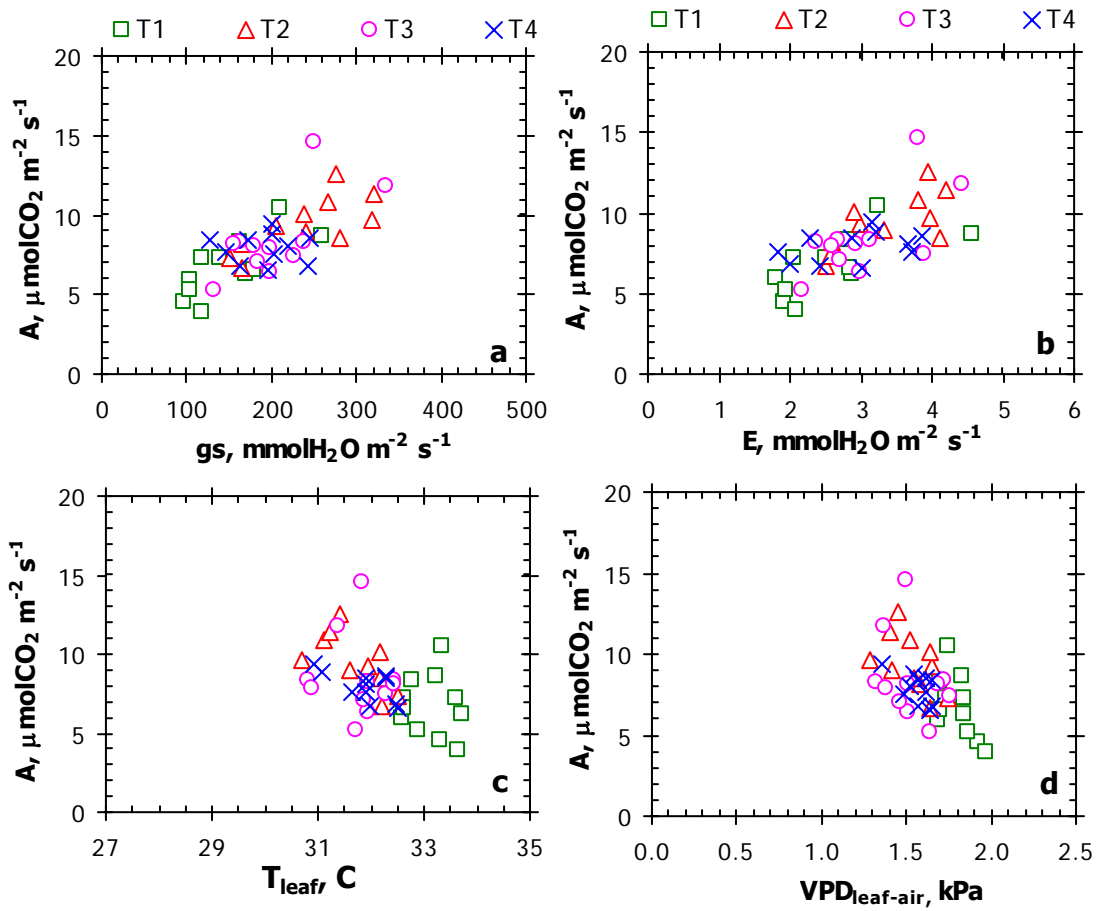
ภาพผนวกที่ 17 a) ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ b) ปริมาณคลอโรฟิลล์บี c) ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และ d) สัดส่วนคลอโรฟิลล์เอต่อคลอโรฟิลล์บีของใบยูคาลิปตัสในช่วงทดลอง



ภาพผนวกที่ 18 a) ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุด (ϕ_{dark}) b) ประสิทธิภาพการใช้แสงขณะที่ในใบได้รับความเข้มแสงคงที่ $1,000 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ c) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) และ d) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนกับอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดของใบยุคคาลิปตัล



ภาพผนวกที่ 19 ปัจจัยที่สัมพันธ์กับค่าอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดที่ความเข้มแสง 1,000 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ d) แรงดึงคายน้ำ e) อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุด และ f) ประสิทธิภาพการใช้น้ำของใบยูคาลิปตัส



ภาพผนวกที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิสูงสุดกับปัจจัยควบคุม เมื่อ a) ค่าน้ำไหลปากใบ b) อัตราคายน้ำ c) อุณหภูมิใบ และ d) แรงดึงคายน้ำของใบ ยูคาลิปตัส