วิทยานิพนธ์

อิทธิพลของก๊าซโอโซน ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง

EFFECTS OF OZONE ON LEAF GAS EXCHANGE OF MUNGBEAN, SOYBEAN AND GROUNDNUT

นางสาววิชุดา วงษ์ประเสริฐ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)

ปริญญา

พืชไร่นา	พืชไร่นา
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง อิทธิพลของก๊าซโอโซน ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง

Effects of Ozone on Leaf Gas Exchange of Mungbean, Soybean and Groundnut

นามผู้วิจัย นางสาววิชุดา วงษ์ประเสริฐ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์พูนพิภพ เกษมทรัพย์, Ph.D.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์เอ็จ สโรบล, Ph.D.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์กุมุท สังขศิลา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(รองศาสตราจารย์สนธิชัย จันทร์เปรม, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... **เดือน** ..... **พ.ศ.** .....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของก๊าซโอโซน ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง

Effects of Ozone on Leaf Gas Exchange of Mungbean, Soybean and Groundnut

โดย

นางสาววิชุดา วงษ์ประเสริฐ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)
พ.ศ. 2551

วิชุดา วงษ์ประเสริฐ 2551: อิทธิพลของก๊าซโอโซน ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาพืชไร่นา ภาควิชาพืชไร่นา ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์พูนพิภพ เกษมทรัพย์, Ph.D. 95 หน้า

ศึกษาอิทธิพลของก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้นประมาณ 200 ppb เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบถั่ว 3 ชนิด คือ ถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง โดยวัดการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิด้วย portable photosynthesis system รุ่น Li 6400 ผลการศึกษา พบว่า O_3 มีอิทธิพลต่อการตอบสนองต่อแสงสุทธิของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด โดยระดับของอิทธิพลของ O_3 ขึ้นอยู่กับทั้งชนิดถั่ว และระยะเวลาความยาวนานที่ได้รับ O_3 ในภาพรวม O_3 สามารถทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบลดน้อยลง ทำให้อัตราการหายใจในที่มืดเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้ค่าความชันเริ่มต้นของการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง LSP และ θ เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ทำให้ LCP เปลี่ยนแปลงเฉพาะในใบถั่วเหลืองและถั่วลิสงเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่า O_3 มีอิทธิพลต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด โดยระดับของอิทธิพลของ O_3 ขึ้นอยู่กับทั้งชนิดถั่ว และระยะเวลาความยาวนานที่ได้รับ O_3 ในภาพรวม O_3 สามารถทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่ความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm และ 1,400 ppm ลดน้อยลง และพบการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 compensation point เฉพาะในใบถั่วเขียวและถั่วลิสงเท่านั้น และพบว่า O_3 มีอิทธิพลทำให้ใบถั่วเกิดอาการเสียหายโดยมีจุดประสีเหลืองหรือสีน้ำตาลเข้มบนแผ่นใบและสามารถพบอาการที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนในใบถั่วที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Wichuda Wongprasert 2008: Effects of Ozone on Leaf Gas Exchange of Mungbean, Soybean and Groundnut. Master of Science (Agriculture), Major Field: Agronomy, Department of Agronomy. Thesis Advisor: Associate Professor Poonpipope Kasemsap, Ph.D. 95 pages.

The experiment aimed to investigate the effect of 200 ppb ozone at 2, 4 or 6 hours on photosynthetic gas exchange rates of mungbean, soybean and groundnut leaves. Single leaf photosynthetic rates were measured using portable photosynthesis system model Li 6400. The result showed that O_3 influenced the response of single leaf net photosynthesis rates to light in all three species studied. The effects of O_3 depended on species and duration of O_3 exposure. In general, O_3 reduced single leaf net photosynthesis rates and increased leaf respiration rates. Ozone did not influenced the initial slope of photosynthetic light response at low light level or convexity of the light response curve while it caused changes in light compensation points only in soybean and groundnut. In addition, it was found that O_3 influenced the response of single leaf net photosynthesis rates to ambient carbondioxide concentration in all three species studied. The effects of O_3 also depended on species and duration of O_3 exposure. In general, O_3 caused single leaf net photosynthesis rates at 400 and 1,400 ppm CO_2 to decrease. Ozone caused changes in CO_2 compensation points only in mungbean and groundnut. Finally, O_3 caused damages to leaf blade in all three species studied. Necrosis on leaf surface was more severe when ozone exposure increased with the most severe symptom found in leaves that received 6 hours exposure.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงของ รองศาสตราจารย์ ดร.พูนพิภพ เกษมทรัพย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำข้อคิดดีงาม แนวทางแก้ไขวิทยานิพนธ์ และสนับสนุนเงินทุนตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร.เอ็จ สโรบล กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร.กุมุท สังขศิลา กรรมการวิชารอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฏฐ พิชกรรม ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจทานวิทยานิพนธ์เพื่อให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น จึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ทุกคน ทั้งภาควิชาพืชไร่นา พืชสวน และปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งให้คำแนะนำ ข้อคิดดี ๆ ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดมา ขอบคุณ คุณมงคล กิจตระกูลรัตน์ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหา และให้การช่วยเหลือสนับสนุนเป็นกำลังใจที่สำคัญ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ญาติพี่น้องทุกท่าน ที่มอบความรัก คอยอบรมสั่งสอน ให้แนวคิด สติปัญญา การสนับสนุนทางด้านการศึกษา ดูแลสุขภาพ ให้กำลังใจ และเป็นแรงผลักดันในการดำเนินชีวิตด้วยดีตลอดมา สุดท้ายนี้ประโยชน์อันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะพึงมีเพียงใด ขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้ความรู้จนถึงปัจจุบันนี้

วิชุดา วงษ์ประเสริฐ

พฤษภาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	19
ผลและวิจารณ์	26
สรุปและข้อเสนอแนะ	79
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	81
ภาคผนวก	88

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดบริเวณพื้นที่ทั่วไปในกรุงเทพมหานคร แยกตามสถานี ปี 2549	7
2	คุณภาพอากาศในเขตปริมณฑลแยกตามสถานี ปี 2549	8
3	คุณภาพอากาศในพื้นที่ต่างจังหวัดแยกตามรายสถานี ปี 2549	9
4	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	34
5	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	34
6	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	35
7	ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	44
8	ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	44
9	ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	45
10	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง	48

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
11	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง	49
12	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง	49
13	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง	50
14	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง	50
15	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง	51
16	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง	51
17	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง	52
18	ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง	52

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
19	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	56
20	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	59
21	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	62
22	ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	71
23	ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	71
24	ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเขียว	89
2	ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง	90
3	ระยะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง	91

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปริมาณก๊าซโอโซนใน chamber อากาศปกติ และใน chamber ที่เพิ่มก๊าซโอโซน	26
2	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	28
3	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	29
4	อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	30
5	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	37
6	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	38
7	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	39
8	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

9 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 41

10 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 42

11 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 55

12 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 58

13 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 61

14 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 65

15 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 66

16 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

17 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 68

18 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 69

19 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้น CO_2 0-200 ppm เพื่อหาค่า CO_2 compensation point ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 70

20 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 73

21 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 74

22 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 75

23 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 76

24 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 77

25 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ที่ 24 ชั่วโมง ภายหลังได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง 78

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	โอโซนผิวพื้นจากสถานี Montsouris (M) และ Pic du Midi (D) สำหรับ 50 ปีหลังของศตวรรษที่ 19 น้อยกว่าครึ่งของปลายศตวรรษที่ 20 ซึ่งวัดที่สถานี Hohenpeissenberg (HP) Arkona (A) Zugspitze (Z) และ Pic du Midi (D)	92
2	การให้ต้นถั่วได้รับอากาศปกติ และ O_3 ใน chamber ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร คลุมด้วยพลาสติกใสทำจาก acrylic plastic และ polypropylene	92
3	เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator-รุ่น Sunny, K-Link (Thailand) Co., Ltd., Thailand) และการผสมอากาศ	93
4	เครื่องวัดปริมาณก๊าซโอโซนในอากาศ (UV Absorption Ozone Analyzer-Model 400A, Teledyne Technologies Company, U.S.A)	93
5	วิธีการให้อากาศปกติ และก๊าซโอโซน (O_3) กับต้นถั่วแต่ละชนิด	94
6	เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (Portable Photosynthesis System รุ่น LI-6400 LI-COR, lnc., U.S.A)	95
7	CO_2 tank ที่ใช้ในการกำหนดความเข้มข้นของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	95

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ppb	=	หนึ่งส่วนในพันล้านส่วน หรือ 1/1,000,000,000 มีหน่วย ηmol/mol
ppm	=	หนึ่งส่วนในล้านส่วน หรือ 1/1,000,000 มีหน่วยเป็น μmol/mol
PAR	=	Photosynthetically Active Radiation
$P_{observed}$	=	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ได้จากการวัดจริง
P_{model}	=	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola
P_n	=	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ
θ	=	ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ
P_{max}	=	ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิสูงสุด
R_d	=	ค่าอัตราการหายใจในที่มืด
LCP	=	Light compensation point
LSP	=	Light saturation point

อิทธิพลของก๊าซโอโซน ต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง

Effects of Ozone on Leaf Gas Exchange of Mungbean, Soybean and Groundnut

คำนำ

ปัจจุบันปรากฏการณ์โลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดจากปริมาณก๊าซเรือนกระจกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก๊าซเหล่านี้เกิดขึ้นเพราะความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวในภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้เกิดปัญหามลพิษทางอากาศแพร่กระจาย และยังเพิ่มความรุนแรงมากขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2544) ส่งผลให้ปริมาณก๊าซที่เป็นองค์ประกอบในอากาศเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์ และการเกษตร พืชและมลพิษทางอากาศมีความสัมพันธ์กันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น การแลกเปลี่ยนมลพิษต่างๆ กับเรือนพุ่ม การดูดซับมลพิษต่างๆ และผลกระทบของมลพิษต่อการเจริญเติบโต การพัฒนาการต่างๆ ของพืช (อรอุมา, 2548)

ก๊าซโอโซน จัดอยู่ในพวก photochemical ซึ่งเป็นมลพิษกลุ่มชนิดหนึ่ง จากทั้งหมด 7 กลุ่ม เป็นก๊าซพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และมีคุณสมบัติเป็นก๊าซเรือนกระจกดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ทำให้บรรยากาศมีอุณหภูมิสูง และดูดกลืนรังสีอุลตราไวโอเล็ตซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งโอโซนที่กล่าวว่าเป็นมลพิษจะอยู่ในชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheic Ozone) เกิดจากเผาไหม้มวลชีวภาพ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ เครื่องจักร และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปะปนอยู่ในหมอกควัน และโอโซนในชั้นนี้มักจะให้โทษมากกว่าให้คุณ เนื่องจากเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนา, 2550)

มลพิษต่างๆ ในอากาศอาจทำลาย cell membrane และระบบการทำงานของเอนไซม์ที่จำเป็นต่อกระบวนการดำรงชีพของพืช ประกอบกับพืชสามารถดูดซับมลพิษในอากาศได้หลายชนิด เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โอโซน และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น ในบรรดาก๊าซหลายชนิดนี้ พืชจะดูดซับ CO_2 จากอากาศได้มากที่สุดโดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Heck et al., 1988; Heath and Taylor, 1997) ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้น CO_2 ในอากาศมีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ความเข้มข้นของ CO_2 ในระดับปัจจุบัน (370 ppm) เป็นปัจจัยสำคัญที่จำกัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช C_3 ดังนั้น เมื่อความเข้มข้นของ

CO_2 ในอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช C_3 หลายชนิดเพิ่มขึ้น และมีแนวโน้มทำให้ชีวมวลและผลผลิตของพืช C_3 เพิ่มมากขึ้นได้ ในปัจจุบันนี้เกษตรกรที่เพาะปลูกพืชเศรษฐกิจหลายชนิดในโรงเรือน เช่น มะเขือเทศ และกุหลาบ ใช้อุปกรณ์เติม CO_2 เพิ่มในอากาศซึ่งจะทำให้พืชเหล่านี้สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มมากขึ้น และสามารถสร้างผลผลิตได้มากขึ้น (พูนพิภพ, 2549)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาอิทธิพลของก๊าซโอโซนต่อการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาบางประการของพืชตระกูลถั่ว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการผลิตที่มีแนวโน้มในการตอบสนองในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณก๊าซโอโซนและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น และสามารถนำไปช่วยประเมินความเสียหายทางเศรษฐกิจต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของก๊าซโอโซน และระยะเวลาที่ได้รับต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในใบของถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง

การตรวจเอกสาร

ลักษณะทั่วไปของก๊าซโอโซน (O_3)

ก๊าซโอโซน (O_3) มีสองบทบาท คือ โอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์ (Tropospheic Ozone) เกิดจากการเผาไหม้มวลชีวภาพ ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากเครื่องยนต์ เครื่องจักร และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งปะปนอยู่ในหมอกควัน เมื่อโอโซนอยู่ในบรรยากาศชั้นล่างหรือเหนือพื้นผิว มันจะให้โทษมากกว่าให้คุณเนื่องจากเป็นพิษต่อร่างกาย และโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratospheic Ozone) ในธรรมชาติโอโซนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีเพียง 10% โอโซนส่วนใหญ่ในชั้นสตราโตสเฟียร์รวมตัวเป็นชั้นบางๆ ที่ระยะสูงประมาณ 20–30 กิโลเมตร ทำหน้าที่กรองรังสีอุลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ออกไป 99% ก่อนถึงพื้นโลก หากร่างกายมนุษย์ได้รับรังสีนี้มากเกินไปจะทำให้เกิดมะเร็งผิวหนัง ส่วนจุลินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย จะถูกฆ่าตาย เพราะ $O_3 + H_2O \longrightarrow H_2O_2$ (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนา, 2550)

ในขณะที่โอโซนในสตราโตสเฟียร์กำลังลดลง แต่โอโซนในโทรโพสเฟียร์กำลังเพิ่มมากขึ้น เพราะมีรังสีดวงอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยบริเวณพื้นผิว ไอเสียเครื่องบินและรถยนต์ ซึ่งเป็นสารเริ่มต้นของปฏิกิริยา (Precursors) และยังมีพวกก๊าซมีเทน (CH_4) และคาร์บอนมอนออกไซด์ (CO) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาแล้วกลายเป็นก๊าซโอโซนได้ นับจากปลายศตวรรษที่ 19 เป็นต้นมา ก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น มากกว่า ร้อยละ 1 ต่อปี (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนา, 2550)

50 ปีหลังของศตวรรษที่ 19 บริเวณเหนือผิวพื้นในโทรโพสเฟียร์ตอนกลางและตอนบน ก็พบโอโซนเพิ่มขึ้นมากเช่นกัน (ภาพผนวกที่ 1) แต่อย่างไรก็ตามโอโซนที่เพิ่มขึ้นนี้ไม่สามารถชดเชยโอโซนที่ลดลงในสตราโตสเฟียร์ได้ โอโซนที่เพิ่มขึ้นบริเวณผิวพื้นมีผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ เช่น การแสบตา ระคายเคืองต่อหลอดลม นอกจากนั้นเพราะว่าโอโซนทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ได้อย่างง่ายด้วยการออกซิไดซ์ โอโซนใกล้ผิวพื้นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของหมอกที่เกิดขึ้นในวันที่อากาศร้อนอบอ้าว ปราศจากเมฆในเมืองใหญ่ทั่วโลก ซึ่งรัฐบาลต่างๆ เริ่มมีมาตรการควบคุมมลพิษในปัจจุบัน

ทั้งโอโซนและสารประกอบฮาโลคาร์บอนเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) เหมือนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทในการดูดกลืนและปลดปล่อยรังสีช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากโลก ฉะนั้นจึงทำให้บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ตอนล่างอุ่นขึ้น เนื่องจากโอโซน ไม่ได้กระจายตัวอย่างเป็นรูปแบบและไม่เสถียร ดังนั้นการแผ่รังสี (Radiative Forcing) จึงซับซ้อนมากกว่าก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ซึ่งมีช่วงชีวิตยาวถึงแม้จะมีการคลุกเคล้ากัน โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มโอโซนในชั้นโทรโพสเฟียร์จะทำให้บรรยากาศอุ่นขึ้นโดยเฉพาะในบริเวณโทรโพพอส ดังนั้นการลดลงของโอโซนในสตราโตสเฟียร์จึงทำให้บรรยากาศเย็นลง อุณหภูมิที่ลดลงเล็กน้อย คือ 0.6-0.8 องศาเซลเซียส ที่ความสูง 12-20 กิโลเมตรระหว่าง 20 ปีที่ผ่านมาดูเหมือนจะเป็นผลกระทบของการแผ่รังสีเมื่อโอโซนลดลง

ความถูกต้องในการประเมินผลกระทบของการแผ่รังสี (Radiative effect) ของการเปลี่ยนแปลงโอโซน ถูกจำกัดโดยข้อมูลการกระจายตัวของโอโซนตามความสูง ตามละติจูดและลองติจูด อย่างไรก็ตามจากการคำนวณในปีหลังๆ ได้สนับสนุนข้อสรุปเบื้องต้นที่ว่า การลดลงของโอโซนในหลายสิบปีที่ผ่านมาให้ผลการแผ่รังสีที่เป็นลบ เช่น การเย็นลงของภูมิอากาศ ขณะที่มีการแผ่รังสีเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซอื่นๆ 15-20 % การเพิ่มขึ้นของโอโซนในโทรโพสเฟียร์ตั้งแต่ก่อนยุคอุตสาหกรรมเป็นต้นมา อาจเพิ่มการแผ่รังสีเนื่องจากก๊าซเรือนกระจกถึงร้อยละ 20 ความเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ สามารถมีผลต่อสมดุลการแผ่รังสีของระบบอากาศโดยรวมบนโลก และโครงสร้างอุณหภูมิของบรรยากาศเป็นเหตุของความเปลี่ยนแปลงรูปแบบการหมุนเวียนบรรยากาศอื่น ๆ ที่อาจยังไม่สามารถทำนายได้

โอโซนเป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติความเป็นก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมบนพื้นผิวโลกประมาณ 2.85 วัตต์/ตารางเมตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ก๊าซโอโซนเกิดขึ้นจากการเผาไหม้มวลชีวภาพและการสันดาปของเครื่องยนต์ มีอยู่ในหมอกควันซึ่งเกิดจากการจราจรและโรงงาน โดยเกิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และพวกสาร VOC ทำปฏิกิริยาร่วมกัน โดยมีแสงเป็นตัวกระตุ้น นอกจากนี้ NO_x ในบรรยากาศมีส่วนเพิ่มปริมาณ O_3 ในบรรยากาศได้ (Skelly, 2000) ดังนี้

$$NO_2 + O_2 \longrightarrow NO_2 \quad \ldots(1)$$

$$NO_2 \xrightarrow{h\nu} NO + O \quad \ldots(2)$$

$$O + O_2 \longrightarrow O_3 \quad \ldots(3)$$

$$NO_2 + O_2 \underset{h\nu}{\rightleftharpoons} NO + O_3 \quad \ldots(4)$$

ในบรรยากาศเขตเมืองทั่วไปมีสารไฮโดรคาร์บอนมากมายหลายชนิด ทำให้มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเกิดโอโซนซับซ้อนมาก และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้น ในการสำรวจคุณภาพอากาศของกรมควบคุมมลพิษในกรุงเทพ และปริมณฑลพบว่าค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงของโอโซนมีค่าเกิน 100 ppb ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน เกือบทุกสถานี และมีแนวโน้มว่าจะสูงขึ้นตามลำดับ (ตารางที่ 1 2 และ 3) (กรมควบคุมมลพิษ, 2549) สำหรับค่ามาตรฐานของต่างประเทศได้กำหนดให้มีก๊าซโอโซนไม่เกิน 80 ppb ต่อ 1 ชั่วโมง แต่บริเวณถนนสายหลัก และศูนย์กลางในเมือง ค่าที่วัดก๊าซโอโซนอาจสูงถึง 200-300 ppb ซึ่งทำให้อากาศมีการปนเปื้อนของก๊าซโอโซน ส่งผลกระทบต่อแปลงเกษตรกรและป่าไม้ในบริเวณใกล้เคียง (Bryan and Ya'acov, 1994)

ตารางที่ 1 คุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดบริเวณพื้นที่ทั่วไปในกรุงเทพมหานคร แยกตามสถานี ปี 2549

สถานี	ก๊าซโอโซน (O_3)		
	ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)		ค่าเฉลี่ย
	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	1 ปี
ที่ทำการไปรษณีย์ราษฎร์บูรณะ เขตราษฎร์บูรณะ	188	0	23.5
กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา เขตบางนา	118	0	13.6
มหาวิทยาลัยราชภัฏจันเกษม เขตจตุจักร	149	0	15.1
สนง.การเคหะชุมชนคลองจั่น เขตบางกะปิ	170	0	19.3
สนามกีฬาการเคหะชุมชนห้วยขวาง เขตห้วยขวาง	129	0	12.9
โรงเรียนนนทรีวิทยา เขตยานนาวา	136	0	15.4
โรงเรียนสิงหราชพิทยาคม เขตบางขุนเทียน	126	0	17.9
โรงเรียนบดินทรเดชา เขตวังทองหลาง	148	0	17.9
สถานีการไฟฟ้าย่อยธนบุรี ถ.อินทรพิทักษ์	137	0	14.8
สถานีตำรวจนครบาลโชคชัย 4 ถ.ลาดพร้าว	124	0	15.6
เคหะชุมชนดินแดง ถ.ดินแดง	87	0	6.5
ค่ามาตรฐาน	100		-

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549)

ตารางที่ 2 คุณภาพอากาศในเขตปริมณฑลแยกตามสถานี ปี 2549

จังหวัด	สถานี	ก๊าซโอโซน (O_3)		
		ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)		ค่าเฉลี่ย
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	1 ปี
สมุทรปราการ	การเคหะชุมชนบางพลี	141	0	19.1
ปทุมธานี	มหาวิทยาลัยกรุงเทพ วิทยาเขตรังสิต	152	0	21.9
สมุทรสาคร	แขวงการทางสมุทรสาคร	160	0	14.8
	องค์การบริหารส่วนจังหวัด อ.เมือง	110	0	14.3
นนทบุรี	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตจำกัดมหาชน	130	0	18.6
	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช	154	0	15.2
ค่ามาตรฐาน		100		-

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549)

ตารางที่ 3 คุณภาพอากาศในพื้นที่ต่างจังหวัดแยกตามรายสถานี ปี 2549

ภาค	สถานี	ก๊าซโอโซน (O_3)		
		ค่าเฉลี่ย 1 ชั่วโมง (ppb)		ค่าเฉลี่ย
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	1 ปี
เหนือ	ศูนย์ราชการรวม อ.แม่ริม จ.เชียงใหม่	100	0	18.6
	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย อ.เมือง จ.เชียงใหม่	98	0	15.5
	ศาลาหลักเมือง อ.เมือง จ.ลำปาง	104.5	0	16.3
	สถานีอนามัยสบป้าด อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง	102	0	17.6
	สถานีอนามัยท่าสี อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง	88	0	11
	วิทยาลัยอาชีวศึกษานครสวรรค์ จ.นครสวรรค์	109	0	27
ตอ./เหนือ	อ.เมือง จ.ขอนแก่น	81	0	14
	อ.เมือง จ.นครราชสีมา	81	0	17.8
กลาง	โรงเรียนอยุธยาวิทยาลัย จ.อยุธยา	143	0	23.3
	อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.สระบุรี	124	0	18.4
	อ.เมือง จ.สระบุรี	107	0	21.7
	อ.เมือง จ.ราชบุรี	111	0	20.9
ตะวันออก	อ.ปลวกแดง จ.ระยอง	132	0	22.8
	สถานีอนามัยมาบตาพุด อ.เมือง จ.ระยอง	95	0	16.9
	ศูนย์วิจัยพืชไร่ อ.เมือง จ.ระยอง	123	0	18.8
	ศูนย์เยาวชนเทศบาล อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี	146	0	20.2
	สนง.สามัญศึกษา อ.เมือง จ.ชลบุรี	120	0	17.7
	อบต.วังเย็น อ.แปลงยาว จ.ฉะเชิงเทรา	134	0	26.3
ใต้	ที่ว่าการอำเภอเมือง จ.สุราษฎร์ธานี	91	0	15
	ศูนย์บริการสาธารณสุข อ.เมือง จ.ภูเก็ต	81	0	14.5
ค่ามาตรฐาน		100		-

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ (2549)

ผลของก๊าซโอโซนต่อพืช

ผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

รายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของก๊าซโอโซนที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชบางชนิด เช่น ยาสูบ และถั่วพินโต จะเติบโตช้าเมื่อได้รับ O_3 ที่ความเข้มข้น 0.05 ppm เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือที่ความเข้มข้น 0.03 ppm เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ส่วนกรณีพวกพืช alfafa จะเกิดความเสียหายเมื่อได้รับ O_3 ความเข้มข้น 0.06 ppm เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง (Agrawal *et al.*, 2003) ในการทดลองให้ SO_2 กับ O_3 พร้อมกันในถั่วเหลืองและแรชดิช พบว่า การเจริญเติบโตและผลผลิตลดลง น้ำหนักสดน้ำหนักแห้งของส่วนยอดและรากของต้นกล้าถั่วเหลืองลดลงและยังพบว่า การเจริญเติบโตของรากแรชดิช และถั่วเหลืองลดลงมาก เมื่อเทียบกับส่วนที่อยู่เหนือดิน (Kleier and Winner, 2001)

Bryan และ Ya'acow (1994) พบว่า O_3 จะทำลาย semi-permeability ของ cell membrane ของพืชทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่ของน้ำและธาตุอาหารของพืชเสียหาย ซึ่งจะแตกต่างกันไปแต่ละชนิดพืช และความเข้มข้นของ O_3 ในบรรยากาศ ซึ่งพืชหลายชนิดจะถูกทำลายได้ง่าย เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง ยาสูบ องุ่น ถั่วลันเตา มะเขือเทศ และหัวหอม (Ormrod *et al.*,1988; Heagle *et al.*, 1991; Hippeli and Elstner, 1993)

ลักษณะอาการทั่วไปที่พืชได้รับผลกระทบจาก O_3 ต่อการพัฒนาการของพืช มักจะเกิดจุดเหลืองบนแผ่นใบ (chlorosis) หรือเป็นจุดรอยช้ำ และรอยไหม้มีสีน้ำตาลซึ่งจะเพิ่มขึ้นในระยะเวลารวดเร็ว และยังพบว่า กระบวนการหลายชนิดที่เมื่อพืชได้รับ O_3 จะมีการปลดปล่อยก๊าซเอทิลีนออกมาปนเปื้อน ซึ่งจะเพิ่มกรด 1 อะมิโนไซโคลโพรเปน -1-คาร์บอนซิลิก (1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC) และกระตุ้นการผลิตเอนไซม์ 1-อะมิโนไซโคลโพรเปน-1-คาร์บอนซิลิกแอซิดซินเทส (1-aminocyclopropane-1-carboxyic acid synthase, ACC synthase) และเอนไซม์ ACC-oxidase (Yin *et al.*, 1993) Mehlhorn และ Wellburn (1987) ยืนยันว่า ผลพลอยได้เมื่อพืชได้รับผลกระทบจากก๊าซเอทิลีน จะช่วยกระตุ้นให้ใบพืชมีจำนวนบาดแผลเพิ่มมากขึ้น

ผลต่อคลอโรฟิลล์

ผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชจะถูกทำลายโดย O_3 ซึ่ง Farooq และคณะ (1988) พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์มีความสัมพันธ์ในทางผกผันกับความเข้มข้นของก๊าซมลพิษทางอากาศ ที่ทำให้พืชแสดงอาการ และมีการยืนยันว่าการทำลายรงควัตถุเหล่านี้ได้รับอิทธิพลจาก pH แสง และปัจจัยอื่นๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ระยะเวลา และความเข้มข้นของมลพิษที่ได้รับ เช่น การให้ความเข้มข้นของ O_3 65 ppb เป็นเวลา 5 วัน โดยให้วันละ 8 ชั่วโมง มีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Keutgen *et al.*, 1997) แต่ O_3 ความเข้มข้น 500 ppb เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ของแตงกวา (Barnes *et al*., 1990)

ผลต่อการสังเคราะห์แสง

พืชพวก *Fabaceae* จะมีการสะสมสารพวก flavanoids หลังจากได้รับ O_3 (Keen and Taylor, 1975) และในผลไม้จำพวกส้ม O_3 จะยับยั้งการพัฒนาการของพืช โดยจะชักนำให้มีการผลิต phytoalexin resveratrol (Sarig *et al.*, 1993) สำหรับผลมะเขือเทศ เมื่อได้รับ O_3 พร้อมกับแสง UV พบว่า การพัฒนาการของผล และระยะเวลาในการเก็บรักษาผลมะเขือเทศลดลง (Mednyanszki *et al.*, 1993) จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า O_3 สามารถลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชแตกต่างกันออกไปตามแต่ละชนิดของก๊าซ และลักษณะทางพันธุกรรมของพืช โดยพบว่า O_3 ความเข้มข้น 11 ไมโครลิตร/ลิตร/ชั่วโมง มีผลทำให้ต้นมันฝรั่งมีค่า stomatal conductance ลดลง และมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงร้อยละ 4 นอกจากนี้ Kleier และคณะ (2001) และ Guidi และคณะ (2002) พบว่า O_3ความเข้มข้น 70-80 ppb สามารถลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในแรชดิช ถั่วพินโต และต้นโอ๊ค

Paul และคณะ (2003) พบว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้น *Pinus ponderosa* ลดลง เนื่องจาก O_3 ไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ribulose bisphosphate carboxylase (Rubisco) เช่นเดียวกับในถั่วเหลือง และ อรอุมา (2548) ได้ทดลองให้ O_3 ความเข้มข้น 300 ppb ในใบส้มเขียวหวาน มะเขือเทศ และคะน้า ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าพืชทั้ง 3 ชนิดมีการตอบสนองของอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซแตกต่างกัน ซึ่งค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบที่ได้หลังจากรมมลพิษจะมีค่าน้อยกว่าก่อนนำใบไปรมด้วยมลพิษ แสดงว่าการให้มลพิษกับพืชจะทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบพืชลดลง สอดคล้องกับ Vandermeiren และคณะ (2002)

ที่พบว่า O_3 ความเข้มข้น 11 ppm มีผลทำให้มันฝรั่งมีค่า stomatal conductance ลดลง และมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง ร้อยละ 4 และ O_3 ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของผักกาดหัวลดลง ร้อยละ 20-30 และมีค่า stomatal conductance ลดลง ร้อยละ 24-50 (Zheng *et al*., 1998)

อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของ sugar maple และ white ash ลดลง เมื่อรมด้วยก๊าซ SO_2 กับ O_3 พร้อมกัน เป็นเวลา 2 วัน (Reinert, 1984) เนื่องจากมลพิษดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อปากใบ มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมากกว่าการรมก๊าซมลพิษเพียงชนิดเดียว ส่วนอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบทานตะวันจะลดลง หลังจากที่รมก๊าซ SO_2 NO_2 และ O_3 พร้อมกัน ประมาณ 30 นาที และจะกลับคืนสู่ปกติภายใน 30 นาที ถึง 2 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ให้สูงกว่าระดับปรกติ ซึ่งสามารถลดอิทธิพลของ SO_2 กับ NO_2 ต่อการยับยั้งการสังเคราะห์ด้วยแสงได้เกือบร้อยละ 50 (Ormrod, 1982) เมื่อก๊าซมลพิษเข้าสู่ภายในพืชจะมีผลต่อกระบวนการชีวเคมี และมีผลยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่มีผลทำให้อิทธิพลของมลพิษทางอากาศเพิ่มขึ้น เช่น แสง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Lawson *et al.*, 2001)

ลักษณะทั่วไปของพืช

1. ถั่วเขียว (Mungbean)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป การจำแนกถั่วเขียวเหมือนถั่วเหลืองมาจนถึงระดับ subtribe คืออยู่ใน Phaseolinae ด้วยกัน ในทางการจำแนกพืช ถือว่าถั่วเขียวมีวิวัฒนาการมากกว่า subtribe อื่นๆ 3 ประการคือ 1) มีส่วนแคลลัส (callosity) หนึ่งหรือสองที่ อยู่ด้านในของ standard 2) keel ทั้งสองมักเชื่อมติดกัน และ 3) ก้านชูเกสรตัวเมียมีขน (trichome) อยู่ที่ด้านท้อง ถั่วเขียวจัดอยู่ในสกุล *Vigna*

พืชในสกุล *Vigna* มีทั้งสิ้น 7 subgenera ซึ่งมีถิ่นกำเนิดอยู่ใน 3 ทวีป ได้แก่ ทวีปเอเชีย แอฟาริกา และอเมริกา โดย subgenus ที่มีความสำคัญที่สุดได้แก่ *Ceratotropis* ประกอบด้วย ถั่วเขียว (*V. radiata*) ถั่วเขียวผิวดำ (*V. mungo*) ถั่วนิ้วนางแดง (*V. umbellate*) ถั่วอัดสุกิ (adzuki bean; *V. angularis*) และถั่วมอท (moth bean; *V. aconitifolia*) ใน subgenus นี้ ถั่วเขียวผิวดำและถั่วนิ้วนางแดง มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย (พีระศักดิ์, 2542)

พีระศักดิ์ (2542) กล่าวว่า ถั่วเขียวเป็นพืชล้มลุก ใบกว้าง ลำต้นตั้งตรงหรือกึ่งเลื้อย ต้นสูง 25 เซนติเมตร ถึงกว่า 1 เมตร ลำต้นสามารถแตกกิ่งได้ตั้งแต่ข้อล่างๆ มีใบประกอบ 3 ใบย่อย แต่ก็มีบางพันธุ์ที่มีใบ 5 7 9 11 หรือ 13 ใบย่อย อยู่บนต้นเดียวกัน รูปร่างใบมักจะเป็นแบบรูปใบหอก แต่ก็มีบางพันธุ์ที่ใบเป็นรูปเว้าคล้ายใบมันสำปะหลัง ส่วนดอกมีสีเหลืองหรือเขียวอ่อน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.00-1.75 เซนติเมตร ถั่วเขียวเป็นพืชผสมตัวเอง แต่สามารถผสมข้ามต้นกันได้ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ดอกจะทยอยออกติดต่อกันตลอดเวลา แม้ว่าจะเริ่มมีฝักแก่แล้ว ฝักอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีเทา ยาว 5-14 เซนติเมตร กว้าง 4-6 มิลลิเมตร ฝักแก่พร้อมเก็บเกี่ยวหลังดอกบานแล้ว 15-20 วัน เมล็ด มีสีต่างๆ ตั้งแต่เหลือง น้ำตาลแดง น้ำตาลดำ หรือเขียวลายปนดำ เยื่อหุ้มเมล็ดมีทั้งมันและด้าน พวกเมล็ดด้านเกิดจากผนังด้านในของฝักห่อหุ้มเมล็ดอยู่ สามารถย่อยออกด้วยสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเมล็ด ต่อ 1,000 เมล็ด อยู่ระหว่าง 20-90 กรัม ส่วนพันธุ์การค้าน้ำหนัก 60-75 กรัม เมื่อเพาะจะงอกแบบ epigeal (ชูใบเลี้ยงขึ้นเหนือดิน)

ระยะการเจริญเติบโต ใช้หลักการเกี่ยวกับการกำหนดระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง เพื่อกำหนดระยะการเจริญเติบโตของถั่วเขียว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างมาตรฐานในการระบุระยะที่เหมาะสมในการปฏิบัติรักษาของถั่วเขียว โดยแบ่งได้เป็น 2 ระยะใหญ่ๆ คือ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น และระยะเจริญพันธุ์ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นแบ่งแยกโดยใช้ข้อบนลำต้นหลักเป็นตัวกำหนด ทั้งนี้เพราะแม้ว่าใบเลี้ยงหรือใบจริงจะหลุดร่วงไป แต่ข้อจะยังปรากฏเป็นรอยให้เห็นอยู่ ข้อแรกที่มีใบเลี้ยงเรียกว่า ข้อใบเลี้ยง (cotyladonary nodes) ข้อถัดขึ้นมาเรียกว่าข้อของใบจริงคู่แรก (unifoliolate nodes) ซึ่งเป็นใบเดี่ยว ส่วนใบจริงข้อต่อมา เป็นใบประกอบ 3 ใบย่อย (trifoliolate leaf)

ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (V-stage) เริ่มนับตั้งแต่ต้นอ่อนงอกโผล่พ้นดิน (VE) แล้วพัฒนามาเป็นระยะใบเลี้ยงคลี่กาง (VC) หลังจากนั้นระยะการเจริญเติบโตจะถูกกำหนดโดยลำดับของการเกิดข้อบนลำต้นหลัก โดยเริ่มนับจากใบจริงคู่แรกเป็นข้อที่ 1 จนถึงข้อสุดท้ายที่นับคือข้อที่มีใบแผ่กว้าง ถ้าสังเกตดูใบบนข้อที่อยู่เหนือขึ้นไป จะเห็นว่ามีใบคลี่กางจนกระทั่งขอบใบไม่ติดกัน ถ้าลำต้นหลักถูกทำลาย จะไม่สามารถกำหนดระยะการเจริญเติบโตของต้นนั้นได้ ส่วนในระยะออกดอกและติดฝักหรือเจริญพันธุ์ (R-stage) เริ่มตั้งแต่ถั่วเขียวออกดอก ติดฝัก และเมล็ดมีการพัฒนา ตลอดจนการสะสมน้ำหนักแห้งในเมล็ด ไปจนถึงเมล็ดสุกแก่

2. ถั่วเหลือง (Soybean)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป การจำแนกถั่วเหลืองในปัจจุบันยังแตกต่างอยู่บ้าง แต่ที่ยอมรับกันมากที่สุดเป็นดังนี้ (พีระศักดิ์, 2542)

Order	:	Rosales
Suborder	:	Leguminosinae
Family	:	Leguminosae
SubFamily	:	Papilionaceae, Fabaceae
Tribe	:	Phaseoleae
Subtribe	:	Phaseolinae (Glycininae)
Genus	:	*Glycine* (L.)
Species	:	*max* (Merr.)

ราก เมื่อนำเมล็ดแก่ของถั่วเหลืองไปเพาะ แรดิเคิลจะเจริญเติบโตและพัฒนาไปเป็นรากแก้ว ซึ่งอาจยาวได้ถึง 2 เมตร ขึ้นอยู่กับสภาพดินและความแข็งแรงของต้นถั่วเหลือง จากรากแก้วจะมีรากแขนงแตกออกมา มีมากอยู่ในช่วงไม่เกิน 15-20 เซนติเมตรจากผิวดิน แต่พบรากแขนงบางรากเจริญเติบโตลงไปในดินยาวกว่ารากแก้วที่ปลายรากแก้ว และรากแขนงมีรากขนอ่อนพัฒนามาจากเซลล์ผิว (epidermis) ของปลายราก เป็นการเพิ่มพื้นที่ดูดน้ำและอาหาร รากขนอ่อนมีอายุสั้น เพราะเมื่อรากเจริญเติบโตไปเรื่อยๆ บริเวณรากขนอ่อนเดิมจะไม่มีเซลล์ผิวเหลืออยู่ แต่ระบบรากทั้งหมดก็ยังทำงานต่อไปจนถั่วเหลืองพร้อมเก็บเกี่ยวได้

ลำต้น เมื่อเมล็ดถั่วเหลืองเริ่มงอก hypocotyls จะยืดตัวออกและดันยอดอ่อนโผล่พ้นดินเพื่อพัฒนาเป็นลำต้นและใบ โดยข้อแรกมีใบเลี้ยงอยู่ ข้อที่ 2 มีใบจริงเป็นใบเดี่ยวคู่แรก (unifoliolate leaf) ข้อที่ 3 จึงเป็นจุดเริ่มของใบจริงที่มี 3 ใบย่อย (trifoliolate leaf) ซึ่งใบต่อๆ มา เป็นใบประกอบ 3 ใบย่อยทั้งสิ้น ส่วนของลำต้นที่เจริญเติบโตเป็น 2 แบบ ขึ้นอยู่กับการหยุดการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองเอง พันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตแบบไม่ทอดยอด (determinate) หยุดการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นเมื่อเริ่มออกดอกหรือเริ่มติดฝัก และเกิดช่อดอกหรือช่อฝักที่ตายอด ในขณะที่พันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตแบบทอดยอด (indeterminate) ยังคงเจริญเติบโตไปพร้อมกับการพัฒนาของเมล็ด ทำให้ปลายยอดสร้างใบอ่อน ไม่ใช่กลุ่มของฝัก อย่างไรก็ตามการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองโดยเฉพาะ

จำนวนข้อ ยังขึ้นอยู่กับการตอบสนองต่อช่วงแสงของแต่ละพันธุ์อีกด้วย ซึ่งพันธุ์ที่ตอบสนองต่อช่วงแสง เมื่อนำมาปลูกในที่มีช่วงแสงสั้นกว่าปกติจะออกดอกเร็วและต้นเตี้ยมาก จากพันธุ์ปกติที่มี 15-20 ข้อ ต้นสูงกว่า 50 เซนติเมตร อาจเหลือเพียง 6-7 ข้อ และสูงเพียง 15 เซนติเมตร เท่านั้น พันธุ์ถั่วเหลืองทั้งสองแบบนี้จะให้ผลผลิตที่ไม่ต่างกันมากนัก แต่โดยทางทฤษฎีแล้วพันธุ์ที่ไม่ทอดยอดจะเหมาะสำหรับปลูกปลายฤดูฝน เพื่อจะได้เจริญเติบโตอย่างเต็มที่ในช่วงมีฝน ถ้าใช้พันธุ์ทอดยอดแล้ว ฝักชุดหลัง ๆ อาจได้รับอาหารไม่เพียงพอเนื่องจากในปลายฤดูจะขาดน้ำ (พีระศักดิ์, 2542)

ใบ ของถั่วเหลืองมี 4 แบบ คือ

1. ใบเลี้ยง มี 2 ใบ
2. ใบเดี่ยว มี 2 ใบ เกิดถัดจากใบเลี้ยงขึ้นมา
3. ใบประกอบ 3 ใบย่อย ซึ่งเกิดถัดจากใบเดี่ยวขึ้นมาอีก
4. ใบเดี่ยวโคนกิ่ง (prophylls) เป็นใบเล็กๆ เกิดเป็นคู่ ที่ฐานของกิ่งแขนง

ซึ่งแม้ว่าใบส่วนใหญ่จะเป็นใบประกอบ 3 ใบย่อย แต่ก็พบเสมอว่าบางใบอาจมี 4 ใบย่อย หรือมากกว่าได้ นักปรับปรุงพันธุ์ถั่วเหลืองพบว่า รูปร่างใบย่อยมีความสัมพันธ์กับจำนวนเมล็ดต่อฝัก โดยทั่วไปต้นถั่วเหลืองที่มีใบเป็นรูปไข่กลม มักจะมีเพียง 1-2 เมล็ดต่อฝักเท่านั้น ต้นที่มีใบเป็นรูปไข่ปลายแหลมมี 2-3 เมล็ดต่อฝัก ในขณะที่ต้นที่มีใบแคบมี 3-4 เมล็ดต่อฝัก (พีระศักดิ์, 2542)

ดอก เกิดตามมุมใบ เริ่มตั้งแต่ข้อที่ 5-8 มีวงกลีบเลี้ยงเป็นหลอด วงกลีบดอกมีสีขาว ม่วง หรือขาวปนม่วง แยกได้เป็น 5 ชิ้นย่อย (1 standard, 2 wing และ 2 keel) เกสรตัวผู้มีก้านชู 10 ก้าน โดย 9 ก้านรวมกันอยู่ อีก 1 ก้านแยกเป็นอิสระ ทั้ง 10 ก้าน ทำหน้าที่ชูอับละอองเกสรตัวผู้ซึ่งล้อมรอบตัวเมียอยู่ ทำให้การถ่ายละอองเกสรและการปฏิสนธิเกิดขึ้นภายในดอกเดียวกันเกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้น นักวิชาการพบว่าดอกถั่วเหลืองร่วงมาก บางพันธุ์ร่วงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของดอกทั้งหมด (พีระศักดิ์, 2542)

ผลและเมล็ด หลังจากผสมเกสรแล้ว ผลหรือฝัก (pod) ที่ยังอ่อนมีสีเขียว แต่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลหรือดำเมื่อฝักแก่ บางพันธุ์ฝักแก่แล้วจะแตก (shatter) ฝักจะแตกมากเมื่อถั่วเหลืองแก่ขณะอากาศแห้ง และพันธุ์ที่ดีไม่ควรจะมีฝักแตกขณะที่เก็บเกี่ยวในแปลง แต่ละ

ฝักมี 1-5 เมล็ด (ส่วนใหญ่ 2 หรือ 3 เมล็ด) เมล็ดมีรูปร่างต่างๆ กัน ตั้งแต่ กลม แบน และยาว พันธุ์ที่ปลูกเป็นการค้ามีน้ำหนักต่อ 100 เมล็ด น้ำหนักประมาณ 12-18 กรัม ถั่วเหลืองเมล็ดโตมีแนวโน้มเสื่อมความงอกเร็วกว่าถั่วเหลืองเมล็ดเล็ก เพราะกระทบกระเทือนและเสียหายจากการนวดมากกว่า ทั้งยังต้องการน้ำในการงอกมากกว่าอีกด้วย

3. ถั่วลิสง (Groundnut)

พฤกษศาสตร์ทั่วไป ถั่วลิสงเป็นพืชตระกูลเดียวกับถั่วเหลืองและถั่วเขียว เดิมจัดอยู่ในวงศ์ Leguminosae ใน Subspecices Papilionaceae ปัจจุบันจัดอยู่ในวงศ์ Papilionaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Arachis hypogaea* L. ชื่อสามัญมีหลายชื่อได้แก่ groundnut, peanut, earthnut, goober, monkey nut และ pindar แต่นิยมใช้แพร่หลายคือ groundnut และ peanut

ราก ถั่วลิสงมีระบบรากแบบรากแก้ว (tap root system) รากที่พัฒนาจากแรดิเคิลเรียกว่ารากแก้วและมีรากแขนงแตกออกมาจากรากแก้ว นอกจากนี้ยังมีราก adventitious root แตกจากข้อของลำต้นที่เลื้อยบนผิวดิน ถั่วลิสงมีรากขนอ่อนน้อยมากและบางพันธุ์ไม่มีเลย ที่รากแก้วและรากแขนงพบปมขนาดเล็กสีน้ำตาลอยู่ทั่วไปเกิดจากแบคทีเรียไรโซเบียมเข้าไปอาศัยอยู่แบบพึ่งพาซึ่งกันและกัน (symbiosis) กับรากของถั่วลิสง แบคทีเรียนี้สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศมาสะสมไว้และพืชนำมาใช้ในรูปไนเตรท (อารีย์, 2519)

ลำต้น ถั่วลิสงเป็นพืชชนิดล้มลุกพวกไม้เนื้ออ่อน โดยทั่วไปลำต้นจะมีความสูง 15-70 เซนติเมตร การเจริญเติบโตของลำต้นแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

1. ลำต้นตั้งตรง ถั่วลิสงพวกนี้ลำต้นมีการแตกกิ่งก้านสาขามาก กิ่งเหล่านี้จะเจริญไปในแนวตั้ง ทำให้ต้นถั่วลิสงมีลักษณะเป็นพุ่ม ฝักจะเกิดเป็นกลุ่มบริเวณโคนต้น

2. ลำต้นเลื้อย ถั่วลิสงพวกนี้มีลำต้นสั้น กิ่งก้านที่แตกออกมามักเจริญไปในแนวนอนทอดไปตามผิวดิน ฝักเกิดกระจัดกระจายอยู่ตามกิ่งก้านที่เลื้อยไปตามผิวดิน

ใบ ใบของถั่วลิสงเป็นใบประกอบแบบ even-pinnate คือ ใบประกอบแต่ละใบมีใบย่อย 2 คู่ ใบจะเกิดสลับกันบนข้อของลำต้น ใบย่อยมีลักษณะเป็นรูปไข่ ขอบใบจะเรียบ ก้านใบยาว 3-7 เซนติเมตร ที่โคนก้านใบมีหูใบ 2 อัน มีลักษณะแหลมและยาวประมาณ 2 เซนติเมตร

ดอก ถั่วลิสงจะมีดอกเกิดเป็นกลุ่มหรือเป็นช่อ โดยในแต่ละช่อจะมีประมาณ 2-5 ดอก ดอกมีสีเหลือง เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.9-1.4 เซนติเมตร ก้านดอกสั้น ที่ฐานของก้านดอกจะพบ bract 1 อัน และ bracteole 2 อัน แต่ละดอกประกอบด้วย calyx tube, corolla tube และ staminal column เชื่อมกันเป็นท่อยาวลักษณะคล้ายก้านดอกเรียกว่า hypanthium ซึ่งจะแยกกันตรงส่วนปลายของดอก โดยที่ calyx tube แยกออกเป็น 5 แฉก corolla tube แยกออกเป็นกลีบดอก 5 กลีบคือ standard 1 กลีบ wing 2 กลีบ และ keel 2 กลีบที่เชื่อมติดกัน เกสรตัวผู้ที่เชื่อมติดกันนั้นมี 8 อันที่สมบูรณ์ ส่วนอีก 2 อันจะเป็นหมัน บริเวณฐานด้านในของ hypanthium เหนือก้านดอกขึ้นมาพบเกสรตัวเมีย 1 อัน อยู่อย่างอิสระ มีก้านเกสรตัวเมียยาว เจริญจากรังไข่ผ่าน hypanthium ขึ้นไป รังไข่มี 1 ลอคคุล ซึ่งจะมี 1-5 ออวุล เมื่อดอกถั่วลิสงยังไม่บานยอดเกสรตัวเมียจะถูกห่อหุ้มอยู่ภายใน keel ถั่วลิสงเป็นพืชผสมตัวเอง ดังนั้นการผสมเกสรจะเกิดขึ้นก่อนที่ดอกจะบาน (cleistogamy) เมื่อได้รับการการผสมเกสรแล้ว hypanthium และส่วนที่อยู่เหนือขึ้นมาจะแห้งเหี่ยวไป ฐานของรังไข่ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อพวก intercalary meristem (peg initiation) จะยืดตัวเป็นก้านยาวเรียกว่าเข็ม (peg หรือ gymnophore) ซึ่งจะปรากฏให้เห็นประมาณ 5-7 วันหลังดอกบาน ส่งรังไข่ซึ่งอยู่ที่ปลายเข็มลงไปใต้ผิวดินลึก 3-5 เซนติเมตร แล้วเจริญเป็นฝัก (รังสฤษดิ์, 2542)

ผลและเมล็ด ผลหรือฝักอาจเกิดเดี่ยวๆ หรือเกิดเป็นกลุ่มตามมุมใบ เมื่อฝักถั่วลิสงแก่เปลือกจะมีลักษณะแข็งและเปราะ มีลายเส้นที่เปลือก ฝักมีสีขาวนวลหรือน้ำตาลอ่อน มี 1-4 เมล็ดต่อฝัก ขึ้นอยู่กับพันธุ์ เมล็ดถั่วลิสงมีเปลือกหุ้มเมล็ดบาน มีสีม่วงแดง แดง หรือขาวนวล ขึ้นกับพันธุ์ ถัดเข้าไปเป็นใบเลี้ยงหนา 2 ใบประกบติดกัน ทำหน้าที่เก็บสะสมอาหารพวกไขมัน โปรตีน และสารอื่นๆ

เส้นการตอบสนองต่อแสง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบพืช มีแนวอธิบายโยงเข้ากับกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอนของการสังเคราะห์แสงในพืช ดังนี้ ขั้นตอนแรก เป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) กับคาร์บอนไดออกไซด์โดยเอนไซม์ Rubisco เรียกว่า carboxylation ขั้นตอนที่สองเป็นการรีดิวซ์ (reduction) สารประกอบ C_5 เป็น C_3 โดยใช้พลังงานจาก electron transport และ photophosphorylation ของระบบรับแสง PSII และ PSI ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการผลิตแทนที่ใหม่ของ RuBP ซึ่งต้องใช้พลังงาน ATP ที่ได้จากระบบขนถ่ายอิเล็กตรอน

Evan และ Farquhar (1991) อธิบายลักษณะของเส้นตอบสนองต่อแสง ว่ามีสองส่วนในเส้นภาพ โดยส่วนที่ 1 เป็นอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงผันแปรโดยตรงกับความเข้มแสง (light limited region) คือช่วงแรกตั้งแต่ไม่มีแสงจนถึงแสงอ่อน ความสัมพันธ์มักมีลักษณะเป็นเส้นตรง ค่าความชันที่ได้เรียกว่าค่าประสิทธิภาพการใช้แสง (quantum or photochemical efficiency, α) และ ส่วนที่ 2 เป็นส่วนที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงมีค่าสูงสุด (P_{max}) ซึ่งไม่เพิ่มขึ้นอีกแม้ความเข้มแสงจะสูงขึ้น (light-saturated region) ทั้งค่า α และ P_{max} ถูกกระทบโดยอุณหภูมิและความเข้มข้นของ CO_2 และ O_2 โดยเฉพาะค่า P_{max} จะผันแปรตามปัจจัยอีก 2 อย่าง คือ ปริมาณคลอโรฟิลล์ต่อพื้นที่ใบ และระบบขนถ่ายอิเล็กตรอน ซึ่งการวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถบอกได้ว่าในระบบเปิดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอาจเกิดได้จากความกว้างของปากใบที่เปิดปิด หรือเกิดจากกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในคลอโรพลาสต์ (ภูริพงศ์, 2547)

รูปแบบสมการที่อธิบายเส้นตอบสนองต่อแสงที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็น non-rectangular hyperbola model (Thornley and Johnson, 1990) ซึ่งเหมาะสมในการประเมินค่าการสังเคราะห์แสงในพืชหลายชนิด โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (C_a) มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในช่องว่างของใบ (C_i) เป็นค่าขึ้นกับปัจจัย 3 อย่าง คืออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงรวม (gross photosynthesis, P) อัตราการหายใจในความมืด (dark respiration, R_d) และค่านำไหลรวม (total conductance, g_t) ซึ่งเป็นค่าการนำไหลสำหรับการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ จากบรรยากาศ ผ่านเข้าชั้นบางติดผิวใบและปากใบจนถึงช่องว่างภายในใบ ภายใต้ข้อสมมติฐานของสมการนี้จะได้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) เป็น

$$P_n = P - R_d \quad \text{...(5) หรือ}$$

$$P_n = g_t (C_a - C_i) \quad \text{...(6)}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่า P ในสมการอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงรวมที่เป็นฟังก์ชันของค่าความเข้มแสงที่ใบใช้สังเคราะห์แสง (I) และ C_i จากสมการที่ 6 จะได้สมการ non-rectangular hyperbola ได้เป็น

$$P_n = \frac{1}{2\theta}\left[\alpha I + P_{max} - \sqrt{(\alpha I + P_{max})^2 - 4\alpha I \theta P_{max}}.\right] - R_d. \quad \text{...(7)}$$

โดยที่ α เป็นประสิทธิภาพการใช้แสง (mol CO_2 mol^{-1} PPF)

I เป็นค่าความเข้มแสงที่ใบใช้สังเคราะห์แสง (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)

P_{max} เป็นอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิสูงสุด (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)

θ เป็นค่าที่ควบคุมความโค้งของเส้นภาพ (curvature factor) โดยมีความหมายทางกายภาพเท่ากับ

$$\theta = \frac{g_c}{g_d + g_c} \quad \text{...(8)}$$

เมื่อ g_c คือ carboxylation resistance

g_d คือ diffusion resistance

R_d เป็นอัตราการหายใจในที่มืด (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. พืชตระกูลถั่ว เลือกใช้ ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 และถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9

2. เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (PCI ozone and Control Systems, lnc., West Caldwell, NJ, U.S.A)

3. เครื่องวัดปริมาณก๊าซโอโซนในอากาศ (UV Absorption Ozone Analyzer-Model 400A, Teledyne Technologies Company, U.S.A)

4. เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (Portable Photosynthesis System รุ่น LI-6400 LI-COR, lnc., U.S.A)

5. chamber มีขนาดความกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร คลุมด้วยพลาสติกใสทำจาก acrylic plastic และ polypropylene

6. เครื่องเป่าลม (Blower)

7. ท่อ PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว

8. ท่อ PE ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

9. เครื่องบันทึกข้อมูล Data acquisition รุ่น OMB DAQ-55 (Omega, Inc., USA.)

10. เครื่องคอมพิวเตอร์

11. กระถางพลาสติก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความจุ 6,782 ลูกบาศก์เซนติเมตร

12. เครื่องปลูกสูตร ดิน: ปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 2: 1

13. สารป้องกันกำจัดแมลงและโรคพืช

14. ปุ๋ยเคมี สูตร 15-15-15

วิธีการ

1. การเตรียมต้นกล้า

1.1 ถั่วเขียว ทำการปลูกเมล็ดถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ในกระถาง โดยใช้วัสดุปลูก ดูแลรักษาต้นถั่วเขียว โดยให้น้ำวันละ 2 ครั้ง ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 จำนวน 2 กรัมต่อครั้ง ให้บริเวณโคนต้นจนกระทั้งเข้าระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นถั่วเขียวช่วงระยะ V4 (ตารางผนวกที่ 1)

1.2 ถั่วเหลือง ทำการปลูกเมล็ดถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในกระถาง โดยใช้วัสดุปลูก ดูแลรักษาต้นถั่วเหลือง โดยให้น้ำวันละ 2 ครั้ง ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 จำนวน 2 กรัมต่อครั้ง ให้บริเวณโคนต้นจนกระทั้งเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นถั่วเหลืองช่วงระยะ V4 (ตารางผนวกที่ 2)

1.3 ถั่วลิสง ทำการปลูกเมล็ดถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9 ในกระถาง โดยใช้วัสดุปลูก ดูแลรักษาต้นถั่วลิสง โดยให้น้ำวันละ 2 ครั้ง ให้ปุ๋ยสูตร 15-15-15 จำนวน 2 กรัมต่อครั้ง ให้บริเวณโคนต้นจนกระทั้งเข้าระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นของต้นถั่วลิสงช่วงระยะ V4 (ตารางผนวกที่ 3)

โดยจะทำการวัดผลเมื่อ ต้นถั่วเขียว มีอายุ 23-25 วัน ต้นถั่วเหลือง มีอายุ 25–30 วัน และต้นถั่วลิสง มีอายุ 20-23 วัน

2. วิธีการให้อากาศปกติ และ ก๊าซโอโซน (O_3) กับต้นถั่วแต่ละชนิด

สุ่มอากาศปกติจากถัง Buffer โดยใช้เครื่องเป่าลมเป็นตัวดูดอากาศผ่านมาตามท่อ PVC เพื่อเข้าสู่ chamber ที่จะนำต้นถั่วเข้ามาเพื่อรับอากาศปกติ (ภาพผนวกที่ 2) ส่วนใน chamber ที่มีการเพิ่มความเข้มข้นของ O_3 จะใช้เครื่องผลิต O_3 (ภาพผนวกที่ 3) เพิ่มความเข้มข้นของ O_3 เข้าไปผสมกับอากาศปกติที่มาจาก Buffer ก่อนที่จะเข้าสู่ chamber และควบคุมความเข้มข้นของ O_3 ให้มีค่าประมาณ 200 ppb โดยภายใน chamber จะมีท่อเข้า (air in) และท่อออก (air out) เพื่อให้อากาศภายในมีการไหลเวียนคล้ายกับสภาพแวดล้อมภายนอก และที่ปลายท่อออก จะมีท่อ PE เพื่อสุ่มอากาศจากภายใน chamber มาวัดปริมาณความเข้มข้นของ O_3 โดยใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซโอโซน (ภาพผนวกที่ 4) ซึ่งจะเก็บข้อมูลภายใน chamber แต่ละตำรับการทดลองโดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลเก็บทุก 1 นาที และใช้คอมพิวเตอร์เป็นตัวรับข้อมูล เมื่อนำต้นถั่วแต่ละชนิดเข้ารมอากาศใน chamber เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมงตามที่ได้วางแผนการทดลองไว้ นำต้นถั่วแต่ละชนิดออกจาก chamber แล้ววัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิทันที โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด ซึ่งสามารถสรุปวิธีการให้อากาศปกติ และ O_3 กับต้นถั่วแต่ละชนิด ดังภาพผนวกที่ 5

3. การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองโดยศึกษาลักษณะอากาศที่ใช้ มี 2 แบบได้แก่ (1) อากาศปกติ และ (2) อากาศที่เพิ่มปริมาณก๊าซโอโซน (O_3) ความเข้มข้น 200 ppb โดยให้ระยะเวลาในการรมอากาศกับใบถั่ว ดังนี้ (1) 2 ชั่วโมง (2) 4 ชั่วโมง และ (3) 6 ชั่วโมง แต่ละตำรับการทดลองทำ 5 ซ้ำใช้เครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด ซึ่งกำหนดความเข้มแสง 2,000 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ 400 ppm ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 50-80 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส โดยเลือกต้นถั่วที่มีค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ใกล้เคียงกันในการจัดกลุ่มให้ตำรับการทดลอง

4. การบันทึกข้อมูล

4.1 ปริมาณก๊าซโอโซน

ตรวจวัดปริมาณก๊าซโอโซน ใช้เครื่องวัดปริมาณก๊าซโอโซน ในอากาศของแต่ละตำรับการทดลอง

4.2 เส้นการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (Light response curve) ในใบถั่ว

วัดการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบถั่วแต่ละชนิด หลังจากได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด (ภาพผนวกที่ 6) โดยกำหนดค่าความเข้มแสง (photosynthetic photon flux, PPF) ที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงเป็น 2,000 1,600 1,200 800 400 100 75 50 25 และ 0 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ ปรับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศที่ได้จาก CO_2 tank (ภาพผนวกที่ 7) ให้มีค่า 400 ppm ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 50-80 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส เครื่องจะบันทึกและคำนวณค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนรวมของการวัด (total CV) ที่ระดับต่ำกว่า 1 ลงไปและค่าที่คำนวณได้ในช่วงนั้นมีระดับค่อนข้างคงที่)

การวิเคราะห์ข้อมูลจากค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ของใบถั่วที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ที่ความเข้มแสง 0 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ค่าความชันเริ่มต้นของกราฟการตอบสนองต่อแสง (initial slope) โดยคำนวนได้จากการหาความชันของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิกับระดับความเข้มแสงที่เท่ากับ 0 25 50 75 และ 100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ค่า light compensation point (LCP) ของใบถั่ว และหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ประเมินได้จากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) กับอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ได้จากการวัดผลในการทดลอง (จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด) ที่ความเข้มแสงเดียวกัน ($P_{observed}$) หลังจากนั้น นำข้อมูลการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิมาคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ในสมการ non- retangular hyperbola ซึ่งได้แก่ค่า θ และ P_{max} โดยวิธี non-linear least square ในโปรแกรม

Microsolf Excel ส่วนค่า light saturation point (LSP) คำนวณโดยการกำหนดให้ผลต่างของ P_{cal} กับ $P_{85\%}$ (85 เปอร์เซ็นต์ ของ P_{cal}) มีค่าน้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม Microsolf Excel (ดวงรัตน์, 2541) จากนั้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยทดสอบด้วยวิธีการ T-test ระหว่างใบถั่วภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 (P_{model}) เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง

4.3 การตอบสนองต่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (CO_2 response curve) ในใบถั่ว

วัดการตอบสนองต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศ ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบถั่วแต่ละชนิด หลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด กำหนดค่าความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศ ที่ได้จาก CO_2 tank ดังนี้ 0 50 100 200 400 600 800 1,000 และ 1,400 ppm และปรับความเข้มแสงให้มีค่า 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 50-80 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 27-35 องศาเซลเซียส เครื่องจะบันทึกและคำนวณค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนรวมของการวัด (total CV) ที่ระดับต่ำกว่า 1 ลงไปและค่าที่คำนวณได้ในช่วงนั้นมีระดับค่อนข้างคงที่)

การวิเคราะห์ข้อมูลจากค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ของใบถั่วที่ความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm และ 1,400 ppm ค่า CO_2 compensation point โดยหาจากค่าความชันเริ่มต้นของกราฟ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิกับระดับความเข้มข้นของ CO_2 เท่ากับ 0 50 100 และ 200 ppm จากนั้นเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย โดยทดสอบด้วยวิธีการ T-test ระหว่างใบถั่วภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 (P_{model}) เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง

4.4 ศึกษาลักษณะอาการที่เกิดขึ้นเมื่อใบถั่วได้รับก๊าซโอโซน

ลักษณะทางกายภาพ โดยดูลักษณะอาการของใบ ลักษณะบาดแผลต่างๆ ที่เกิดขึ้นบนแผ่นใบถั่วแต่ละชนิด เมื่อได้รับอิทธิพลจากก๊าซโอโซนในแต่ละตำรับการทดลอง

5. สถานที่และระยะเวลาทำการทดลอง

5.1 สถานที่ทำการทดลอง

ทำการทดลองที่เรือนทดลอง ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน กรุงเทพมหานคร

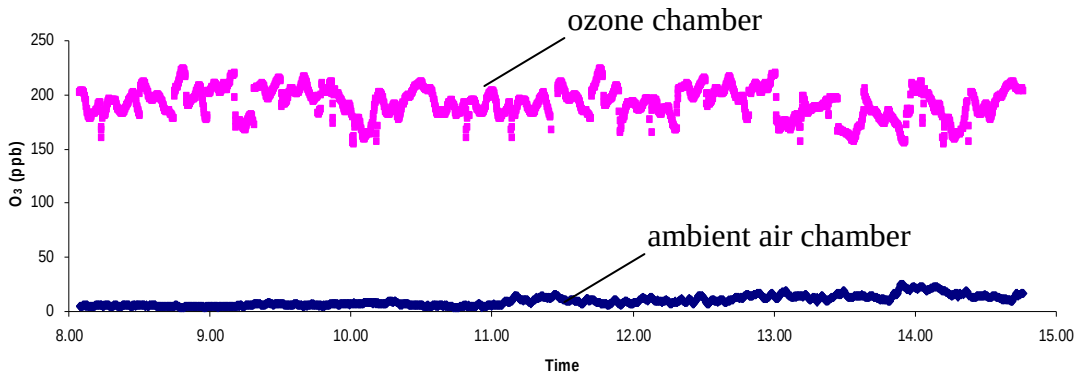
5.2 ระยะเวลาทำการทดลอง

การทดลองเริ่มตั้งแต่ เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2549 สิ้นสุดการทดลอง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2550

ผลและวิจารณ์

1. ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในอากาศปกติ และอากาศที่เพิ่มก๊าซโอโซน

วัดปริมาณ O_3 ใน chamber ที่เป็นอากาศปกติ กับ chamber ที่เพิ่มก๊าซโอโซนตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลอง (8.00 น.–15.00 น.) พบว่า O_3 ที่อยู่ภายใน chamber ที่เป็นอากาศปกติ จะมีค่าอยู่ประมาณช่วง 10–40 ppb ส่วนใน chamber ที่เพิ่มก๊าซโอโซนเข้าไปนั้นจะกำหนดให้มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 200 ppb (ภาพที่ 1)

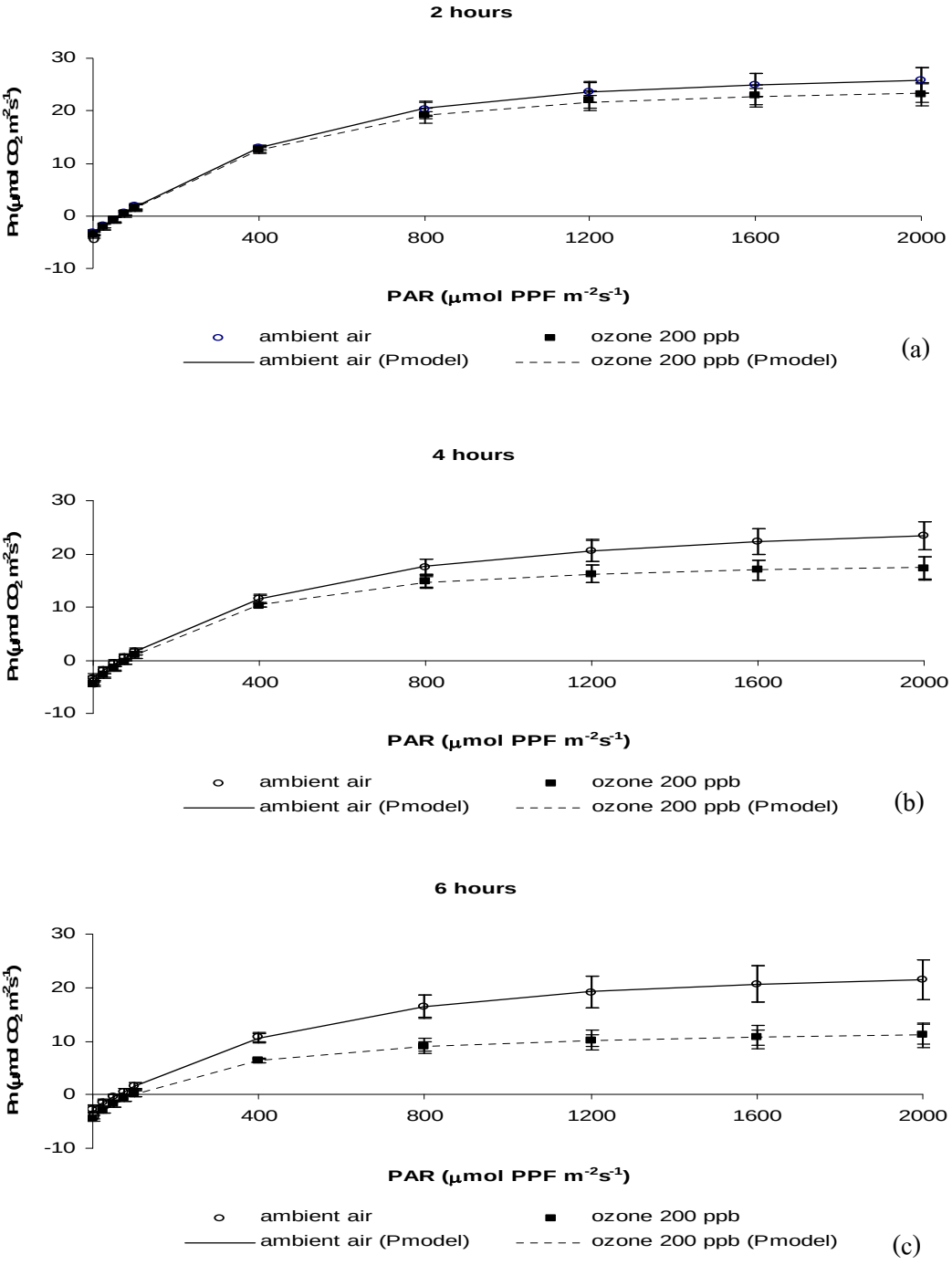


ภาพที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของ O_3 ใน chamber อากาศปกติ และใน chamber ที่เพิ่ม O_3

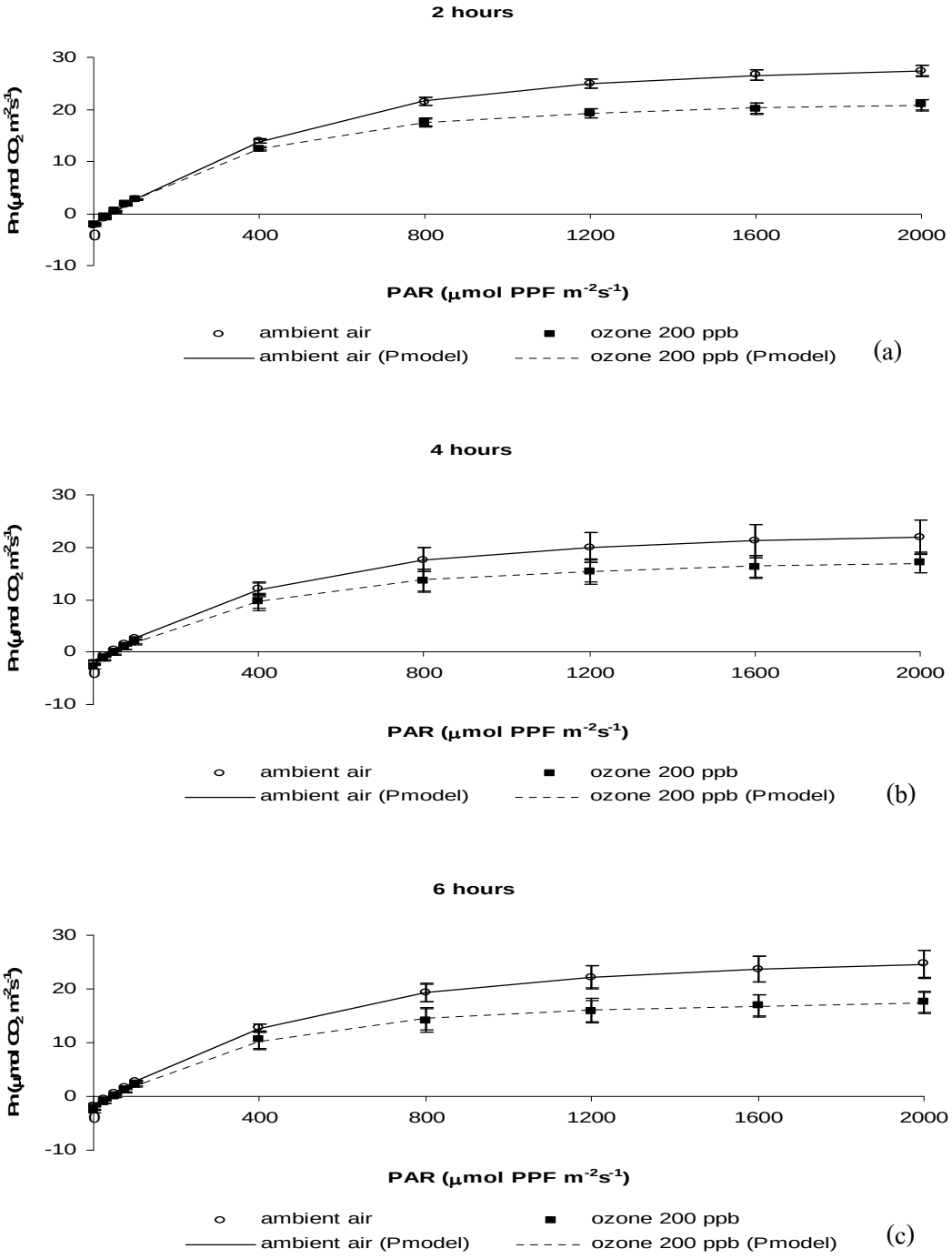
2. การตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (Light response curve) ของใบถั่ว

จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ในใบถั่วทั้ง 3 ชนิด พบว่า การตอบสนองต่อแสงของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด ที่ได้รับสภาพอากาศปกติ หรือ อากาศที่เพิ่ม O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงความเข้มแสงต่ำค่า P_n น้อยกว่าศูนย์ เพราะใบถั่วทั้ง 3 ชนิดมีอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) มากกว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้น ใบถั่วทั้ง 3 ชนิด มีค่า P_n เพิ่มมากขึ้น จนกระทั้งค่า P_n เป็นศูนย์ ซึ่งเป็นความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (light compensation point, LCP) จึงทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเป็นศูนย์ และเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นอีก ค่า P_n ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งเมื่อความเข้มแสงอยู่ในช่วง 800-2,000 μmol PPF m^{-2} s^{-1} ค่า P_n ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด จะเริ่มคงที่ เนื่องจากความเข้มแสงเข้าสู่ช่วงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงอิ่มตัว (light saturation point, LSP) (ภาพที่ 2 3 และ 4)

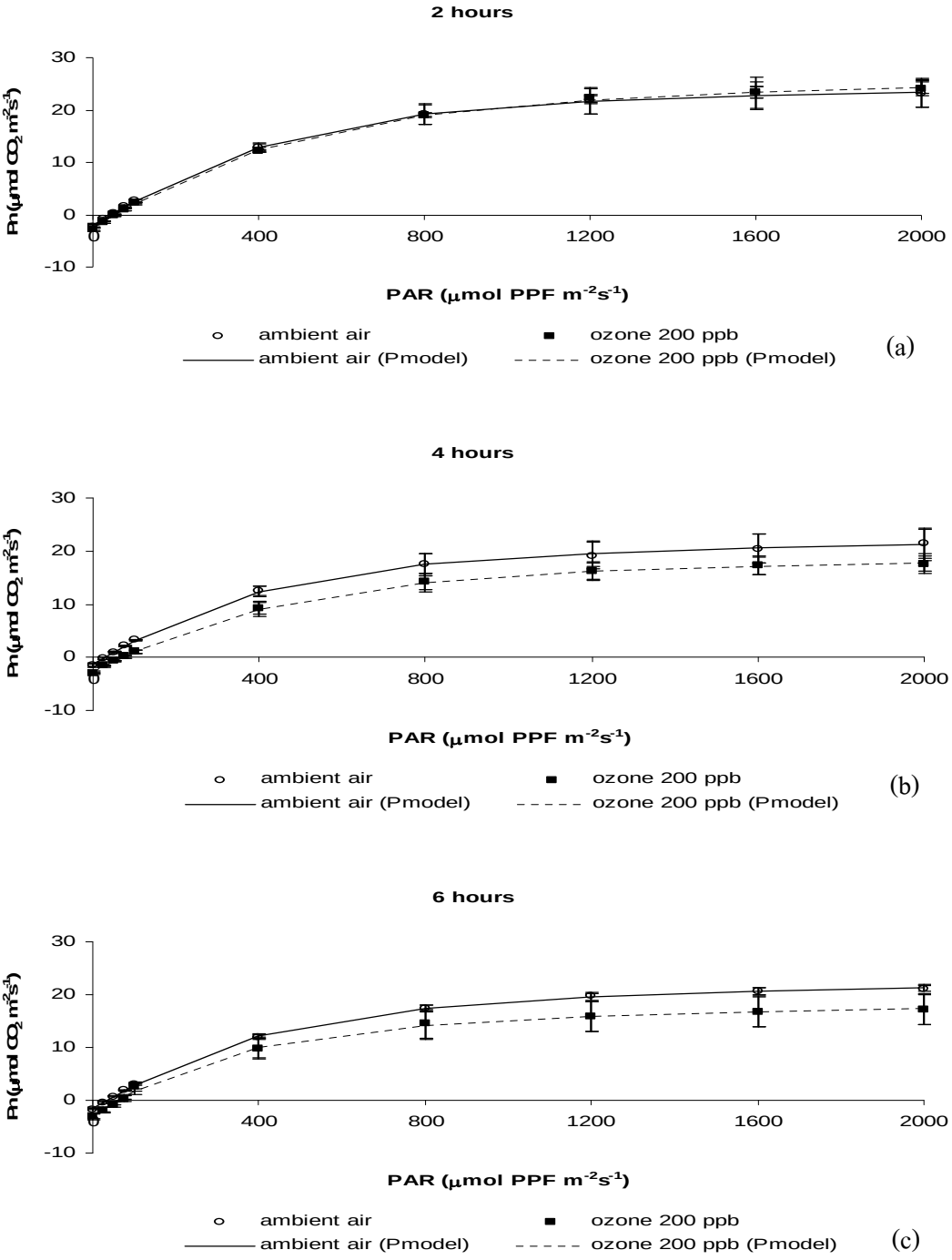
การตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชแต่ละชนิดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ดวงรัตน์ และคณะ (2548) โดยในสภาพความเข้มของแสงน้อย แสงเป็นปัจจัยจำกัดของการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสงอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงจะเพิ่มขึ้นมาก แต่ในสภาพความเข้มของแสงมาก แสงไม่ใช่ปัจจัยจำกัดของการสังเคราะห์ด้วยแสง แต่อาจมีปัจจัยอื่นๆ เป็นปัจจัยจำกัด เช่น ปริมาณเอนไซม์ต่าง ๆ และ electron transport capacity ซึ่งมีอิทธิพลต่อการสร้าง RuBP หมุนเวียนขึ้นใหม่ซึ่งจะศึกษาได้จากการตอบสนองของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศ (พูนพิภพ, 2549)



ภาพที่ 2 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 3 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงระบบเปิด และค่าที่ประเมินจากสมการ non-retangular hyperbola (P_{model}) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด ภายหลังได้รับอากาศปกติ หรืออากาศที่มี O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า O_3 มีแนวโน้มทำให้การตอบสนองต่อแสงของ P_n เปลี่ยนแปลงในใบถั่วทั้ง 3 ชนิดที่ศึกษา ทุกระยะเวลาความยาวนานที่ใบถั่วได้รับ O_3 เมื่อเทียบกับใบถั่วที่ได้รับอากาศปกติ (ภาพที่ 4 5 และ 6) จึงได้แยกวิเคราะห์อิทธิพลของ O_3 ต่อ ค่า R_d ค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ค่าความชันเริ่มต้นของการตอบสนองต่อแสง (initial slope) และค่า LCP เปลี่ยนแปลงไปจากใบถั่วภายหลังการได้รับอากาศปกติดังนี้

ค่าอัตราการหายใจในที่มืด (dark respiration rate, R_d) ของใบถั่ว

อัตราการหายใจในที่มืดของใบ คือ อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในความมืด ซึ่งเป็นผลมาจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากใบพืชเนื่องมาจากการหายใจ โดยไม่มีการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการสังเคราะห์ด้วยแสง ผลการทดลองในถั่วเขียว พบว่าใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า R_d ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 4) โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า R_d อยู่ในช่วง 2.85-3.47 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเขียว ที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า R_d อยู่ในช่วง 3.63-4.43 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนผลการทดลองในถั่วเหลือง พบว่า ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่า R_d ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า R_d อยู่ในช่วง 2.05-2.10 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า R_d อยู่ในช่วง 2.25-2.66 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ในขณะที่ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า R_d มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 มีค่า R_d มากกว่าใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ (2.72 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ เทียบกับ 1.77 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ) (ตารางที่ 5) และผลการทดลองในถั่วลิสง พบว่า ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง มีค่า R_d ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง พบความแตกต่างของ R_d ทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 มีค่า R_d มากกว่าใบถั่วลิสงที่ได้รับอากาศปกติประมาณเกือบหนึ่งเท่าตัว ทั้งในใบถั่วที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง (3.02 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ เทียบกับ 1.55 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$) และ 6 ชั่วโมง (3.04 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 1.73 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$) (ตารางที่ 6)

จากผลการทดลองในใบถั่วทั้ง 3 ชนิด O_3 ที่ใบถั่วได้รับเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีอิทธิพลทำให้อัตราการหายใจของใบมีแนวโน้มมากกว่าใบที่ได้รับอากาศปกติ แม้ในถั่วเขียวไม่พบความแตกต่างกันของค่า R_d ทางสถิติ แต่พบความแตกต่างของค่า R_d ในใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลายาวนาน 6 ชั่วโมง และในใบถั่วลิสง ที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลายาวนาน 4-6 ชั่วโมง (ตารางที่ 4 5 และ 6) ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับ Lee (1967) ซึ่งพบว่า เมื่อใบยาสูบได้รับ O_3 ความเข้มข้น 4 ppm จะทำให้อัตราการหายใจมีแนวโน้มลดลงหลังจากได้รับ O_3 ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง แต่ภายหลังจากนั้นอัตราการหายใจกลับมีค่าสูงขึ้น และ Heath (1994) ยังพบว่าพืชพันธุ์ที่ทนทานต่อ O_3 จะมีกลไกในการลดความเสียหาย โดยลดค่า stomatal conductance เพื่อลดการดูด O_3 เข้าไปในเซลล์ และมีการเพิ่มอัตราการหายใจให้สูงขึ้น เพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจาก O_3

ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ของใบถั่วที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$

ผลการศึกษาอิทธิพลของ O_3 ต่อค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ของใบถั่วที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ พบว่า ในถั่วเขียว ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังจากได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 23.44-25.84 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ในขณะที่ใบที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 17.24-23.12 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ แต่ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ มีค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ มากถึง 21.52 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ เมื่อเทียบกับใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 ซึ่งมี P_n เพียง 11.28 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 4) ผลการทดลองในถั่วเหลือง พบว่าใบถั่วเหลือง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองที่ได้รับอากาศปกติมีค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ มากกว่าใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 คือ 27.40 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ เทียบกับ 20.90 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ที่ระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง) และ 24.68 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ เทียบกับ 17.14 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ที่ระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง) ตามลำดับ แต่พบว่า ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติของค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 5)

ผลการทดลองในถั่วลิสง พบว่า ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n ที่ความเข้มแสง 2,000 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 21.10-21.54 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วลิสงภายหลังได้รับ O_3 เป็นระยะยาวนาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 17.18-23.14 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 6)

จากการทดลองในถั่วทั้ง 3 ชนิด P_n ของใบที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 หรือ 6 ชั่วโมง มีแนวโน้มน้อยกว่าใบที่ได้รับอากาศปกติ แม้ในถั่วลิสงไม่พบความแตกต่างกันของค่า P_n ทางสถิติ โดยพบความแตกต่างของค่า P_n เฉพาะในถั่วเขียว และถั่วเหลือง (ตารางที่ 4 5 และ 6) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Vandermeiren และคณะ (2002) ที่พบว่า O_3 สามารถลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชแตกต่างกันออกไปโดยขึ้นกับลักษณะทางพันธุกรรมของพืช โดยพบว่า O_3 ความเข้มข้น 11 μl $l^{-1}hr^{-1}$ มีผลทำให้ต้นมันฝรั่งมีค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงร้อยละ 4 นอกจากนี้ Kleier และคณะ (2001) และ Guidi และคณะ (2002) พบว่า O_3 ความเข้มข้น 70-80 ppb สามารถลดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในแรชดิช ถั่วพินโต และต้นโอ๊ค และ Paul และคณะ (2003) พบว่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของต้น *Pinus ponderosa* ลดลง เนื่องจาก O_3 ไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ ribulose bisphosphate carboxylase (Rubisco) เช่นเดียวกับในถั่วเหลือง และ อรอุมา (2548) ได้ทดลองให้ O_3 ความเข้มข้น 300 ppb ในใบส้มเขียวหวาน มะเขือเทศ และคะน้า ที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าพืชทั้งสามชนิดมีการตอบสนองของอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซแตกต่างกัน ซึ่งค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบที่ได้หลังจากรมมลพิษจะมีค่าน้อยกว่าก่อนนำใบไปรมด้วยมลพิษ

ตารางที่ 4 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			R_d (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	25.84±2.39	23.44±2.59	21.52±3.69	3.21±0.49	3.47±0.59	2.85±0.67
Ozone	23.12±1.85	17.24±2.12	11.28±2.28	3.63±0.48	4.41±0.64	4.43±0.56
P-value	0.39	0.10	0.04	0.55	0.31	0.11
T-test	ns [1/]	ns	*	ns	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 5 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			R_d (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	27.40±1.05	21.93±3.32	24.68±2.56	2.10±0.20	2.05±2.66	1.77±0.16
Ozone	20.90±0.94	17.54±2.01	17.14±1.99	2.25±0.18	2.66±0.42	2.72±0.31
P-value	<0.01	0.29	0.05	0.58	0.23	0.03
T-test	** [1/]	ns	*	ns	ns	*

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) และค่าอัตราการหายใจในที่มืด (R_d) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			R_d (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	24.10±2.65	21.54±2.88	21.14±0.51	2.24±0.36	1.55±0.28	1.73±0.25
Ozone	23.14±1.26	17.44±1.61	17.18±2.89	2.83±0.25	3.02±0.29	3.04±0.47
P-value	0.75	0.25	0.21	0.21	<0.01	0.04
T-test	ns [1/]	ns	ns	ns	**	*

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

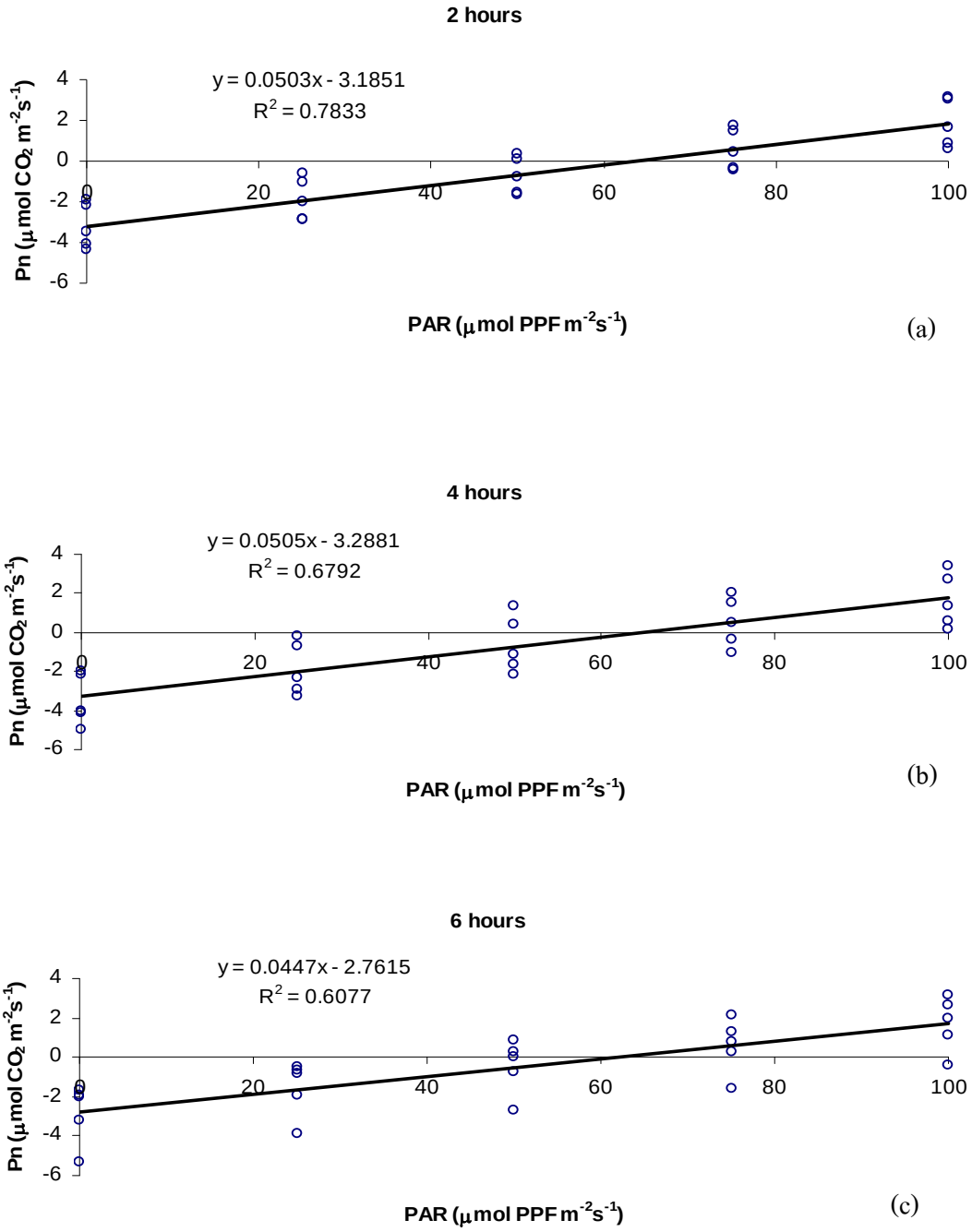
*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ค่าความชันเริ่มต้นของกราฟการตอบสนองต่อแสง

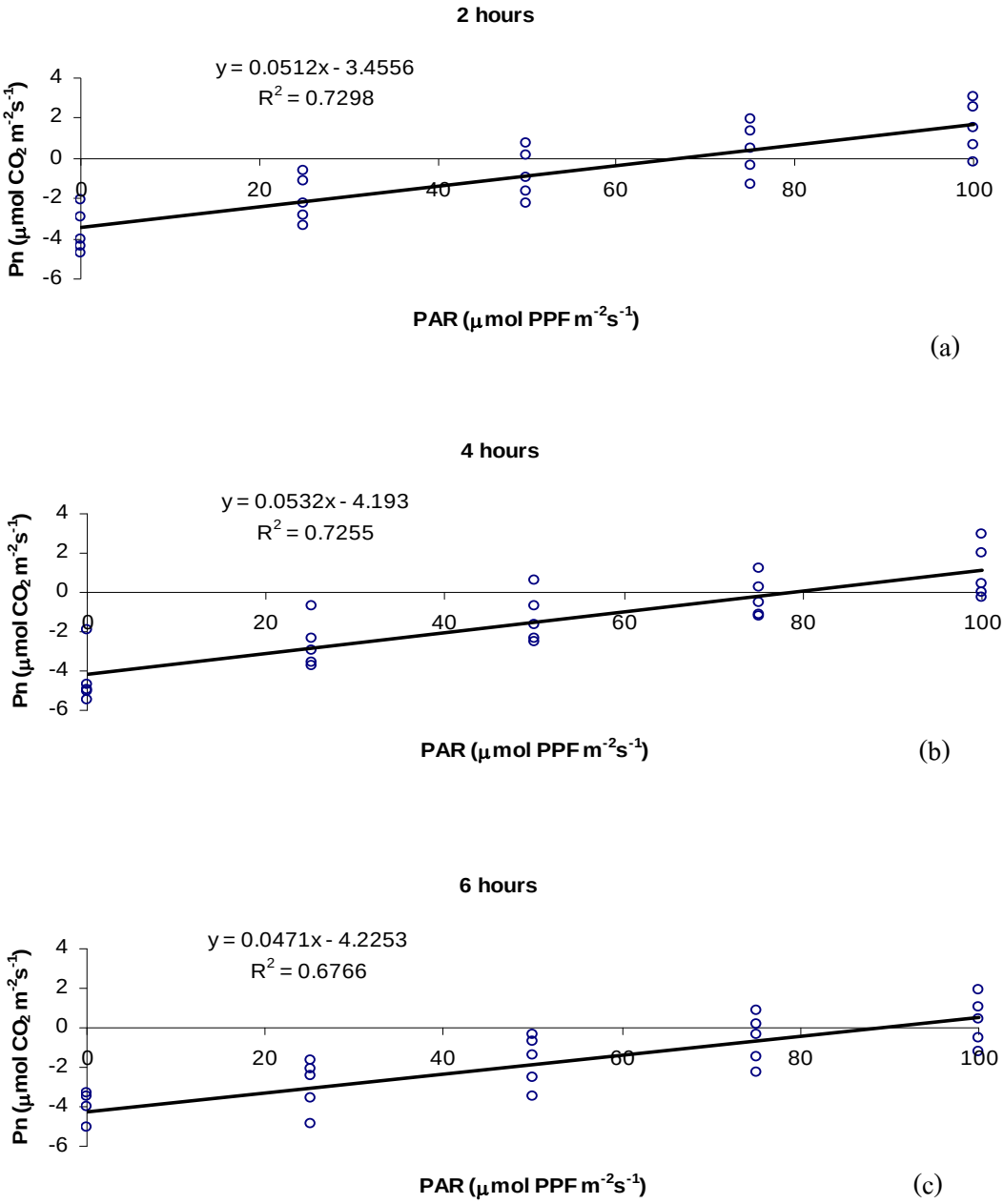
ค่าความชันเริ่มต้นของกราฟการตอบสนองต่อแสง (initial slope) คือค่าที่บอกว่าเมื่อระดับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ใบพืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นกี่หน่วย เป็นค่าที่ประเมินได้จากข้อมูลอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่วัดได้จากใบถั่วในช่วงความเข้มแสง 0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ภาพที่ 5 6 7 8 9 และ 10) จากการทดลองพบว่า ใบถั่วเขียว ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า initial slope ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.045-0.050 mol CO_2 mol^{-1} PPF ส่วนใบถั่วเขียว ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.047-0.053 mol CO_2 mol^{-1} PPF (ตารางที่ 7) ผลการทดลองในถั่วเหลือง พบว่า ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า initial slope ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.046-0.050 mol CO_2 mol^{-1} PPF ส่วนใบถั่วเหลือง ภายหลังการได้รับอากาศที่มี O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.047-0.049 mol CO_2 mol^{-1} PPF (ตารางที่ 8)

ผลการทดลองในถั่วลิสง พบว่า ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติและ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า initial slope ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.047-0.048 mol CO_2 mol^{-1} PPF ส่วนใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า initial slope อยู่ในช่วง 0.040-0.054 mol CO_2 mol^{-1} PPF (ตารางที่ 9)

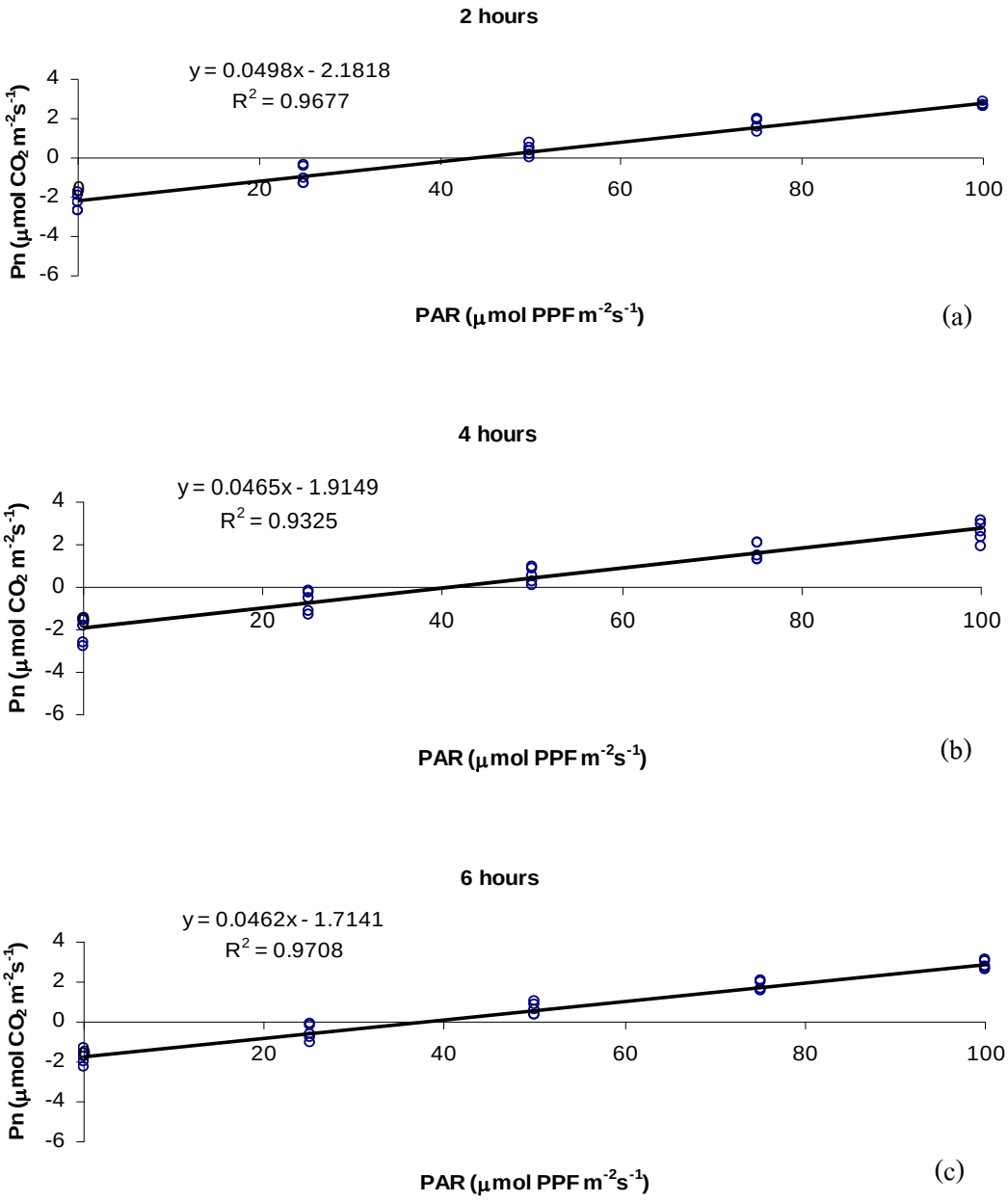
ในช่วงต้นของการตอบสนองต่อแสงที่ความเข้มแสงน้อยอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบถั่วเขียว ถั่วเหลือง และถั่วลิสง ทั้งภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าเป็นลบ และเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิกับความเข้มแสงในช่วงความเข้มแสงที่ต่ำนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งเหมือนกับ Acock (1991) และอรอุมา (2548) พบว่า การตอบสนองต่อแสงของพืช C_3 จะเป็นลักษณะเส้นตรงที่ระดับความเข้มแสงต่ำแต่มีความชันเริ่มต้นของการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงแตกต่างกันตามแต่ละชนิดของพืช (ภาพที่ 5 6 7 8 9 และ 10) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลร่วมระหว่าง ปัจจัยภายในพืช ได้แก่ อายุของใบ ลักษณะโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของใบ ความหนาของชั้นคิวตินบนผิวใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ stomatal conductance ความหนาแน่นของปากใบ และปริมาณพื้นที่ผิวใบทั้งหมด (อักษร, 2529) และปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ แสง อุณหภูมิ ปริมาณธาตุอาหารที่พืชได้รับ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และออกซิเจนในอากาศ ความชื้นในดิน ตลอดจนโรค และแมลง (สมบุญ, 2537)



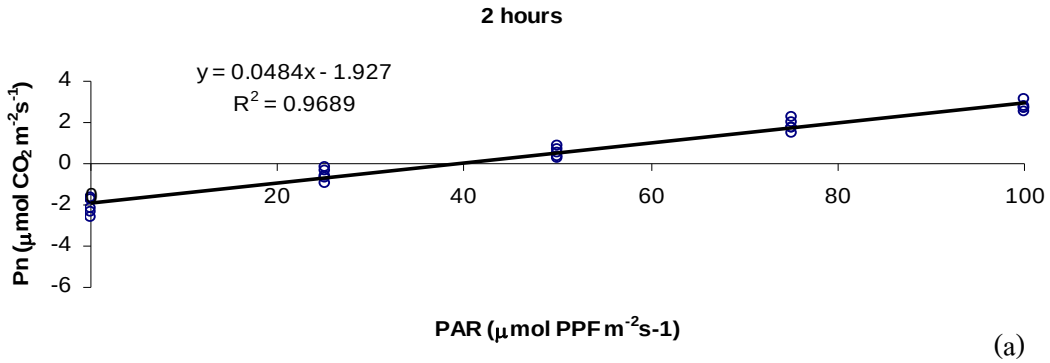
ภาพที่ 5 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



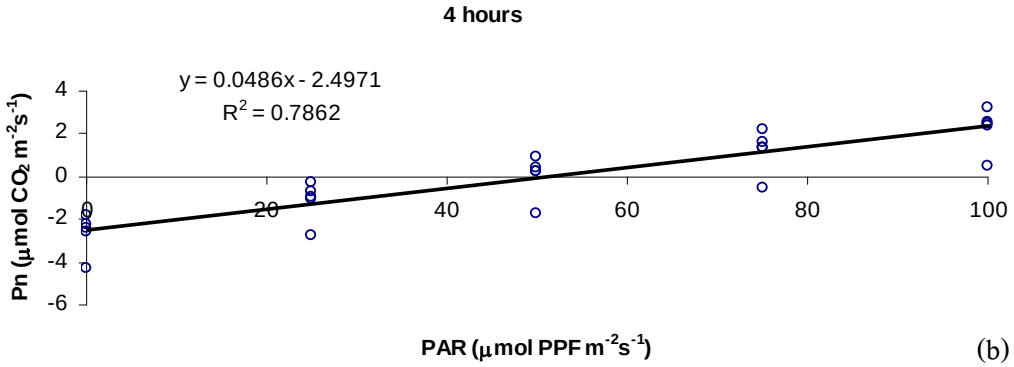
ภาพที่ 6 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



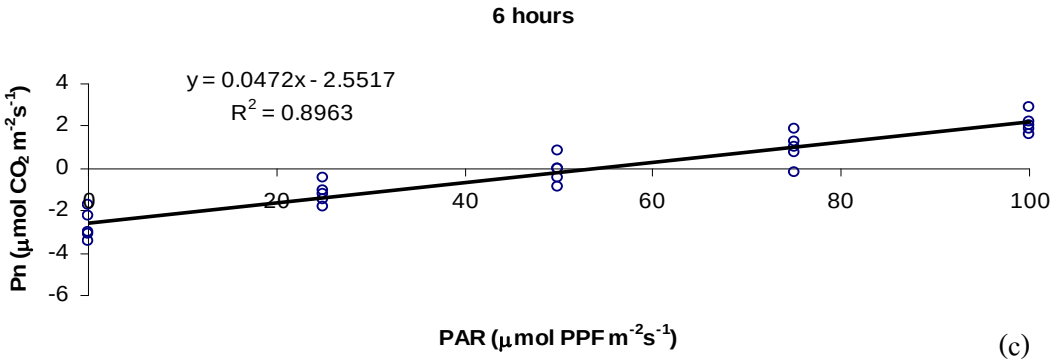
ภาพที่ 7 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



(a)

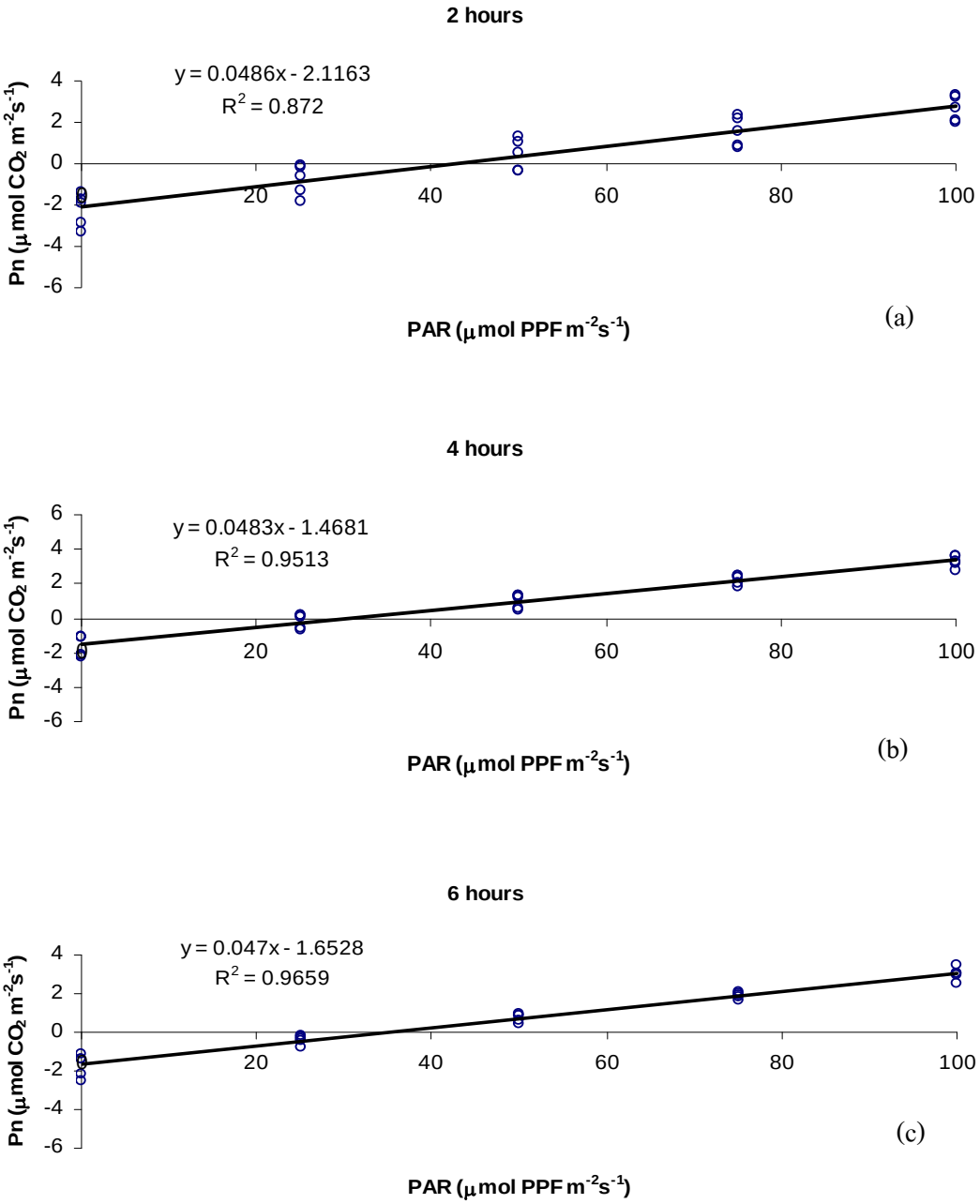


(b)

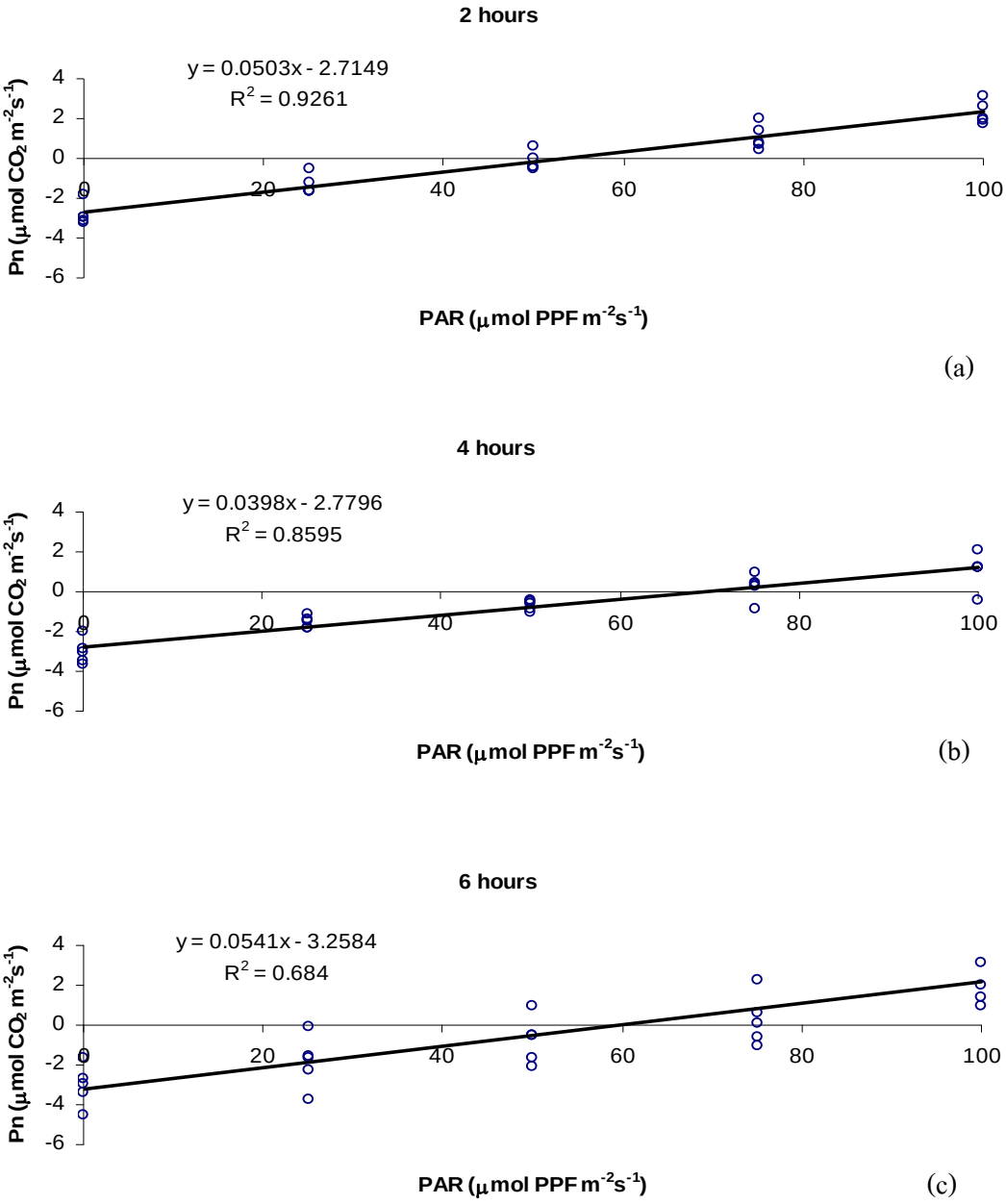


(c)

ภาพที่ 8 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 9 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 10 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงแสง 0-100 µmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ของใบถั่วลิสงพันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

ค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ

ความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงมีค่าเท่ากับอัตราการหายใจ (light compensation point, LCP) เป็นความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเป็นศูนย์ ที่ประเมินได้จากสมการเชิงเส้นของการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มแสงน้อย (0-100 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$) ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด จากผลการศึกษาพบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า LCP ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า LCP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 61-68 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า LCP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 69-90 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 7) ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า LCP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า LCP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 37-43 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า LCP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 39-54 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 8) ในขณะที่ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง มีค่า LCP ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า LCP แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมงมีค่า LCP เป็น 29.8 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ และ 34.6 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ ในขณะที่ใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง มีค่า LCP เป็น 78.3 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ และที่ระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง มีค่า LCP 60.6 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 9)

เนื่องจาก light compensation point (LCP) เป็นความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการตรึง CO_2 โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สามารถชดเชยอัตราการปล่อย CO_2 โดยกระบวนการหายใจได้พอดี ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซ CO_2 สุทธิเป็นศูนย์ (พูนพิภพ, 2549) ดังนั้น LCP จึงขึ้นอยู่กับอัตราการหายใจ และความชันเริ่มต้นของการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่ความเข้มแสงต่ำ (Salisbury and Ross ,1985)

ตารางที่ 7 ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	initial slope (mol CO_2 mol^{-1} PPF)			LCP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	0.050±0.00	0.053±0.00	0.045±0.00	68.6±11.35	65.4±12.12	61.3±12.92
Ozone	0.051±0.00	0.050±0.00	0.047±0.00	68.6±9.27	79.8±10.92	89.9±11.92
P-value	0.55	0.44	0.53	0.75	0.40	0.13
T-test	ns [1/]	ns	ns	ns	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 8 ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	initial slope (mol CO_2 mol^{-1} PPF)			LCP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	0.050±0.00	0.047±0.00	0.046±0.00	43.2±2.97	40.4±4.07	36.6±3.12
Ozone	0.049±0.00	0.048±0.00	0.047±0.00	39.5±2.57	51.4±9.14	54.1±5.55
P-value	0.60	0.60	0.60	0.38	0.30	0.03
T-test	ns [1/]	ns	ns	ns	ns	*

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 9 ค่า initial slope และค่าความเข้มแสงที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (LCP) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	initial slope (mol CO_2 mol^{-1} PPF)			LCP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	0.048±0.00	0.048±0.00	0.047±0.00	43.1±6.58	29.8±4.27	34.6±2.57
Ozone	0.050±0.00	0.040±0.01	0.054±0.01	54.3±5.00	78.3±12.78	60.6±8.16
P-value	0.36	0.27	0.53	0.21	<0.01	0.02
T-test	ns [1/]	ns	ns	ns	**	*

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

เมื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ โดยการใช้สมการ non-retangular hyperbola เป็นแบบจำลองอธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิที่วัดได้จริง ($P_{observed}$) ที่ระดับความเข้มแสงต่าง ๆ ได้ โดยสามารถประเมินค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิจากแบบจำลอง (P_{model}) และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการ non-retangular hyperbola ซึ่งได้แก่ ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (θ) ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิสูงสุด (P_{max}) และค่าความเข้มแสงที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงอิ่มตัว (LSP)

ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ

ค่าควบคุมความโค้งของเส้นกราฟ (convexity parameter, θ) คือค่าที่บอกว่าการตอบสนองต่อแสงจะเข้าสู่ระยะอิ่มตัวช้าหรือโดยเร็ว ซึ่งมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางสรีรวิทยา ที่บอกถึงสัดส่วนระหว่างความต้านทานทางฟิสิกส์ต่อความต้านทานทั้งหมดของใบ จากการทดลองพบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าค่า θ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า θ อยู่ในช่วง 0.58-0.78 ส่วนใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า θ อยู่ในช่วง 0.63-0.78 (ตารางที่ 10 11 และ

12) ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าค่า θ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า θ อยู่ในช่วง 0.69-0.73 ส่วนใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า θ อยู่ในช่วง 0.52-0.73 (ตารางที่ 13 14 และ 15) ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง พบว่าค่า θ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 16) ส่วนถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า θ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า θ อยู่ในช่วง 0.68-0.75 ส่วนใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า θ อยู่ในช่วง 0.42-0.67 (ตารางที่ 16 17 และ 18)

Slack (1974) รายงานว่าค่า θ เป็นค่าความต้านทานฟิสิกส์ต่อความต้านทานทั้งหมดของใบ จากการทดลอง ไม่พบอิทธิพลของ O_3 ต่อค่า θ ในใบถั่วทั้ง 3 ชนิด บ่งชี้ว่า O_3 ไม่มีอิทธิพลทำให้ความต้านทานฟิสิกส์ต่อความต้านทานทั้งหมดของใบเปลี่ยนแปลง (ตารางที่ 10 11 12 13 14 15 16 17 และ 18)

อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิสูงสุด

จากการทดลองพบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิสูงสุด (maximum photosynthesis rate, P_{max}) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 27.38-31.75 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนถั่วเขียวภายหลังการได้รับ O_3 มีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 16.70-29.19 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 10 11 และ 12) ใบถั่วเหลือง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง มีค่า P_{max} แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า P_{max} มากกว่าใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับ O_3 คือ 32.92 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 24.46 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 13) ส่วนใบถั่วเหลือง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_{max} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 26.15-29.33 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 21.49-22.67 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 14 และ 15) ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_{max} ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4

และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 25.15-27.62 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_{max} อยู่ในช่วง 22.65-30.45 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 16 17 และ18)

การได้รับ O_3 เป็นระยะเวลาหนึ่งมีอิทธิพลทำให้ P_{max} ของใบถั่วเปลี่ยนแปลงได้ เป็นข้อบ่งชี้ว่า O_3 มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งสอดคล้องกับ อรอุมา (2548) ที่พบว่าใบมะเขือเทศ ใบคะน้า และใบส้ม เมื่อได้รับการรมด้วยอากาศที่ O_3 (300 ppb) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง 60 ถึง 82 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลงอาจจะเป็นผลจากการปิดของปากใบ ซึ่งทำให้ก๊าซ CO_2 สามารถเคลื่อนสู่ภายในเซลล์ภายในใบได้ลดน้อยลงด้วย นอกจากนี้ O_3 อาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของ photosynthetic characteristic เช่น การลดลงของ Rubiso protein level (Sassenrath-Cole *et. al*., 1996) การสลายตัวของกรานาและรงควัตถุในคลอโรพลาสต์ (Salisbury and Ross, 1985) การลดลงของการทำงานของ Rubisco (Reid *et.al*, 1998 and Paul *et. al.,* 2003)

ความเข้มแสงที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงอิ่มตัว

ความเข้มแสงที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเข้าสู่ระยะอิ่มตัว (light saturation point, LSP) จากการทดลองพบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า LSP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 919-1,008 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 737-822 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 10 11 และ 12) ส่วนใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า LSP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 888-969 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 840-980 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 13 14 และ15) และใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า LSP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 835-874

μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีค่า LSP อยู่ในช่วงความเข้มแสง 876-942 μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 16 17 และ 18)

Constable และ Rawson (1980) พบว่า เมื่อใบฝ้ายที่มีอายุเพิ่มขึ้นจะมีค่า P_{max} ลดลง จะทำให้ค่า LSP ลดลงเช่นกัน เช่นเดียวกับอรอุมา (2548) ที่พบว่า มะเขือเทศที่ได้รับ O_3 ความเข้มข้น 300 ppb เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำให้ค่า P_{max} และ LSP ลดลง และยังมีงานวิจัยที่พบว่า มะเขือเทศที่ได้รับ O_3 ความเข้มข้น 150 ppb เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ค่า LSP และ ค่า P_{max} ลดลงและหลังจากนั้น 24 ชั่วโมง มี LSP และ P_{max} เพิ่มกลับคืนมาเป็นปกติ แต่ในพันธุ์ที่อ่อนแอ ไม่สามารถกลับมาปกติได้ (Guidi *et. al.*, 2005)

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.78±0.01	31.8±3.30	919±95.47
Ozone	0.78±0.05	29.2±2.88	822±72.74
P-value	0.95	0.57	0.44
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 11 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.58±0.12	31.0±4.18	1008±120.45
Ozone	0.76±0.04	23.1±3.02	737±110.00
P-value	0.20	0.16	0.14
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเขียวพันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.70±0.04	27.4±5.38	933±108.73
Ozone	0.63±0.10	16.7±3.50	792±152.59
P-value	0.55	0.13	0.47
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.73±0.02	32.9±1.44	969±19.65
Ozone	0.73±0.06	24.5±1.54	840±89.52
P-value	0.96	<0.01	0.20
T-test	ns [1/]	**	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.70±0.02	26.2±1.96	887±74.68
Ozone	0.52±0.22	21.5±4.05	935±138.41
P-value	0.43	0.33	0.77
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 15 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.69±0.08	29.3±3.21	967±68.71
Ozone	0.52±0.63	22.7±1.33	980±110.34
P-value	0.30	0.09	0.91
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.75±0.07	27.6±3.20	835±79.41
Ozone	0.67±0.05	30.4±2.03	942±78.67
P-value	0.38	0.48	0.36
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากสมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.72±0.05	25.2±3.40	874±108.29
Ozone	0.62±0.17	22.7±1.99	925±88.57
P-value	0.60	0.55	0.72
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 18 ค่าพารามิเตอร์ที่ประเมินได้จากมการ non-rectangular hyperbola ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factors	Parameters value		
	θ	P_{max} (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)	LSP (μmol PPF $m^{-2}s^{-1}$)
Ambient air	0.68±0.04	25.2±0.54	874±108.29
Ozone	0.42±0.27	22.6±3.04	877±117.85
P-value	0.38	0.44	0.98
T-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

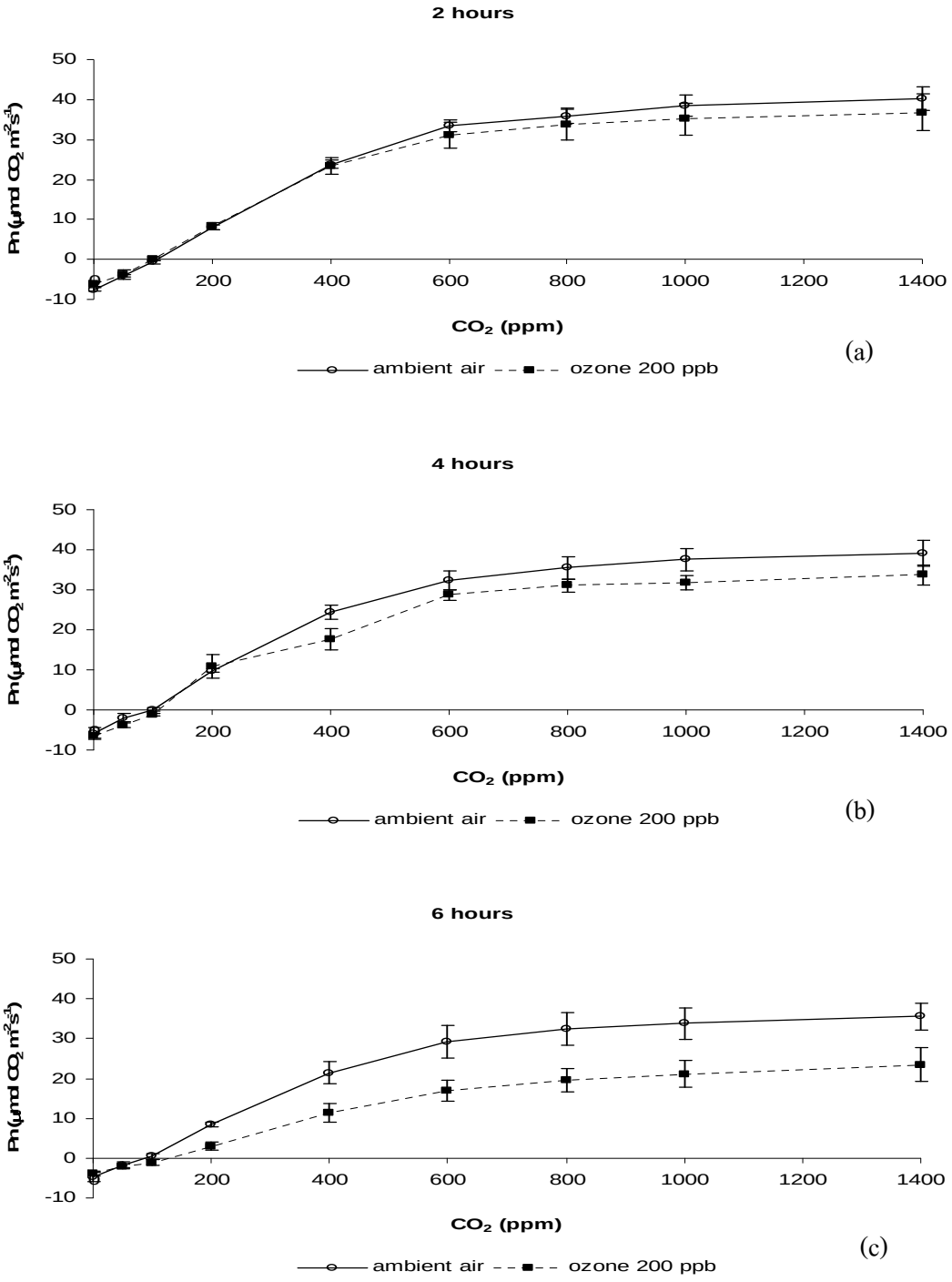
3. การตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในอากาศของการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (CO_2 response curve) ของใบถั่ว

จากการศึกษาการตอบสนองต่อความเข้มข้นของ CO_2 ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด พบว่า ใบถั่วทั้ง 3 ชนิด ภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีลักษณะการตอบสนองตอบสนองต่อความเข้มข้นของ CO_2 ในรูปแบบคล้ายคลึงกัน โดยในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 ต่ำ ค่า P_n ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิดมีค่าติดลบ แต่เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มมากขึ้น ใบถั่วทั้ง 3 ชนิด จะมีค่า P_n สูงขึ้น จนกระทั่งมีค่า P_n เท่ากับศูนย์ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compesation point) แต่เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มมากขึ้นอีก ค่า P_n ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ CO_2 ที่มากขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 เพิ่มมากขึ้นกว่า 600 ppm ค่า P_n จะเริ่มคงที่หรือเข้าสู่ระยะอิ่มตัว โดยภาพรวมการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความเข้มข้นของ CO_2 ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิดภายหลังการได้รับอากาศปกติกับใบได้รับ O_3 พบว่า O_3 ทำให้การตอบสนองต่อ CO_2 ของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ของใบถั่วทั้ง 3 ชนิดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับใบถั่วทั้ง 3 ชนิด ที่ได้รับอากาศปกติ

ผลการทดลองในถั่วเขียว พบว่า แนวโน้มของค่า P_n ของใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 จะลดลงที่ทุกความเข้มข้นของ CO_2 และทุกระยะเวลาที่ใบถั่วเขียวได้รับ O_3 โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 ประมาณ 600 ppm ส่วนที่ระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm ส่วนที่ระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 200 ppm (ภาพที่ 11)

เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm ของใบถั่วเขียว ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm อยู่ในช่วง 23.80-24.40 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm อยู่ในช่วง 17.63-23.34 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะ

เวลานาน 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n มากกว่าใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง คือ 21.46 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 11.31 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 1,400 ppm พบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง ค่า P_n ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 39.18-40.26 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n อยู่ในช่วง 33.72-36.84 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ แต่ใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n มากกว่าใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง คือ 35.58 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 23.50 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ (ตารางที่ 19)



ภาพที่ 11 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 19 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	CO_2 400 ppm			CO_2 1,400 ppm		
	P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	23.80±0.94	24.40±1.06	21.46±2.87	40.26±4.53	39.18±3.05	35.58±3.29
Ozone	23.34±1.99	17.63±1.16	11.31±2.30	36.84±2.93	33.72±2.53	23.50±4.12
P-value	0.84	0.07	0.03	0.54	0.73	0.05
T-test	ns [1/]	ns	*	ns	ns	*

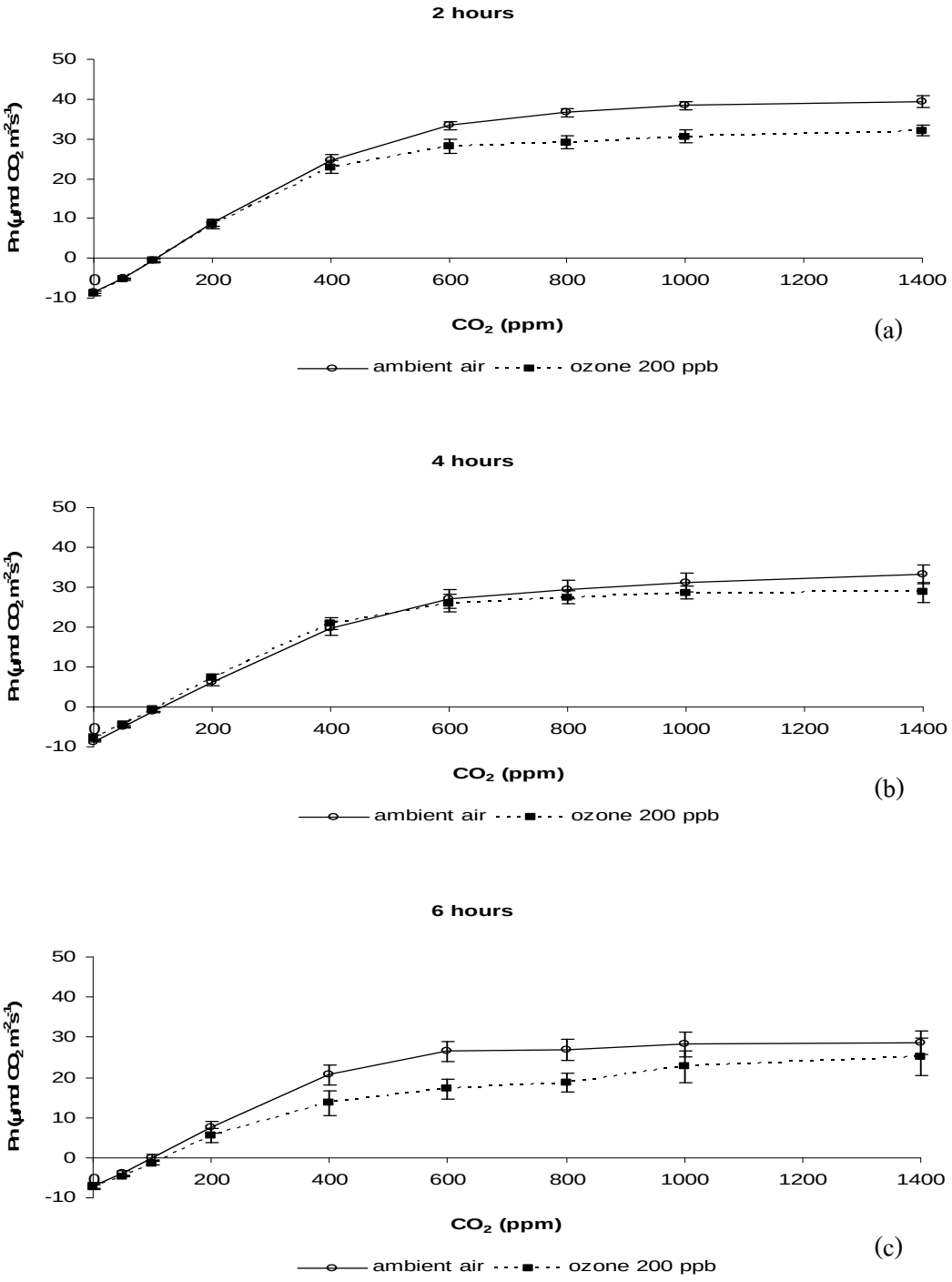
[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองในถั่วเหลือง พบว่า แนวโน้มของค่า P_n ของใบถั่วเหลืองภายหลังได้รับ O_3 จะลดลงที่ทุกความเข้มข้นของ CO_2 และทุกระยะเวลาความยาวนานที่ใบถั่วเหลืองได้รับ O_3 โดยพบว่า ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 400-600 ppm ส่วนที่ระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 600 ppm ส่วนที่ระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 100-200 ppm (ภาพที่ 12)

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของ O_3 ต่อค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm พบว่าใบถั่วเหลืองภายหลังจากได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm อยู่ในช่วง 20.66-22.92 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ส่วนใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm อยู่ในช่วง 13.67-24.66 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$

ค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 1,400 ppm ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง จะมีค่า P_n มากกว่าใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง คือ 39.42 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 32.08 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ ในขณะที่ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 1,400 ppm เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง กลับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเนื่องจากค่า P_n มีความแปรปรวนมาก โดยใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n อยู่ในช่วง 28.54-33.12 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า P_n อยู่ในช่วง 25.22-28.82 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 20)



ภาพที่ 12 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 20 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

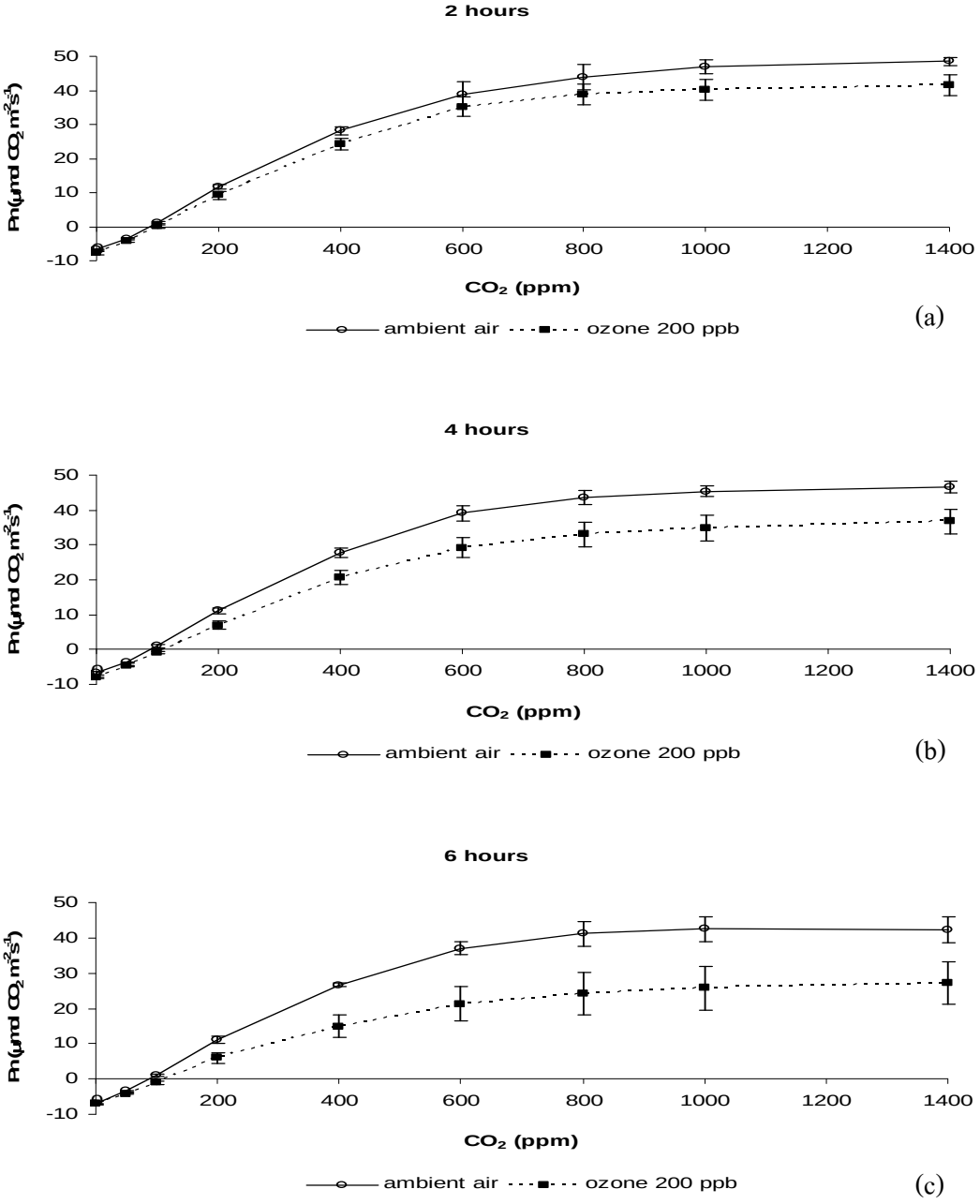
Factor	CO_2 400 ppm			CO_2 1,400 ppm		
	P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)			P_n (μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$)		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	22.92±1.40	20.92±1.45	20.66±2.47	39.42±1.49	33.12±2.38	28.54±2.93
Ozone	24.66±1.55	19.78±1.77	13.67±3.09	32.08±1.26	28.82±2.50	25.22±4.93
P-value	0.43	0.63	0.16	<0.01	0.25	0.56
t-test	ns [1/]	ns	ns	**	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองในถั่วลิสง พบว่า แนวโน้มของค่า P_n ของใบถั่วลิสงภายหลังได้รับ O_3 จะมีแนวโน้มลดลงที่ทุกความเข้มข้นของ CO_2 และทุกระยะเวลาที่ใบถั่วลิสงได้รับ O_3 โดยใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 200 ppm เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 100-200 ppm ส่วนระยะเวลาที่ 6 ชั่วโมง จะเริ่มพบความแตกต่างของค่า P_n ที่ความเข้มข้นของ CO_2 100-200 ppm (ภาพที่ 13) และเมื่อพิจารณาค่า P_n ของใบถั่วลิสงที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm เปรียบเทียบภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง จะมีค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm ซึ่งมากกว่าใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 โดยมีค่า P_n เปรียบเทียบคือ 27.80 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 20.52 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ และใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง จะมีค่า P_n มากกว่าใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 โดยมีค่า P_n เปรียบเทียบคือ P_n คือ 26.66 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และ 14.91 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า P_n ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 1,400 ppm ของใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า P_n มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมงมีค่า P_n คือ 46.72 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ซึ่งมากกว่าใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า P_n คือ 36.76 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ และใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง มีค่า P_n คือ 42.44 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ ซึ่งมากกว่าใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง ซึ่งมีค่า P_n คือ 27.18 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$ (ตารางที่ 21)



ภาพที่ 13 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิต่อการตอบสนองต่อปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 21 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 400 และ 1,400 ppm ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	CO_2 400 ppm			CO_2 1,400 ppm		
	P_n (μmol CO_2 m^{-2} s^{-1})			P_n (μmol CO_2 m^{-2} s^{-1})		
	2 hours	4 hours	6 hours	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	28.18±1.68	27.80±1.44	26.66±0.58	48.54±1.24	46.72±1.75	42.44±3.68
Ozone	24.36±1.07	20.52±2.02	14.91±3.19	41.42±3.04	36.76±3.66	27.18±5.97
P-value	0.09	0.02	<0.01	0.06	0.04	0.03
t-test	ns [1/]	*	**	ns	*	*

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

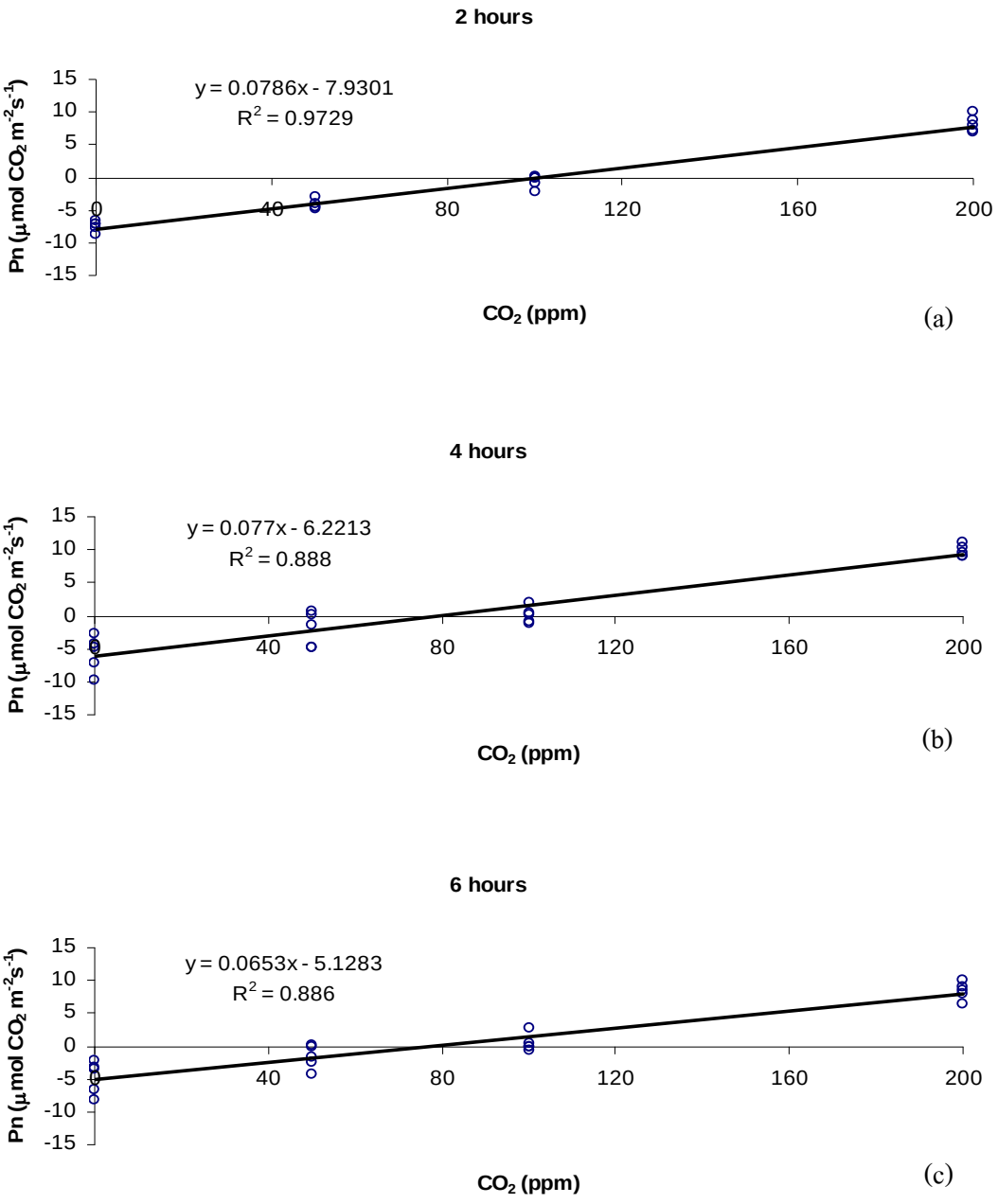
ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ

ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) คำนวณจากสมการเชิงเส้นของการตอบสนองต่อความเข้มข้น CO_2 ของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 น้อยกว่า 200 ppm (ภาพที่ 14 15 16 17 18 และ 19) ผลการทดลองพบว่า ใบถั่วเขียวภายหลังจากได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง มีค่า CO_2 compensation point แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วเขียวที่ได้รับอากาศปกติจะมีความเข้มข้นของ CO_2 ที่จะทำให้ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ (93 ppm) ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับใบถั่วเขียวที่ได้รับ O_3 (101 ppm) ส่วนถั่วเขียวภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ค่า CO_2 compensation point ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 22)

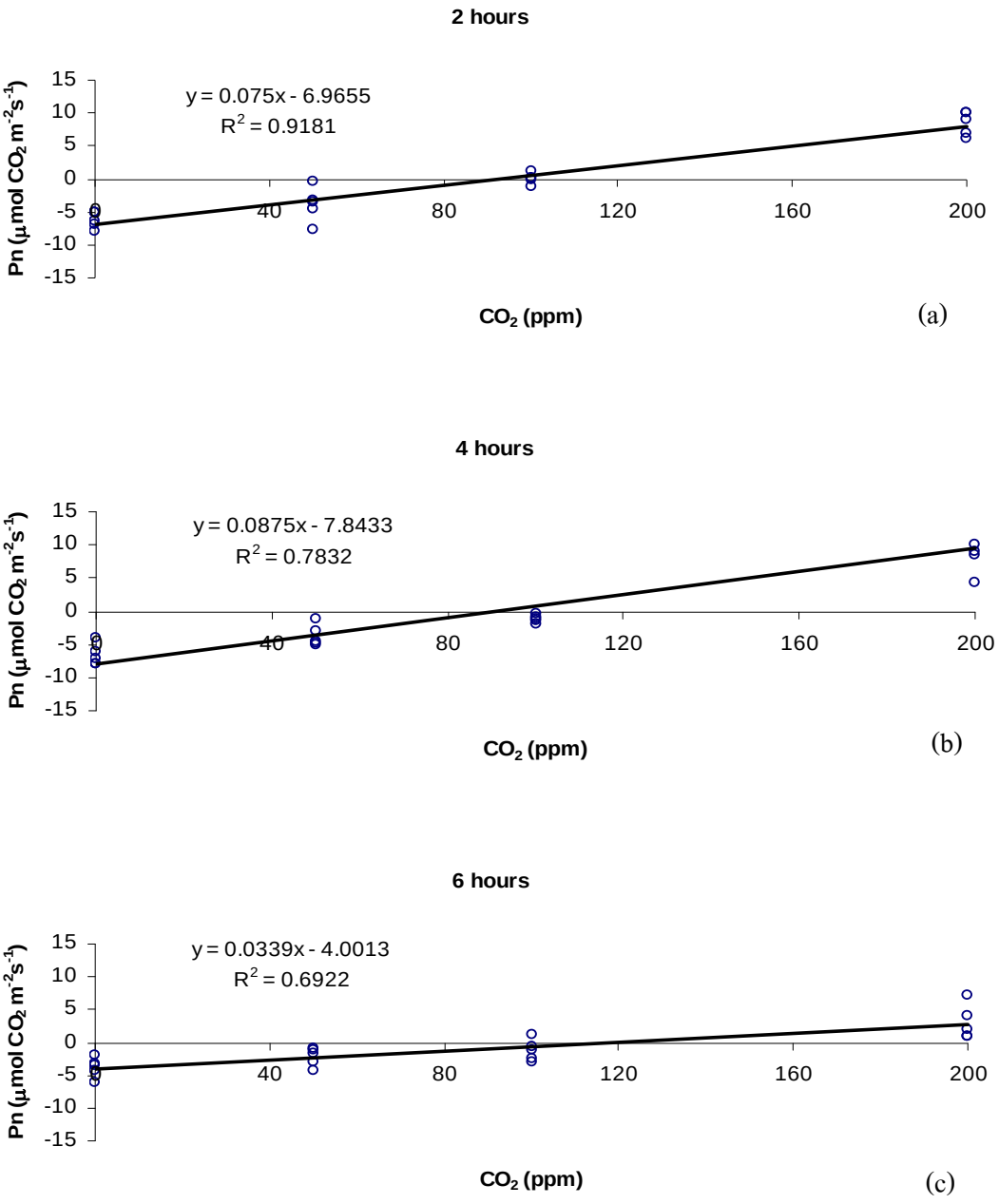
ใบถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่า CO_2 compensation point ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วเหลืองภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า CO_2 compensation point อยู่ในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 101.49-106.99 ppm ส่วนใบถั่วเหลืองที่ได้รับ O_3 มีค่า CO_2 compensation point อยู่ในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 102.58-133.85 ppm (ตารางที่ 23)

ใบถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่า CO_2 compensation point ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยถั่วลิสงภายหลังการได้รับอากาศปกติมีค่า CO_2 compensation point อยู่ในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 80.44-83.01 ppm ส่วนใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 มีค่า CO_2 compensation point อยู่ในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 96.74-111.08 ppm แต่ถั่วลิสงที่ได้รับอากาศปกติ หรือ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง มีค่า CO_2 compensation point แตกต่างกันทางสถิติ โดยใบถั่วลิสงที่ได้รับอากาศปกติมีความเข้มข้นของ CO_2 ที่จะทำให้ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิเท่ากับอัตราการหายใจ (83 ppm) ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับใบถั่วลิสงที่ได้รับ O_3 (120 ppm) (ตารางที่ 24)

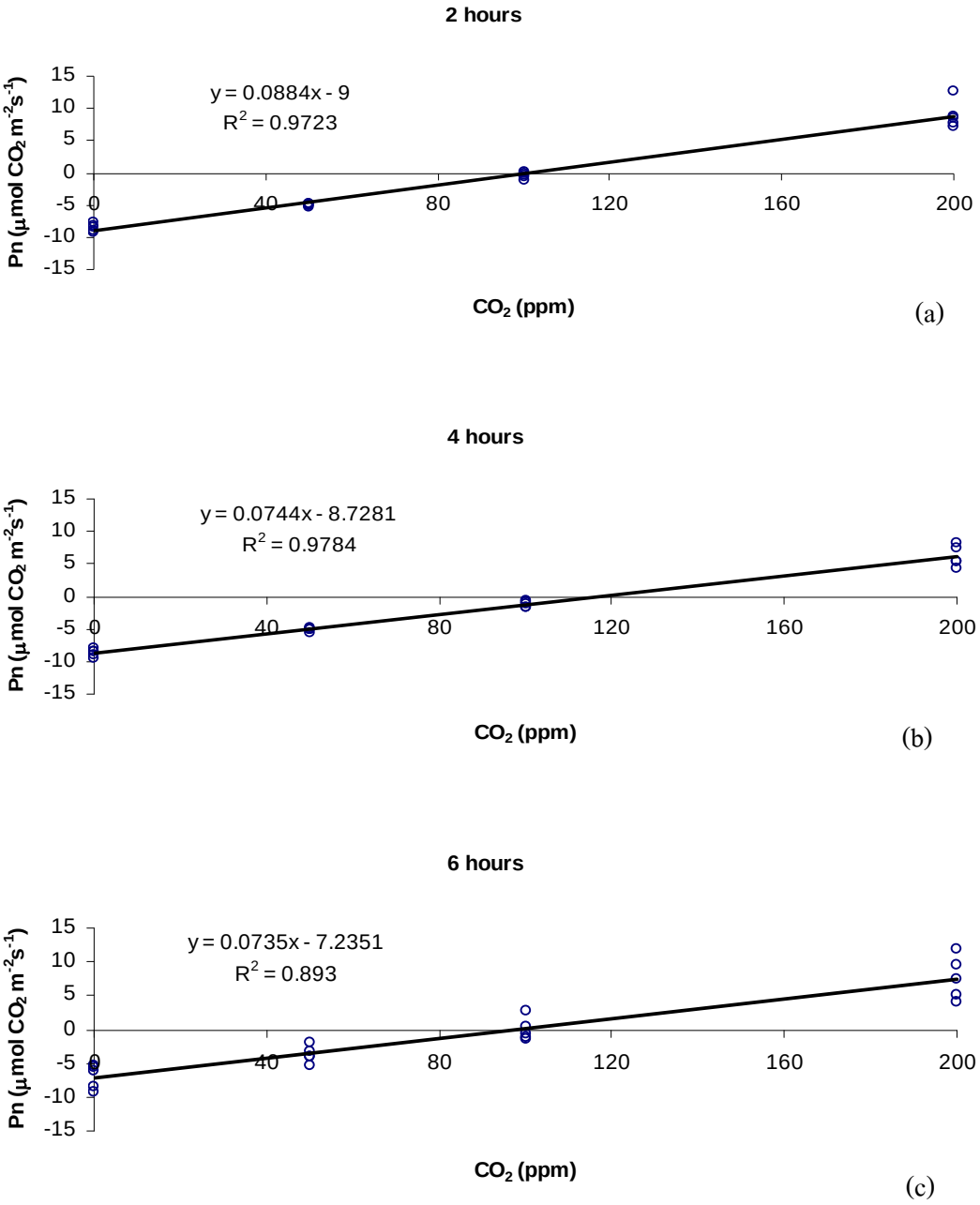
ค่า CO_2 compensation point ที่ประเมินได้จากการทดลองจะอยู่ที่ช่วงความเข้มข้นของ CO_2 80-120 ppm แต่เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศน้อย อัตราการตรึงก๊าซ CO_2 เพิ่มสูงขึ้นตาม โดยมีความสัมพันธ์ใกล้เป็นเส้นตรง แสดงว่าในช่วงดังกล่าวอัตราการตรึง CO_2 ถูกจำกัดด้วย CO_2 ทำให้เมื่อความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศเพิ่มขึ้นแล้วใบถั่วสามารถตรึง CO_2 ได้มากขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการตรึง CO_2 ของใบถั่วจะเพิ่มสูงขึ้นตามในอัตราการเพิ่มที่น้อยลงตามลำดับ จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงระยะอิ่มตัวไปด้วย CO_2 ที่ระดับความเข้มข้นของ CO_2 มาก โดยใบถั่วจะไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของ CO_2 ในอากาศหรือตอบสนองน้อย เนื่องจากปัจจัยที่จำกัดอัตราการตรึง CO_2 ในช่วงระยะนี้คือ กระบวนการสร้าง RuBP ขึ้นมาใหม่โดยวัฏจักรคัลวินเพื่อใช้ RuBP ทำปฏิกิริยาตรึง CO_2 (Taiz and Zeiger, 1998)



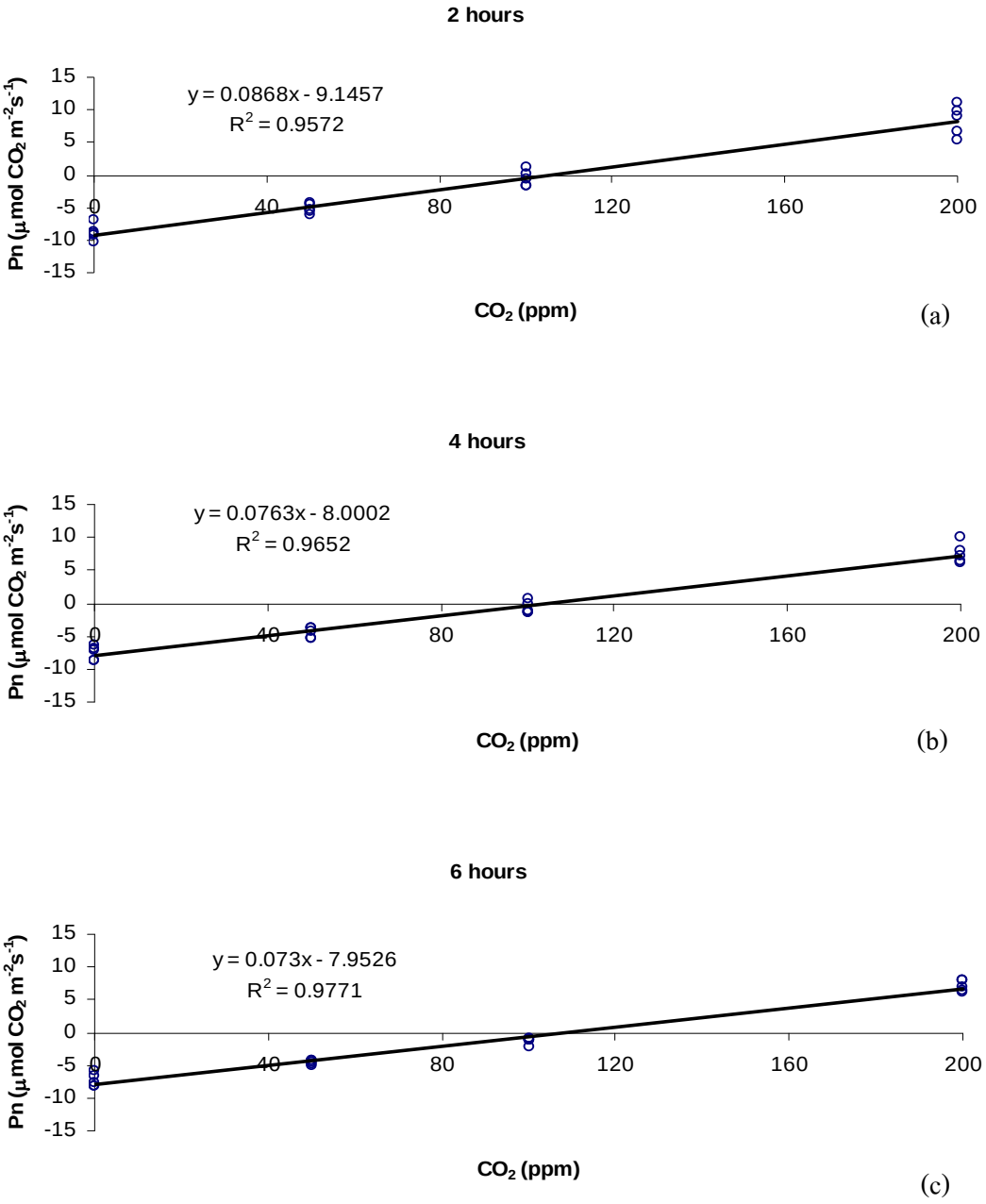
ภาพที่ 14 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติเป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



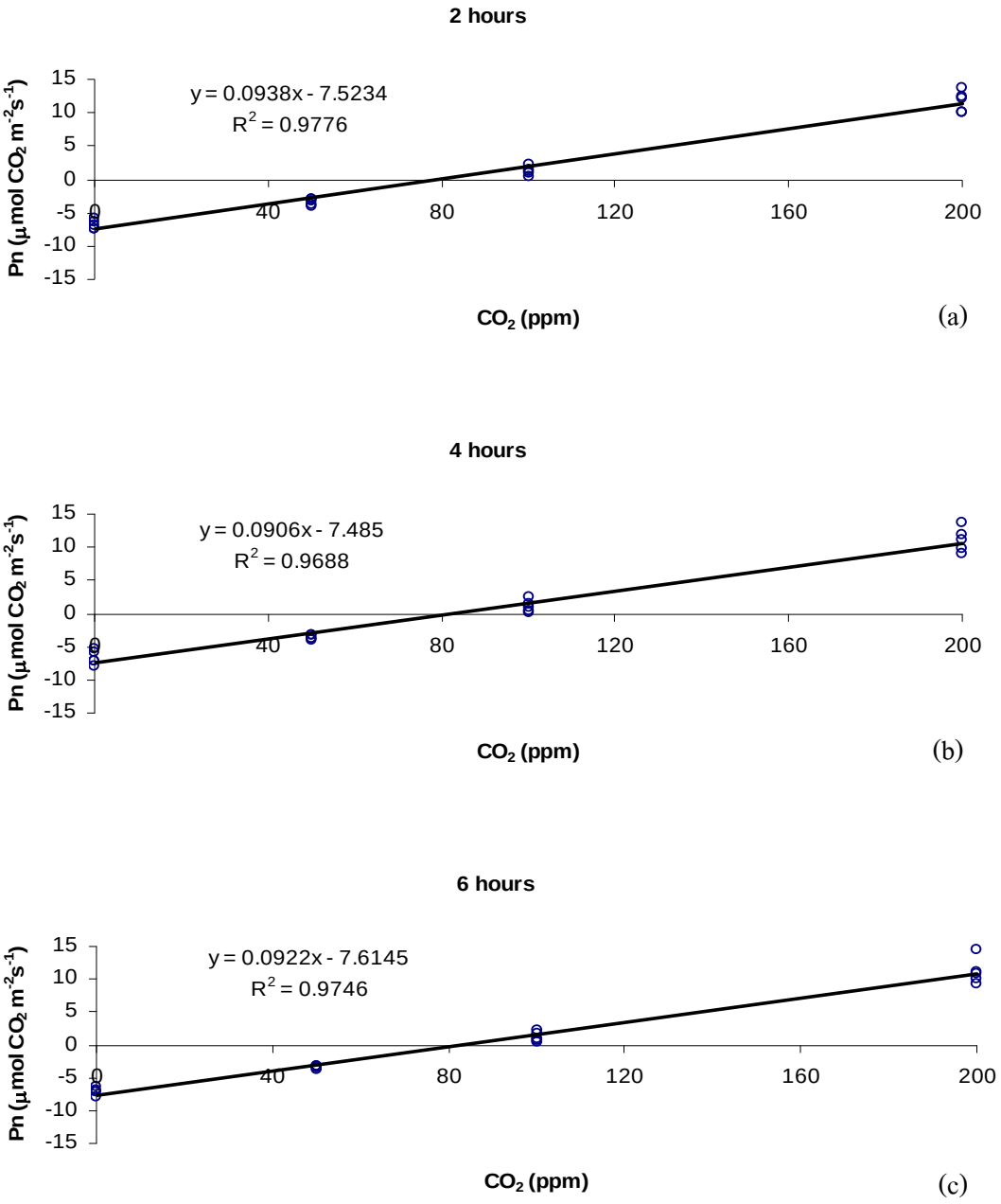
ภาพที่ 15 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



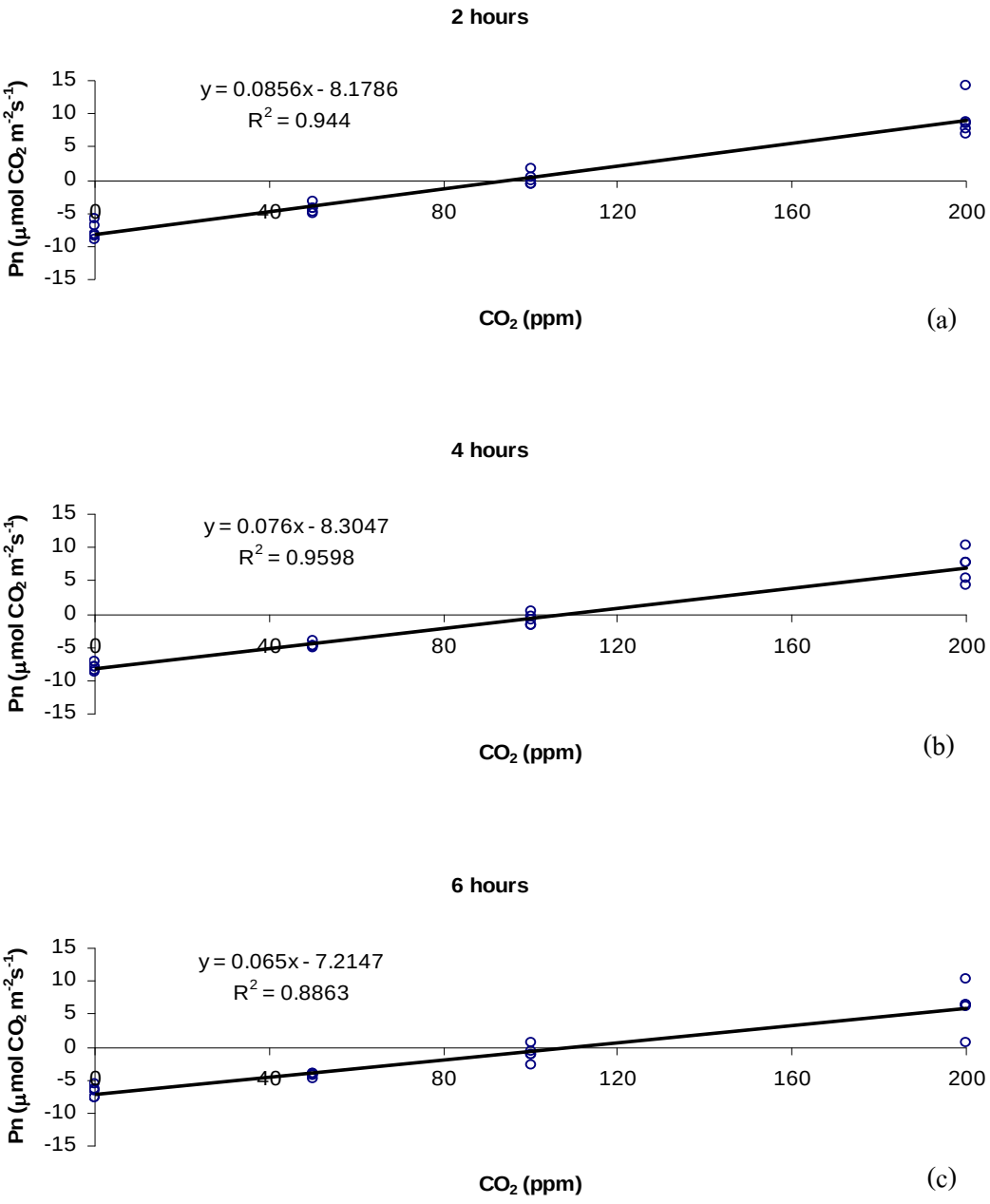
ภาพที่ 16 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 17 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 18 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 19 ค่าอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิในช่วงความเข้มข้นของ CO_2 0-200 ppm ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน (a) 2 ชั่วโมง (b) 4 ชั่วโมง และ (c) 6 ชั่วโมง

ตารางที่ 22 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	CO_2 compensation point (ppm)		
	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	93.13±7.55	81.11±6.57	75.77±8.69
Ozone	100.85±2.32	100.61±9.32	125.46±21.12
P-value	0.04	0.51	0.11
t-test	* [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 23 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

Factor	CO_2 compensation point (ppm)		
	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	106.99±6.24	105.28±5.31	101.49±9.52
Ozone	102.58±4.52	118.27±4.08	133.85±24.66
P-value	0.55	0.62	0.09
t-test	ns [1/]	ns	ns

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 24 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่ทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงเท่ากับอัตราการหายใจ (CO_2 compensation point) ของใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ และ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง (± standard error of mean)

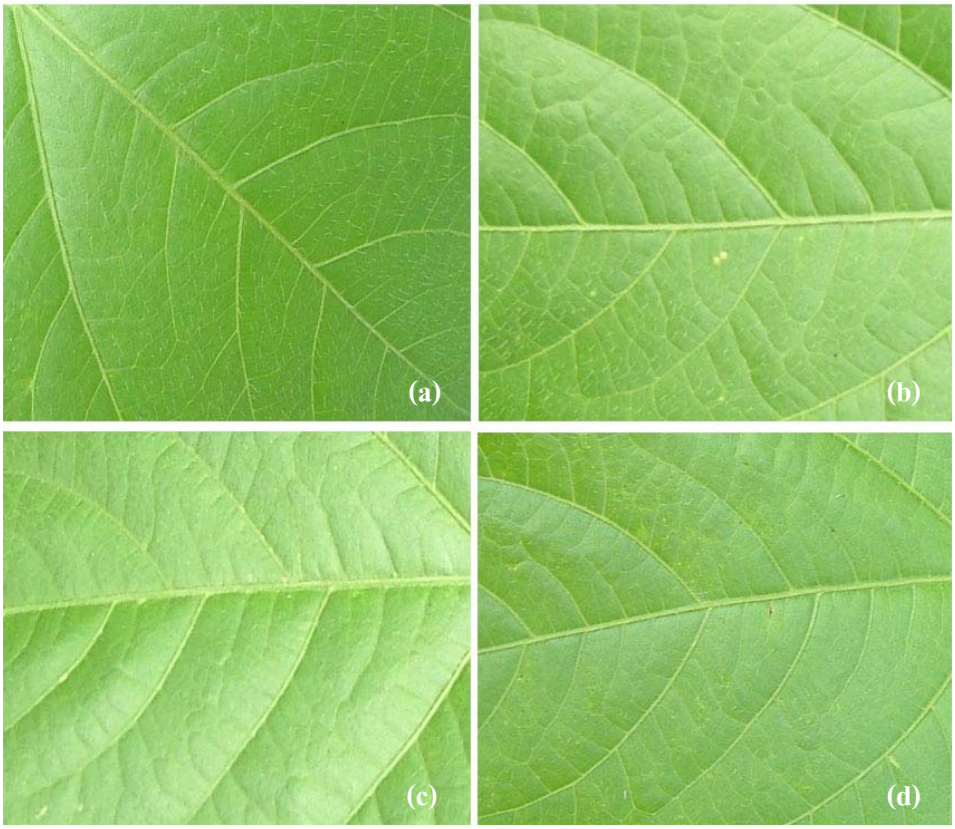
Factor	CO_2 compensation point (ppm)		
	2 hours	4 hours	6 hours
Ambient air	80.44±3.03	83.01±2.46	83.13±2.43
Ozone	96.74±5.26	111.08±6.46	120.14±16.01
P-value	0.31	0.09	<0.01
t-test	ns [1/]	ns	**

[1/] ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

*, ** แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 และ 99 เปอร์เซ็นต์

4. ลักษณะอาการที่พบเมื่อได้รับอากาศปกติ และอากาศที่มีก๊าซโอโซน (200 ppb)

เปรียบเทียบลักษณะของใบก่อนนำเข้า chamber และเมื่อ 24 ชั่วโมง ภายหลังจากได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่า ใบของถั่วทั้ง 3 ชนิด ไม่มีลักษณะอาการที่เปลี่ยนแปลงจากเดิม (ภาพที่ 20 22 และ 24) ในขณะที่ใบถั่วที่ได้รับ O_3 จะพบลักษณะอาการที่เกิดขึ้นเป็นจุดประสีเหลืองหรือสีน้ำตาลเข้มบนแผ่นใบ โดยสามารถพบอาการที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนมากในใบถั่วที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง (ภาพที่ 21 23 และ 25) โดยลักษณะอาการที่พบนี้บ่งชี้ว่า O_3 มีอิทธิพลทำให้เซลล์ของใบถั่วเปลี่ยนแปลง ทั้งในด้านสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยา โดยอาจมีบางเซลล์ที่ตายไปซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดเป็นจุดสีเข้มบนใบได้



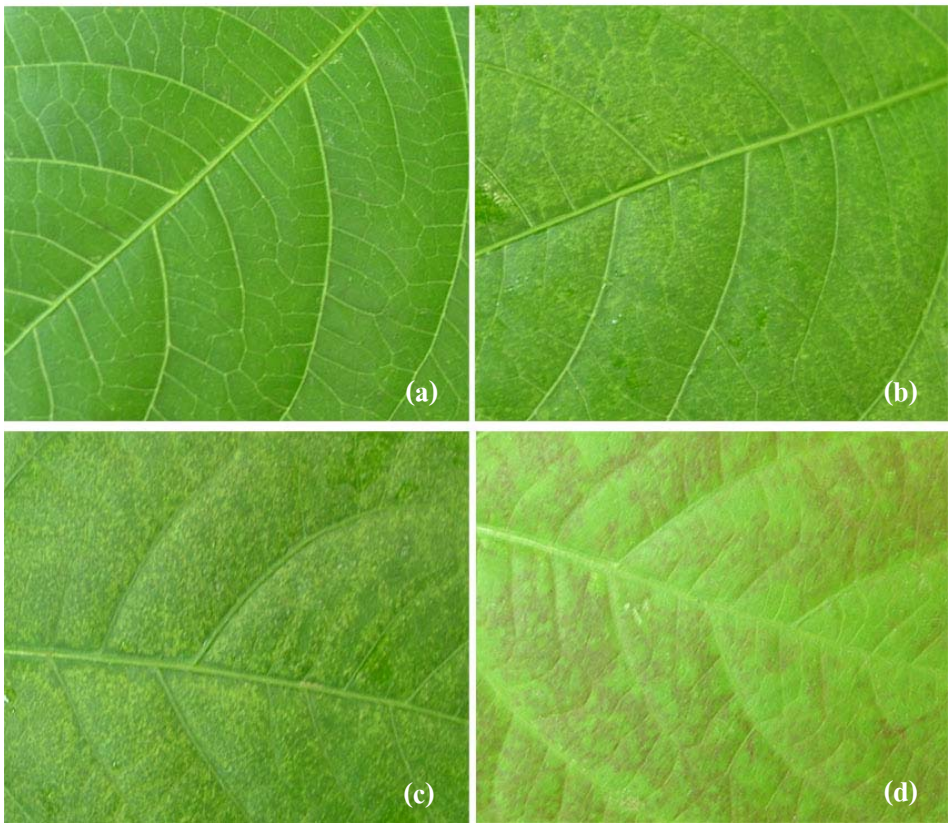
ภาพที่ 20 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ

(a) ก่อนนำไปรับอากาศปกติ ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง



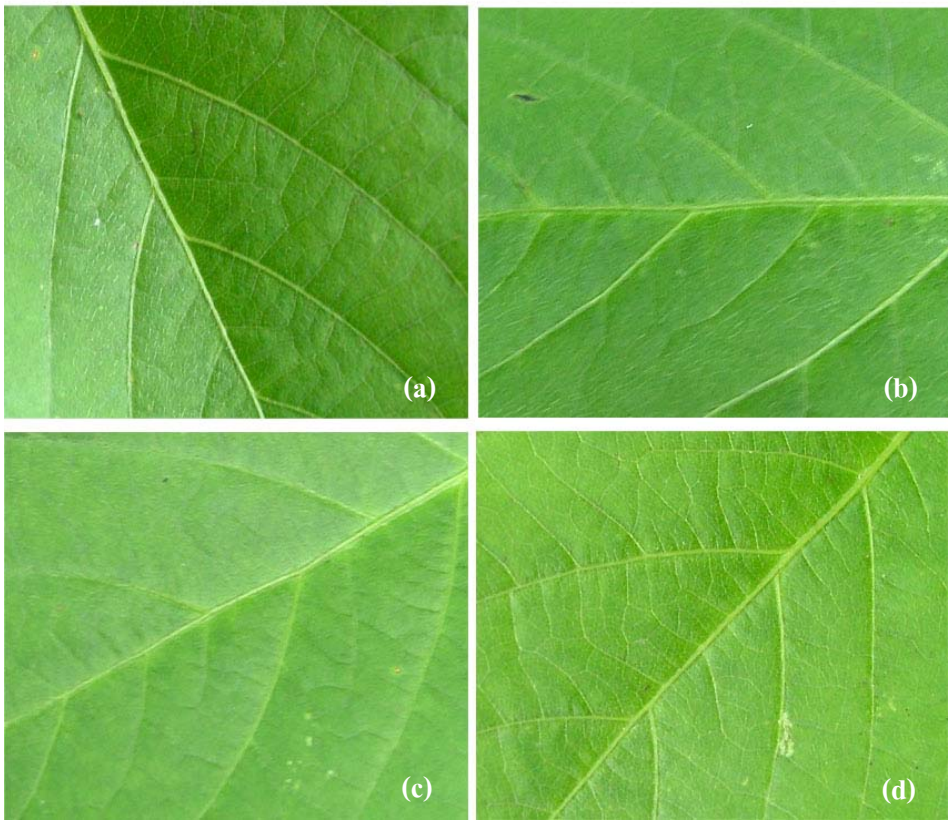
ภาพที่ 21 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเขียว พันธุ์กำแพงแสน 2 ภายหลังการได้รับ O_3 (200 ppb)

(a) ก่อนนำไปรับ O_3 ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง



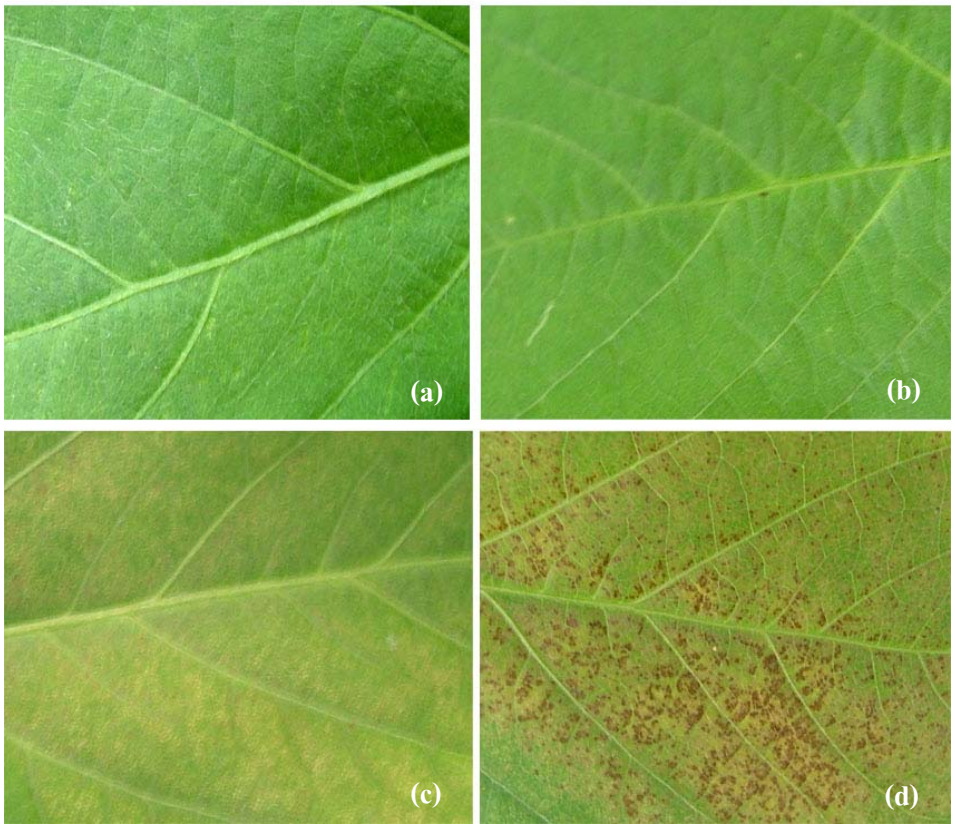
ภาพที่ 22 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ

(a) ก่อนนำไปรับอากาศปกติ ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 23 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วเหลือง พันธุ์เชียงใหม่ 60 ภายหลังการได้รับ O_3 (200 ppb)

(a) ก่อนนำไปรับ O_3 ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง

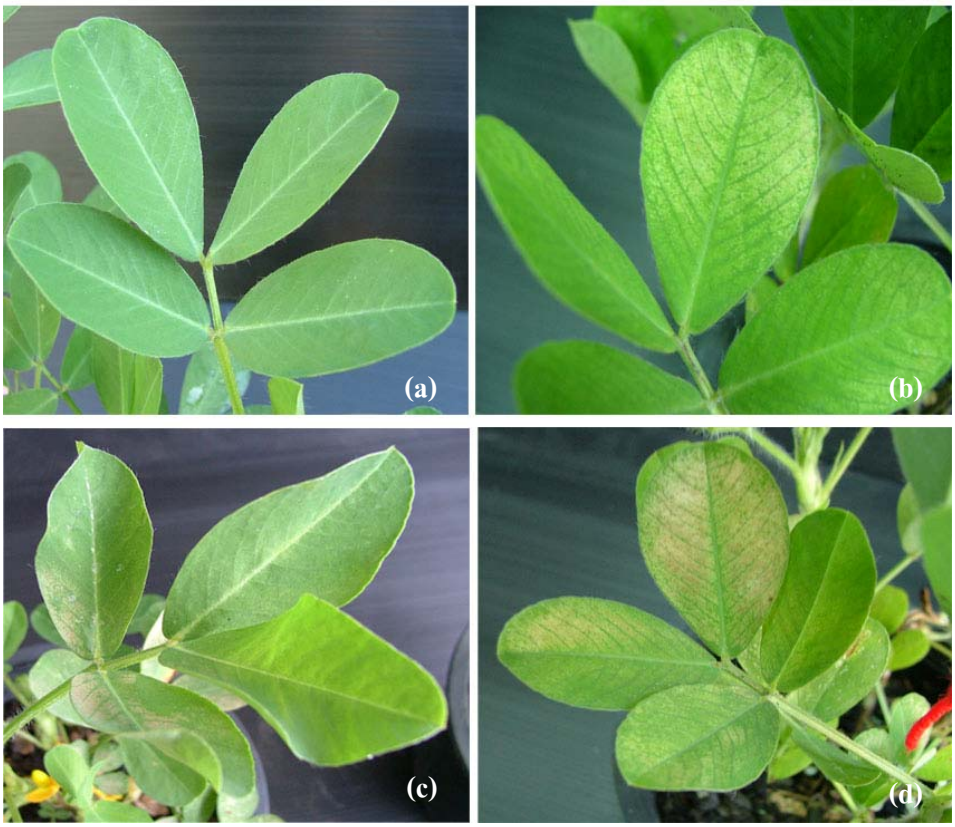
ภาพที่ 24 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับอากาศปกติ

(a) ก่อนนำไปรับอากาศปกติ ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับอากาศปกติ เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง



ภาพที่ 25 ลักษณะอาการที่แสดงออกทางใบถั่วลิสง พันธุ์ไทนาน 9 ภายหลังการได้รับ O_3 (200 ppb)

(a) ก่อนนำไปรับ O_3 ใน chamber

(b) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 2 ชั่วโมง

(c) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 4 ชั่วโมง

(d) 24 ชั่วโมง ภายหลังการได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ปริมาณก๊าซโอโซนที่วัดได้ใน chamber อากาศปกติ จะมีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-40 ppb ส่วนปริมาณก๊าซโอโซนที่วัดได้ใน chamber ที่มีการเติมก๊าซโอโซน จะมีปริมาณความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 ppb

O_3 มีอิทธิพลต่อการตอบสนองต่อแสงสุทธิของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด โดยระดับของอิทธิพลของ O_3 ขึ้นอยู่กับทั้งชนิดถั่ว และระยะเวลาความยาวนานที่ได้รับ O_3 ในภาพรวม O_3 สามารถทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบลดน้อยลง ทำให้อัตราการหายใจในที่มืดเพิ่มมากขึ้น แต่ไม่ได้ทำให้ค่าความชันเริ่มต้นของการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง LSP และ θ เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ทำให้ LCP เปลี่ยนแปลงเฉพาะในใบถั่วเหลืองและถั่วลิสงเท่านั้น

O_3 มีอิทธิพลต่อการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบถั่วทั้ง 3 ชนิด โดยระดับของอิทธิพลของ O_3 ขึ้นอยู่กับทั้งชนิดถั่ว และระยะเวลาความยาวนานที่ได้รับ O_3 ในภาพรวม O_3 สามารถทำให้อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (P_n) ที่ความเข้มข้นของ CO_2 400 ppm และ 1,400 ppm ลดน้อยลง และพบการเปลี่ยนแปลงของ CO_2 compensation point เฉพาะในใบถั่วเขียว และถั่วลิสงเท่านั้น

O_3 มีอิทธิพลทำให้ใบถั่วเกิดอาการเสียหาย โดยมีจุดประสีเหลือง หรือสีน้ำตาลเข้มบนแผ่นใบ และสามารถพบอาการที่เกิดขึ้นได้ชัดเจนมากในใบถั่วที่ได้รับ O_3 เป็นระยะเวลานาน 6 ชั่วโมง

ข้อเสนอแนะ

การทดลองครั้งนี้เป็นเพียงการศึกษาอิทธิพลของก๊าซโอโซน (O_3) เพียงชนิดเดียว ต่อการตอบสนองต่อแสงของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิและการตอบสนองต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิของใบถั่ว แต่เนื่องจากในสภาพจริงมีมลพิษทางอากาศชนิดอื่น เช่น ออกไซด์ของไนโตรเจน จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยเพิ่มก๊าซมลพิษชนิดอื่นร่วมกับ O_3 และศึกษาอิทธิพลของ O_3 ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ตลอดจนระยะเวลาที่พืชได้รับมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้ควรพิจารณาศึกษาอิทธิพลของมลพิษทางอากาศต่ออัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในระดับเรือนพุ่ม และผลผลิตเพื่อที่ประเมินความเสียหายทางเศรษฐกิจที่เกิดจากอิทธิพลของมลพิษทางอากาศต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. 2544. **โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการลดของเสียและการใช้ประโยชน์จากของเสีย.** กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

_____. 2546. **โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการลดของเสียและการใช้ประโยชน์จากของเสีย.** กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ.

_____. 2549. **กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม.** แหล่งที่มา : http://aqnis.pcd.go.th/, 23 มกราคม 2550.

คณาจารย์ภาควิชาไร่นา, 2542. **พืชเศรษฐกิจ.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ดวงรัตน์ ศตคุณ. 2541. **อิทธิพลของแสง อายุใบ และตำแหน่งใบต่อการสังเคราะห์แสงของใบฝ้าย.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2548. **การใช้คุณสมบัติแสงของแผ่นใบในการประเมินสุขภาพใบของพืชเขตร้อน.** วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์. 2542. ถั่วเหลือง, น. 121-128. *ใน* คณาจารย์ภาควิชาไร่นา, ผู้รวบรวม. **พืชเศรษฐกิจ.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2542. ถั่วเขียว, น. 143-147. *ใน* คณาจารย์ภาควิชาไร่นา, ผู้รวบรวม. **พืชเศรษฐกิจ.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พูนพิภพ เกษมทรัพย์. 2549. **ชีววิทยา 2**. มูลนิธิ สอวน., กรุงเทพฯ.

ภูริพงศ์ ดำรงวุฒิ. 2547. **อัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สและสถานภาพของน้ำในใบของต้นปอสาพันธุ์โคโซ (Kozo) และพันธุ์ศรีสัชนาลัยในแปลงทดลอง.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

รังสฤษดิ์ กาวีต๊ะ. 2542. ถั่วลิสง, น. 157-162. *ใน* คณาจารย์ภาควิชาไร่นา, ผู้รวบรวม. **พืชเศรษฐกิจ.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนา. 2550. **คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.** แหล่งที่มา : http://eclassnet.kku.ac.th/etraining/file/1092704494-ohala.doc, 3 พฤศจิกายน 2550.

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2537. **พฤกษศาสตร์.** ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรอุมา ด้วงงาม. 2548. **อิทธิพลของมลพิษทางอากาศจากเครื่องยนต์ดีเซล และก๊าซโอโซนต่อลักษณะทางสรีรวิทยาในการแลกเปลี่ยนก๊าซของใบส้มเขียวหวาน มะเขือเทศ และคะน้า.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อารีย์ วรัญญูวัฒก์. 2519. ถั่วลิสง, น. 224-264. *ใน* คณาจารย์ภาควิชาไร่นา, ผู้รวบรวม. **พืชเศรษฐกิจ เล่ม 1.** ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อักษร ศรีเปล่ง. 2529. **พฤกษศาตร์ทั่วไป.** สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

Acock, B. 1991. Modeling canopy photosynthestic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits, pp. 41-56. *In* K. Boot, ed. **Modeling Crop Photosynthesis from Biochemistry to Canopy.** Crop Science Society of America, Madison, Wiscousin.

Agrrawal, M., B. Singh, M. Rajput, F. Marshall and J.N.B. Bell. 2003. Effect of air pollution on peri-urban agriculture: a case study. **Environ. Pollut.** 113: 323-329.

Barnes, J.D., D. Velissariou, A.W. Davison and C.D. Holevas. 1990. Comparative ozone sensitivity of old and modern Greek cultivars of spring wheat. **New Phytol.** 116: 707-714.

Bryan, D.M. and Y.L. Ya'acov. 1994. **Stress and Stress Coping in Cultivated Plants.** Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Constable, G.A. and H.M. Rawson. 1980. Effect of leaf position, expansion and age on photosynthesis, transpiration and water use efficiency of cotton. **Aust. J. Plant Physiol.** 7: 89-100.

Evan, J.R. and G.D. Farquhar. 1991. Modeling canopy photosynthesis from the biochemistry of the C_3 chloroplast, pp. 1-5. *In* K.J. Boote and R.S. Loomis (eds.). **Modeling Crop Photosynthesis from Biochemistry to Canopy.** CSSA Special Publication No. 19. Wisconsin, U.S.A.

Farooq, M., M. Akbar and M.U. Beg. 1988. Effect of acute exposure of sulphur dioxide on the metabolism of *Holoptelea integrifolia* plants. **Environ. Pollut. Series A. Ecological.** 39 (3): 597-598.

Fehr, W.R. and C.E. Caviness. 1977. **Stages of soybean development.** Special Report No. 80. Iowa State University, USA.

Guidi, L., R. Di Cagno and G.F. Soldatini. 2002. Screening of bean cultivars for their reponse to ozone as evaluated by visible symptoms and leaf chlorophyll fluorescence. **Environ. Pollut.** 112: 349-355.

_____, E.D. Innocenti, S. Genovesi and G.F. Soldatini. 2005. Photosynthetic process and activities of enzymes involved in the phenylpropanoid pathway in resistant and sensitive genotypes of *Lycopersicon esculentum* L. expose to ozone. **Plant Sci.** 168: 153-160.

_____, M. Tonini and G.F. Soldatini. 2000. Effects of high light and ozone fumigation on photosynthesis in Phaseolus vulgaris**. Plant Physiol. Biochem.** 38: 717-725.

Heath, R.L. 1994. Possible mechanisms for the inhibition of photosynthesis by ozone. **Photosynth. Res.** 39: 439-451.

Heagle, A.S., J.E. Miller, J.O. Rawlings and S.F. Vozzo. 1991. Effect of growth stage on soybean response to chronic ozone exposure. **J. Environ. Qual.** 20: 562-570.

Hippeli, S. and E.F. Elstner. 1993. Effects of air pollutants on man, plants and buildup: mechanisms and dose response effects, *In* A. Verret, eds. **Environmental Contamination.** Elsevier, Science Publishers, Amsterdam.

Keen, N.T. and O.C. Taylor. 1975. Ozone injury in soybeans. Isoflavanoid accumulation is related to necrosis. **Plant Physiol.** 55: 731-733.

Keutgen, N., A.J. Mierowska, K. Chen, M.J.J. Janssens and F. Lenz. 1997. Gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of sweet potato leaves to ozone. **J. Am. Soc. Hortic. Sci.** 7: 48:50.

Kleier, C., B. Farrsworth and W. Winner. 2001. Photosynthesis and biomass allocation of radish cv. “Cherry Belle” in response to root temperature and ozone. **Environ. Pollut.** 111: 127-133.

Lawson, T., J. Craigon, C.R. Black, J.J. Colls and G. Landon. 2001. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of potatoes (*Solanum tuberosum*) grown in open-top chambers. **Environ. Pollut.** 111: 479-491.

Lee, T.T. 1967. Inhibition of oxidative phosphorylation and respiration by ozone in tobacco mitochondria. **Plant Physiol.** 42: 691-696.

Mac Dowall, F.D.H. 1965. Stages of ozone damage to respiration of tobacco leaves. **Can. J. Bot.** 43 (2): 419-427.

Mednyanszki, Z., A.S. Szabo and J. Simon. 1993. **The effect of synergolux treatment on vegetables during storage.** Int. Sym. Postharvest, Kecskemet, Hungary.

Mehlhorn, H. and A.R. Wellburn. 1987. Stress ethylene formation determines plant sensitivity to ozone. **Nature** 327: 417-418.

Ormrod, D.P. 1982. Air pollutant interaction in mixtures, pp. 307-331. *In* M.H. Unsworth and D.P. Ormrod, eds. **Effects of Gaseous Air Pollution in Agriculture and Horticulture**, London.

_____, J.L. Deveau and B.A. Marie. 1988. Growth response of maize, soybean and tomato to sulphur dioxide and ozone exposure patterns utilizing and incomplete block factorial experimental design. **Water Air Soil Pollut.** 39: 187-199.

Paul, D.A., B. Palmer, J.L.J. Houpis, M.K. Smith and J.C. Pushnik. 2003. Chloroplastic responses of ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) seedlings to ozone exposure. **Environ. Int.** 29: 407-413.

Reid, C.D. and E.L. Fiscus. 1998. Effects of elevated (CO_2) and/or ozone on limitation to CO_2 assimilation in soybean (*Glycine max*). **J. Exp. Bot.** 49: 885-895.

Reinert, R.A. 1984. Plant Response to Air Pollutant Mixtures. **Annual Review of Phytopathology** 22: 421-442.

Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1985. **Plant Physiology.** 3rd ed., Wadsworth Publishing Company, Belmont, California.

Sarig, P., A. Monjauze, N. Lisker, I. Itach and R.A. Ben. 1993. Induction of tolerance to black mold in table grapes. **Phytoparasitica.** 21: 131.

Sassenrath-Cole, G.F., G. Lu, H.F. Hodges and J.M. Mckinion. 1996. Photo flux density versus leaf senescence in determining photosynthetic efficiency and capacity of *Gossypium hirsutum* L. leaves. **Env. Exo. Bot.** 33: 335-340.

Skelly, J.M. 2000. Tropospheric ozone and its importance to forests and natural plant communities of the northeastern United States. **Northeastern Naturalist.** 3: 221-236.

Slack, E.M. 1974. Studies of stomatal distribution on the leaves of four apple variety. **J. Hort. Sci.** 49: 95-105.

Taiz, L. and E. Zeiger. 1998. **Plant Physiology**. 2nd ed. Sinauer Associates. Inc., Publishers. U.S.A.

_____. 2002. **Plant Physiology**. 3rd ed. Sinauer Associates. Inc., Publishers. U.S.A.

Thornley, J.H.M. and I.R. Johnson. 1990. **Plant and Crop Modeling**. Oxford University Press, New York.

Vandermeiren, K., T.J. Flowers, G. Taylor and A.R. Yeo. 1996. Additive and antagonistic effects of ozone and salinity on the growth, ion contents and gas exchange of five varieties of rice *Oryza sativa* L. **Environ. Pollut.** 92: 257-266.

Zheng, Y., K.J. Stevenson, R. Barrowcliffe, S. Chen, H. Wang and J.D. Barnes. 1998. Ozone Levels in Chongqing: a potential threat to crop plants commonly grow in the region. **Environ. Pollut.** 99: 299-308.

Yin, Z.H., C. Langebartels and H. Sandermann. 1993. **Specific induction of ethylene biosynthesis in tobacco plants by the air pollutant ozone.** Proc. Royal Soc., Edinburgh.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเขียว

ระยะ	คำอธิบาย
ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น	
VE	ใบเลี้ยงโผล่พ้นดิน
VC	ใบเลี้ยงกางออกจากกัน และใบจริงคู่แรกมีขอบใบคลี่แยกจากกัน
V1	ใบประกอบใบแรกมีขอบใบคลี่แยกจากกัน ใบจริงคู่แรกแผ่กว้าง
V2	มี 2 ข้อบนลำต้น ประกอบด้วยใบจริงคู่แรก และใบประกอบใบแรก
V3	มี 3 ข้อบนลำต้น ประกอบด้วยใบจริงคู่แรก และใบประกอบ 2 ใบที่เจริญเต็มที่แล้ว ใบบนข้อถัดไปมีขอบคลี่แยกจากกัน
.	.
.	.
.	.
Vn	มี n ข้อบนลำต้น ใบประกอบชุดที่ n-1 แผ่กว้าง ขณะที่ใบบนข้อที่ n+1 (ใบประกอบชุดที่ n) เริ่มคลี่กาง
ระยะออกดอกและติดฝัก	
R1	ดอกบานที่ข้อใดข้อหนึ่งของลำต้น
R2	ฝักใดฝักหนึ่งมีขนาดยาวถึง 1 เซนติเมตร
R3	ฝักใดฝักหนึ่งมีขนาดยาวถึง 5 เซนติเมตร
R4	ฝักใดฝักหนึ่งมีลักษณะคอด เมล็ดภายในฝักนูนขึ้นเห็นได้ชัด
R5	ฝักใดฝักหนึ่งเริ่มสุกแก่ โดยเปลี่ยนเป็นสีเทา น้ำตาล หรือดำ
R6	ฝักสุกแก่ร้อยละ 80 (เก็บเกี่ยวครั้งที่ 1)
R7	ฝักที่เหลือสุกแก่มากกว่าร้อยละ 80 (เก็บเกี่ยวครั้งที่ 2)

ที่มา : พีระศักดิ์ (2542)

ตารางผนวกที่ 2 ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

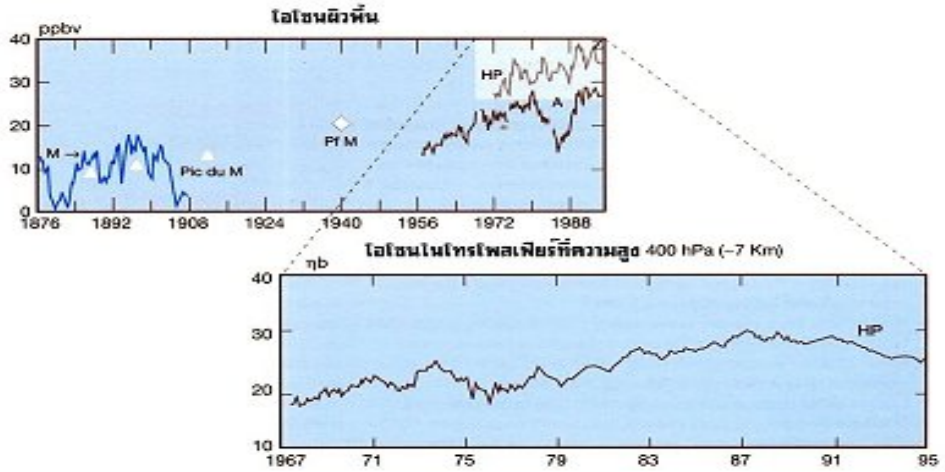
ระยะ	คำอธิบาย
ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น	
VE	ใบเลี้ยงโผล่พ้นดิน
VC	ใบเลี้ยงกางออกจากกัน และใบจริงคู่แรกมีขอบใบคลี่แยกจากกัน
V1	ใบประกอบใบแรกมีขอบใบคลี่แยกจากกัน
V2	มี 2 ข้อบนลำต้น ประกอบด้วยใบจริงคู่แรก และใบประกอบใบแรกที่เจริญเต็มที่แล้ว ใบบนข้อถัดไปคลี่แยกจากกัน
V3	มี 3 ข้อบนลำต้น ประกอบด้วยใบจริงคู่แรก และใบประกอบใบแรกที่เจริญเต็มที่แล้ว ใบบนข้อถัดไปคลี่แยกจากกัน
.	.
.	.
.	.
Vn	มี n ข้อบนลำต้น ประกอบด้วยใบที่เจริญเต็มที่แล้วบนข้อทั้ง n ข้อ ใบบนข้อที่ n+1 มีขอบใบคลี่แยกจากกัน
ระยะออกดอกและติดฝัก	
R1	ดอกบานที่ข้อใดข้อหนึ่งของลำต้น
R2	ดอกบานที่ข้อใดข้อหนึ่งของ 2 ข้อบนสุดของลำต้น
R3	ฝักมีขนาด 0.5 เซนติเมตร ที่ข้อใดข้อหนึ่งใน 4 ข้อบนสุดของลำต้น
R4	ฝักมีขนาด 2 เซนติเมตร ที่ข้อใดข้อหนึ่งใน 4 ข้อบนสุดของลำต้น
R5	เมล็ดยาว 0.3 เซนติเมตร ในฝักที่ข้อใดข้อหนึ่งใน 4 ข้อบนสุดของลำต้น
R6	เมล็ดเต็มฝักที่ข้อใดข้อหนึ่งใน 4 ข้อบนสุดของลำต้น
R7	ฝักใดฝักหนึ่งบนลำต้นเริ่มแก่
R8	ร้อยละ 95 ของฝักแก่แล้ว (พร้อมเก็บเกี่ยวได้ภายใน 1 ถึง 2 สัปดาห์)

ที่มา : Fehr and Caviness (1977)

ตารางผนวกที่ 3 ระยะการเจริญเติบโตของถั่วลิสง

ระยะ	ชื่อระยะ	ลักษณะการเจริญเติบโต
ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น		
VE	Emergence stage	ระยะที่ใบเลี้ยงโผล่พ้นดินบางส่วนของต้นอ่อน
VC	Cotyledon stage	ระยะที่ใบเลี้ยงแผ่เต็มที่และอยู่ระดับผิวดิน
V1…Vn	First tetrafoliolate stage to n^{th} tetrafoliolate stage	ระยะที่ใบจริงเจริญเต็มที่ ใบย่อยทุกใบคลี่เต็มที่ จนกระทั่งถึงข้อสุดท้ายบนต้นหลัก (Vn)
ระยะการเจริญเติบโตทางสืบพันธุ์		
R1	Beginning bloom stage	ระยะที่เริ่มออกดอกแรกบนต้น
R2	Beginning peg stage	ระยะที่เกิดเข็มและเริ่มแทงลงดิน
R3	Beginning pod stage	ระยะที่ปลายเข็มอันแรกของต้นขยายตัวเป็นตุ่มเล็กๆ ขนาดประมาณ 2 เท่า ของความกว้างของเข็ม
R4	Full pod stage	ระยะที่ฝักเจริญเต็มที่จนได้ขนาดประจำพันธุ์
R5	Beginning seed stage	ระยะที่การสร้างเมล็ดผ่านพ้นระยะเมล็ดเป็นน้ำนมมแล้ว
R6	Full seed stage	ระยะที่เมล็ดเจริญเต็มที่จนเต็มช่องว่างในฝัก
R7	Beginning maturity stage	ระยะที่ฝักเริ่มแก่โดยส่วนของเปลือกฝักด้านในเปลี่ยนเป็นสีเข้ม หรือตกกระ
R8	Harvest stage	ระยะที่ต้นมีฝักแก่ประมาณ 2/3 หรือ 3/4
R9	Over maturity stage	ระยะที่ฝักแก่เกินไป ก้านฝักเริ่มเปื่อย

ที่มา : รังสฤษดิ์ (2542)

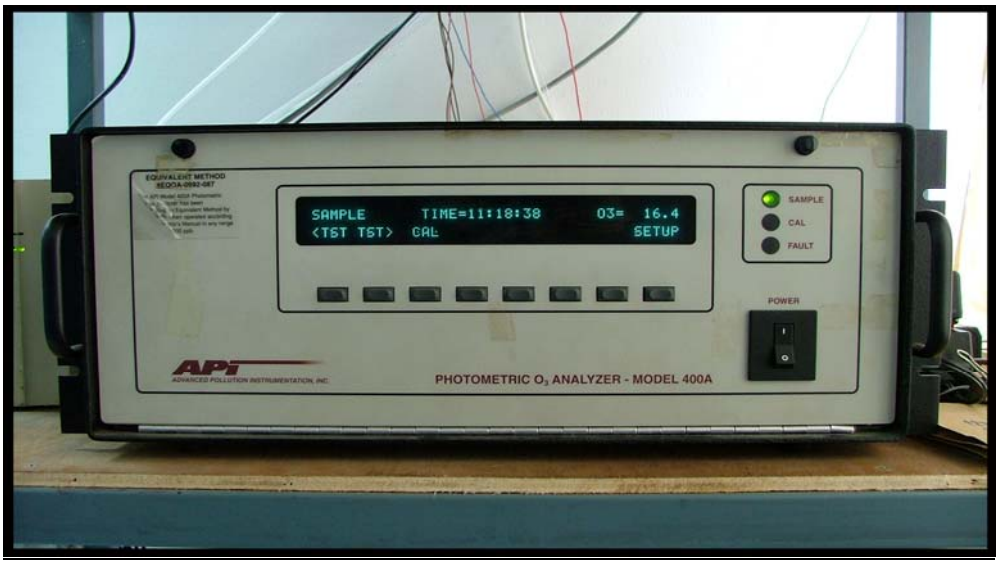


ภาพผนวกที่ 1 โอโซนผิวพื้นจากสถานี Montsouris (M) และ Pic du Midi (D) สำหรับ50 ปีหลังของศตวรรษที่ 19 น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของปลายศตวรรษที่ 20 ซึ่งวัดที่สถานี Hohenpeissenberg (HP) Arkona (A) Zugspitze (Z) และ Pic du Midi (D) แสดงให้เห็นชัดว่าโอโซนในโทรโพสเฟียร์เพิ่มขึ้นในซีกโลกเหนือที่ความกดอากาศ 400 hPa (ประมาณ 7.2 กม.)

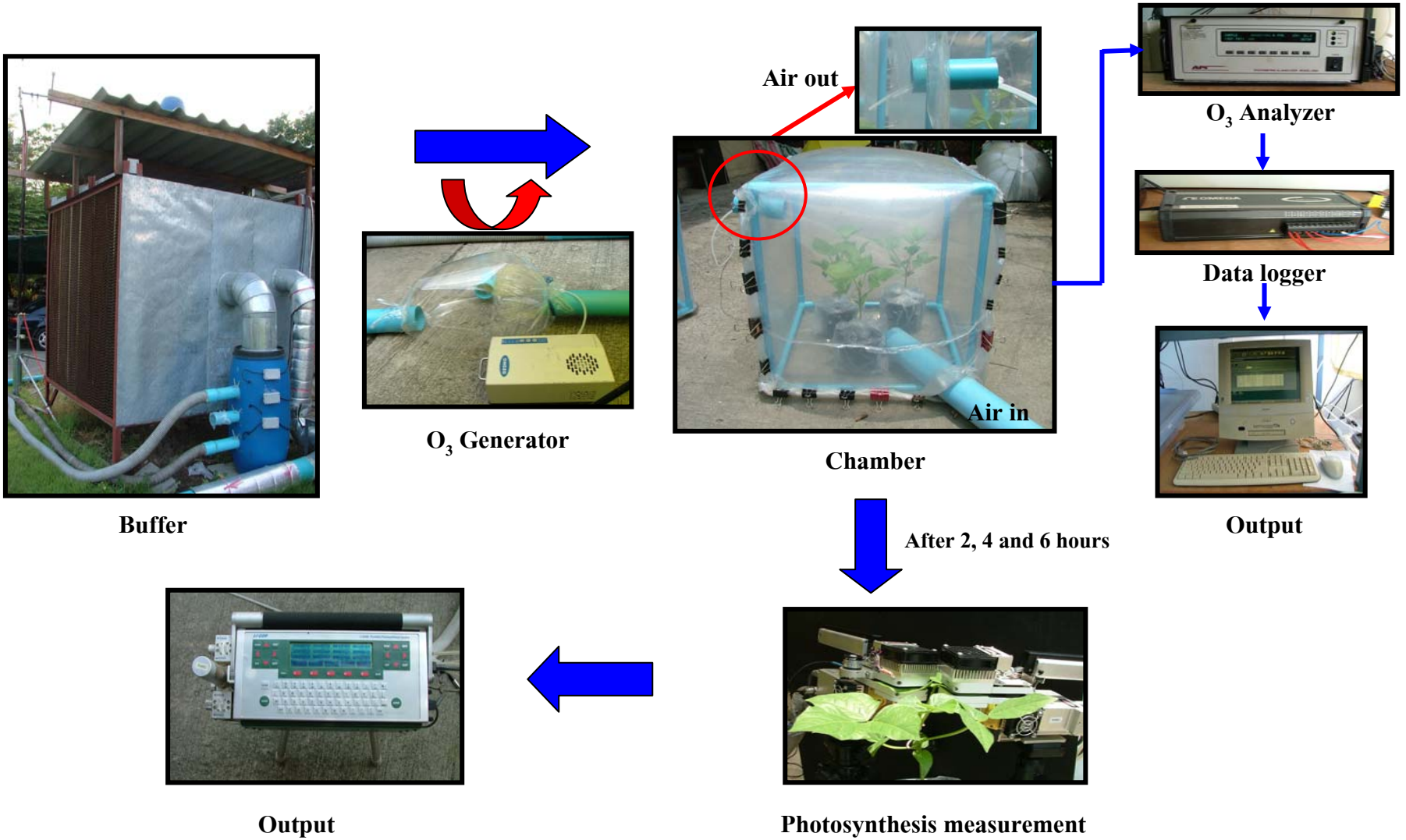
ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและพัฒนา (2550)

ภาพผนวกที่ 2 การรมอากาศปกติ และอากาศที่มีO3 ใน chamber ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และความสูง 50 เซนติเมตร คลุมด้วยพลาสติกใสทำจาก acrylic plastic และ polypropylene

ภาพผนวกที่ 3 เครื่องผลิตก๊าซโอโซน (Ozone Generator-รุ่น Sunny, K-Link (Thailand) Co., Ltd., Thailand) และการผสมอากาศ



ภาพผนวกที่ 4 เครื่องวัดปริมาณก๊าซโอโซนในอากาศ (UV Absorption Ozone Analyzer-Model 400A, Teledyne Technologies Company, U.S.A)



ภาพผนวกที่ 5 วิธีการให้อากาศปกติ และ ก๊าซโอโซน (O_3) กับต้นถั่วแต่ละชนิด

ภาพผนวกที่ 5 เครื่องมือวัดอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ (Portable Photosynthesis System รุ่น LI-6400 LI-COR, lnc., U.S.A)

ภาพผนวกที่ 6 CO_2 tank ที่ใช้ในการกำหนดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไอออกไซด์ (CO_2)