

บทที่ 4

ผลการวิจัย

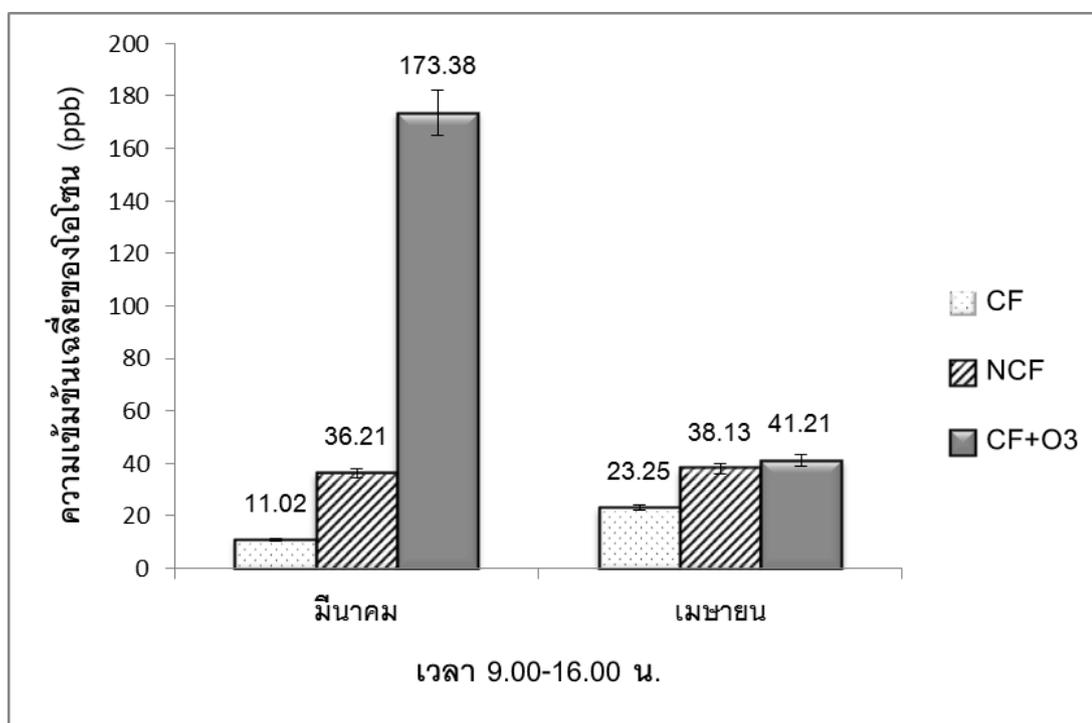
การศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของโอโซนต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ต่อระดับความเข้มข้นของโอโซนที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชุดการทดลอง คือ ความเข้มข้นโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ (CF) ความเข้มข้นโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ (ชุดควบคุม, NCF) และความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+O_3}) โดยทำการพ่นวันละ 7 ชั่วโมง และเก็บข้อมูลตามระยะการเจริญเติบโตทั้งหมด 6 ระยะคือ ระยะที่มีใบประกอบสองใบ (V2) ระยะที่มีใบประกอบสี่ใบ (V4) ระยะเริ่มออกดอก (R1) ระยะเริ่มติดฝัก (R3) ระยะเริ่มติดเมล็ด (R5) และระยะเริ่มเก็บเกี่ยว (R8) แสดงรายละเอียดข้อมูลปัจจัยด้านการเจริญเติบโต สภาพแวดล้อมและสุขภาพของใบ ดังนี้

ปัจจัยทางกายภาพ

ปัจจัยทางกายภาพในขณะทำการศึกษา มีการเก็บข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในช่วงเดือนมีนาคมถึงเมษายน 2554 แสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยดังภาพ 4 พบว่าสามารถควบคุมระดับความเข้มข้นของโอโซนได้จริง โดยในชุดทดลองที่โอโซนสูงกว่าระดับธรรมชาติ โอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ และโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ มีระดับความเข้มข้นเฉลี่ย 107.3 ppb, 37.2 ppb และ 17.1 ppb ตามลำดับ ส่วนปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และความเข้มแสง มีการเก็บข้อมูลในช่วงเดือนมกราคมถึงมีนาคม 2554 พบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในชุดทดลองที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ เทียบเท่าธรรมชาติ และสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ย 381.7 ppb, 371.2 ppb และ 374.5 ppb ตามลำดับ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 32.8 °C 32.7°C และ 33.7°C ตามลำดับ ความเข้มแสง มีค่าเฉลี่ย 59,849.4 lux, 58,070.4 lux และ 59,752.2 lux ตามลำดับ (ตาราง 4)

ตาราง 4 ปัจจัยทางกายภาพที่ทำการวัดขณะทดลอง (มกราคม-มีนาคม 2554)

ปัจจัยทางกายภาพ	เดือน	ระดับความเข้มข้นของโอโซน		
		ต่ำกว่าธรรมชาติ	เทียบเท่าธรรมชาติ	สูงกว่าธรรมชาติ
ความเข้มข้น	มกราคม	326.22	326.41	326.50
CO ₂ (ppb)	กุมภาพันธ์	413.91	397.88	394.66
	มีนาคม	404.97	389.19	402.34
อุณหภูมิ (°C)	มกราคม	31.38	30.84	32.63
	กุมภาพันธ์	34.19	34.00	33.81
	มีนาคม	32.69	33.25	34.63
ความเข้มแสง (Lux)	มกราคม	57,791.88	55,809.38	56,562.50
	กุมภาพันธ์	61,837.50	57,655.00	60,603.13
	มีนาคม	59,918.75	60,746.88	62,090.94



ภาพ 14 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโอโซนในช่วงระยะเวลาการวิจัย

ผลกระทบของไอโซนต่อการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

1. ความสูงของลำต้น (Stem height)

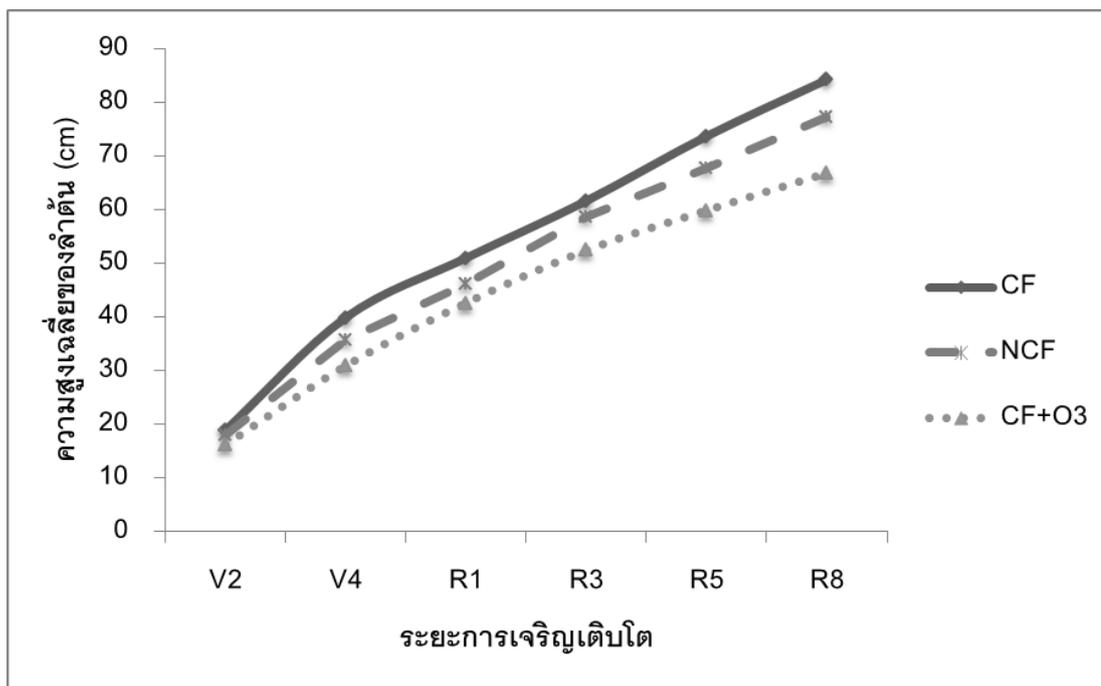
เมื่อพิจารณาจากระดับความสูงของต้นถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่มีการตอบสนองต่อไอโซน พบว่าไอโซนเริ่มส่งผลกระทบต่อความสูงของลำต้นในช่วงระยะเริ่มติดฝัก (R3) จนถึงระยะเก็บเกี่ยว (R8) ทั้งนี้ในระยะเริ่มติดฝัก ความสูงของลำต้นเมื่อวัดจากระดับพื้นดินถึงปลายยอดในชุดทดลองที่ความเข้มข้นไอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยลดลง 10.46% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (NCF) โดยมีความสูงเฉลี่ยลดลงเป็น 9.2, 13.8 และ 17.5 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดที่ความเข้มข้นไอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ (ตาราง 5) จากการวิเคราะห์แนวโน้มความสูงของถั่วเหลือง พบว่า ทุกความเข้มข้นของไอโซนในแต่ละระดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกระยะการเจริญเติบโต (ภาพ 15) ซึ่งสามารถบ่งบอกว่า ถั่วเหลืองได้รับปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของลำต้นในปริมาณที่เพียงพอ ข้อมูลความสูงที่ได้จึงเป็นผลกระทบที่เกิดจากไอโซนโดยตรง

ตาราง 5 ความสูงเฉลี่ยลำต้น ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความสูงเฉลี่ยของลำต้น (เซนติเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความสูงเฉลี่ยเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	18.82±2.74 ^a	17.89±2.67 ^a	16.14±2.79 ^a	+5.20	-9.78
V4	39.86±2.57 ^a	35.72±4.20 ^{ab}	30.87±2.90 ^b	+11.60	-13.58
R1	50.98±1.81 ^a	46.14±2.84 ^b	42.58±1.18 ^b	+10.49	-7.72
R3	61.60±0.64 ^a	58.53±0.27 ^b	52.41±1.58 ^c	+5.25	-10.46
R5	73.67±2.08 ^a	67.74±1.79 ^b	59.84±2.35 ^c	+8.75	-11.66
R8	84.22±2.21 ^a	77.14±0.33 ^b	66.79±2.72 ^c	+9.18	-13.42

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$

+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 15 แนวโน้มความสูงเฉลี่ยของลำต้นถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

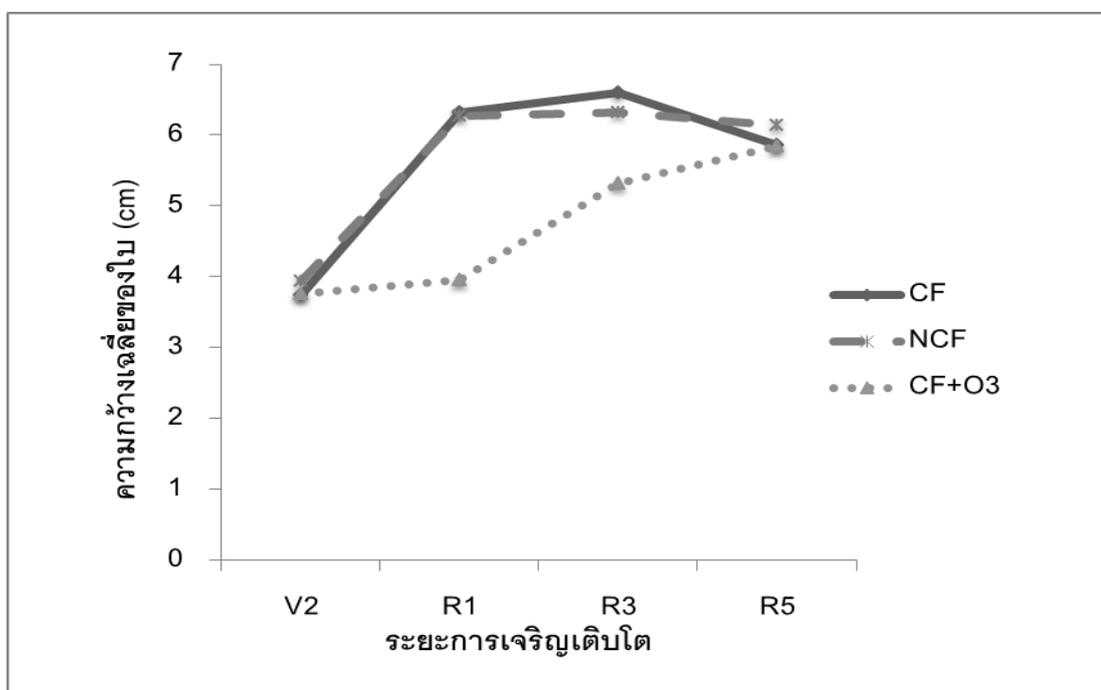
2. ความกว้างของใบ (Leaf width)

เมื่อพิจารณาจากตาราง 6 พบว่า ความกว้างเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอก (R1) จนถึงระยะเริ่มติดฝัก (R3) มีค่าเฉลี่ยลดลง 36.94% และ 15.82% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยเฉพาะในระยะเริ่มออกดอก ความกว้างเฉลี่ยของใบที่ได้รับโอโซนความเข้มข้นสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าลดลง 2.3 เซนติเมตร หรือแคบกว่าใบปกติประมาณหนึ่งเท่า และจากการวิเคราะห์ความกว้างเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองตามระยะการเจริญเติบโต พบว่า ทุกความเข้มข้นของโอโซนในแต่ละระดับ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระยะที่เริ่มมีใบประกอบสองใบ และเริ่มลดลงในระยะเริ่มติดฝัก (ภาพ 16) ซึ่งเป็นระยะที่เริ่มมีการสะสมสารอาหารเพื่อใช้ในการพัฒนาของฝัก ถั่วเหลืองจะเริ่มลดการเจริญเติบโตทั้งทางลำต้นและใบ

ตาราง 6 ความกว้างเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความกว้างเฉลี่ยของใบ (เซนติเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความกว้างเฉลี่ยใบเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	3.74±0.41 ^a	3.94±0.51 ^a	3.77±0.39 ^a	- 5.08	- 4.31
R1	6.33±0.29 ^a	6.28±0.10 ^a	3.96±0.11 ^b	+ 0.80	- 36.94
R3	6.60±0.05 ^a	6.32±0.17 ^a	5.32±1.16 ^b	+ 4.43	- 15.82
R5	5.87±0.19 ^a	6.15±0.18 ^a	5.85±0.18 ^a	- 4.55	- 4.88

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 16 แนวโน้มความกว้างเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

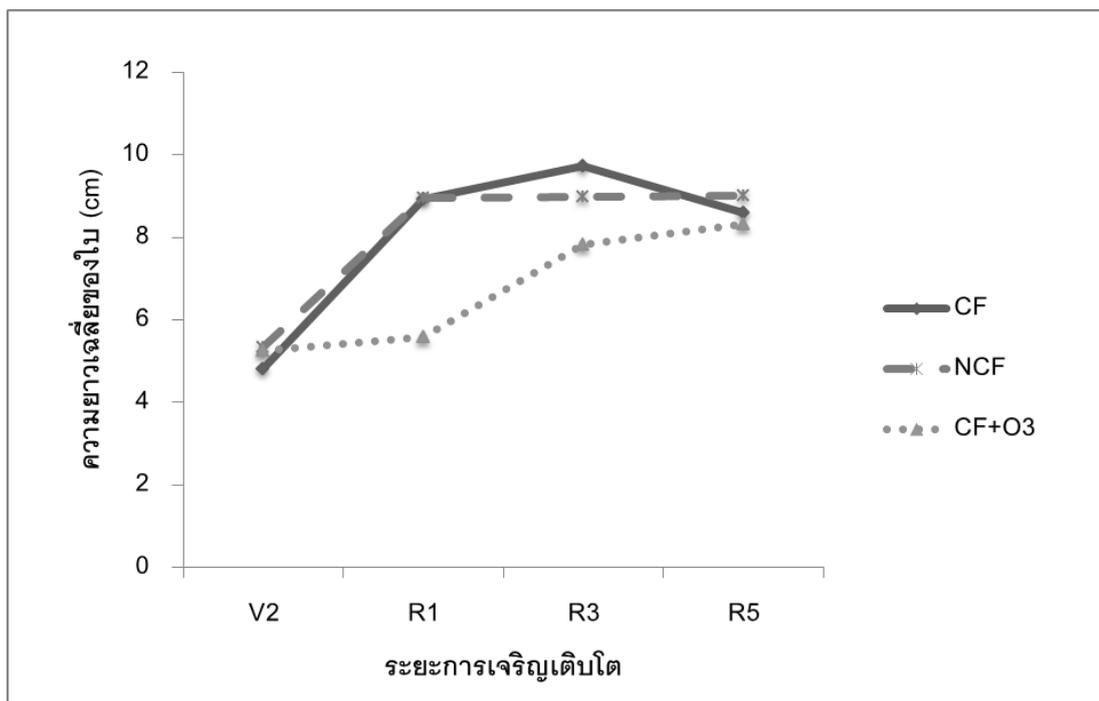
3. ความยาวของใบ (Leaf length)

ความยาวเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน เมื่อพิจารณาค่าดังตาราง 7 พบว่า โอโซนส่งผลให้ความยาวเฉลี่ยของใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระยะเริ่มออกดอก (R1) โดยในชุดทดลองที่ความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยลดลง 39.94% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากภาพ 17 พบว่า ค่าความยาวเฉลี่ยของใบตามระยะการเจริญเติบโต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระยะที่เริ่มมีใบประกอบสองใบ และเริ่มลดลงในระยะเริ่มติดฝัก ในทุกระดับความเข้มข้นของโอโซน ซึ่งสอดคล้องกับความกว้างเฉลี่ยของใบถั่วเหลือง เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยความกว้างและความยาวของใบอย่างละเอียด สามารถบอกได้ว่า ใบของถั่วเหลืองจะมีขนาดเล็กลงเมื่อได้รับโอโซนที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

ตาราง 7 ความยาวเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความยาวเฉลี่ยของใบ (เซนติเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความยาวเฉลี่ยใบเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	4.82±0.82 ^a	5.33±0.82 ^a	5.26±0.60 ^a	- 9.57	- 1.31
R1	8.93±0.40 ^a	8.95±0.09 ^a	5.58±0.18 ^b	- 0.22	- 37.65
R3	9.73±0.81 ^a	8.99±0.18 ^a	7.83±1.50 ^a	+ 8.23	-12.90
R5	8.61±0.16 ^a	9.00±0.27 ^{ab}	8.33±0.27 ^b	- 4.33	- 7.44

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 17 แนวโน้มความยาวเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

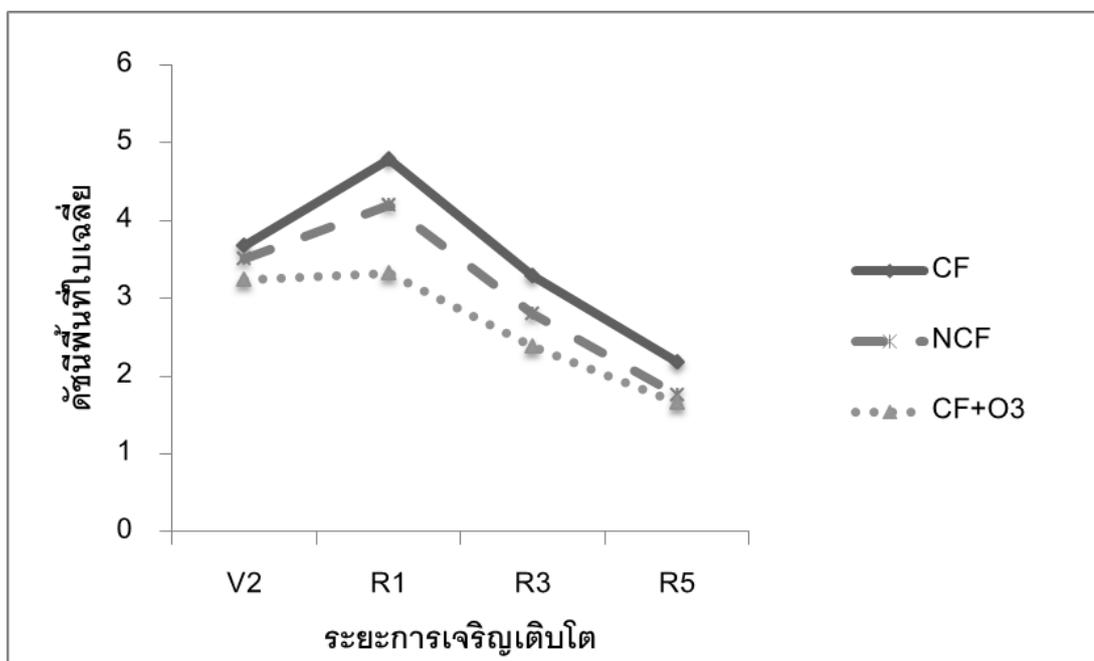
4. ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf area index)

เมื่อคำนวณค่าดัชนีพื้นที่ใบด้วยสมการ $LAI = (0.74 \times LW)/G$ แสดงค่าดังตาราง 8 พบว่า ค่าดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ได้รับโอโซน ลดลงตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเริ่มติดเมล็ด มีค่าเฉลี่ยลดลง 20.27%, 15.05 % และ 5.14% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากภาพ 18 เมื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นที่ใบตามระยะการเจริญเติบโต มีแนวโน้มลดลง ตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับขนาดของใบที่เล็กลง แต่พื้นที่ทรงพุ่มไม่ได้มีค่ามากขึ้น (กิ่งและก้านของใบไม่ได้รับผลกระทบจากโอโซน ขนาดทรงพุ่มจึงไม่ได้เล็กลง) ทำให้ค่าดัชนีพื้นที่ใบที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน มีค่าเฉลี่ยลดลง

ตาราง 8 ดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ดัชนีพื้นที่ใบ			การลดลงและเพิ่มขึ้นของดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ยเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	3.68±0.63 ^a	3.50±1.17 ^a	3.24±1.07 ^a	+ 5.14	- 7.43
R1	4.78±0.33 ^a	4.19±0.26 ^a	3.32±0.12 ^c	+ 14.08	- 20.76
R3	3.30±0.27 ^a	2.79±0.08 ^{ab}	2.37±0.36 ^b	+ 18.28	- 15.05
R5	2.18±0.38 ^a	1.75±0.03 ^{ab}	1.66±0.05 ^b	+ 24.57	- 5.14

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 18 แนวโน้มดัชนีพื้นที่ใบเฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ผลกระทบของไอโซนต่อสัณฐานวิทยาของใบถั่วเหลือง

1. ปริมาณรงควัตถุในใบ (Pigment content)

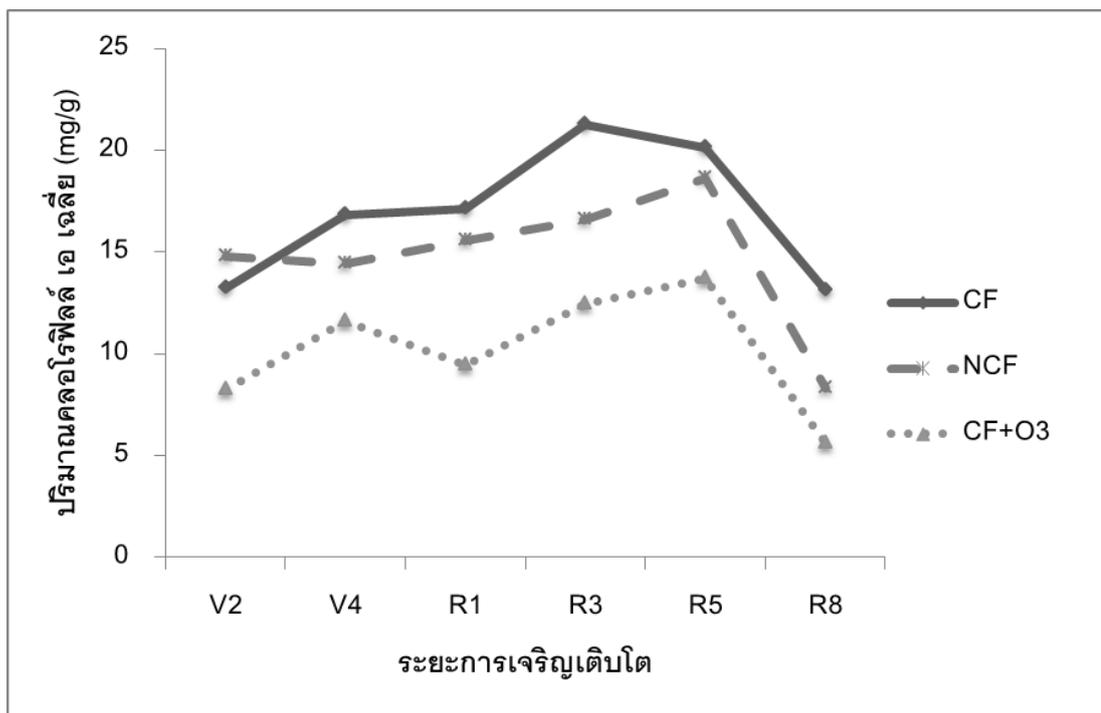
1.1 คลอโรฟิลล์ เอ (Chlorophyll a)

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ย จากตาราง 9 ที่มีการตอบสนองต่อไอโซนในทุกๆระยะการเจริญเติบโต พบว่า ตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ มีค่าลดลง 64.44%, 25.18%, 26.56% และ 32.33% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้ยังมีค่าเฉลี่ยลดลงจากใบปกติที่ไม่ได้รับไอโซน 9.5, 8.8, 7.5 และ 7.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ย ตามระยะการเจริญเติบโต (ภาพ 19) สามารถอธิบายได้ว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วงแรกของการเจริญเติบโต และเริ่มลดลง หลังจากช่วงระยะที่เริ่มมีการพัฒนาของเมล็ดในฝัก

ตาราง 9 ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ย ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อกรัม)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ย เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ⁺⁰³	CF	CF ⁺⁰³
V2	13.24±0.49 ^a	14.79±5.23 ^{ab}	8.25±0.68 ^b	- 10.48	- 44.22
V4	16.84±1.19 ^a	14.41±1.05 ^{ab}	11.59±2.04 ^b	+ 16.86	- 19.57
R1	17.13±0.84 ^a	15.54±0.87 ^a	9.45±0.98 ^b	+ 10.23	- 64.44
R3	21.25±1.00 ^a	16.60±1.14 ^b	12.42±1.62 ^c	+ 28.01	- 25.18
R5	20.15±0.36 ^a	18.64±0.81 ^a	13.69±2.42 ^b	+ 8.10	- 26.56
R8	13.11±0.95 ^a	8.29±0.26 ^b	5.61±1.23 ^c	+ 58.14	- 32.33

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 19 แนวโน้มปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เจลีย์ ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

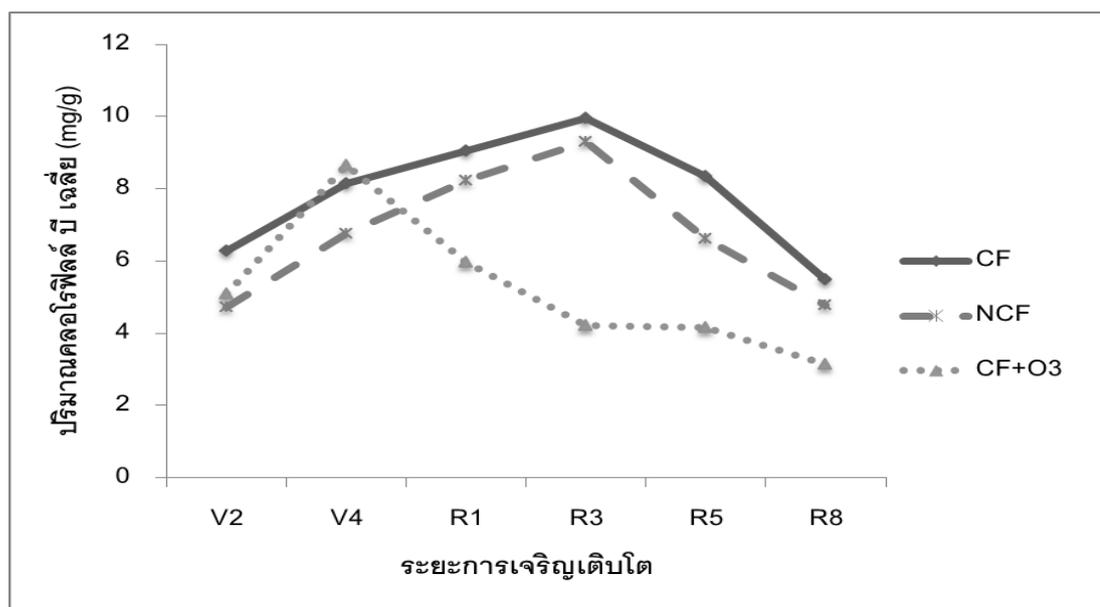
1.2 คลอโรฟิลล์ บี (Chlorophyll b)

เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตาราง 10 พบว่า ความเข้มข้นของโอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เจลีย์ ตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว มีค่าลดลง 27.28%, 54.72%, 59.14% และ 34.10% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยลดลงจากใบปกติที่ไม่ได้รับโอโซน 3.1, 5.8, 4.2 และ 2.3 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือมีปริมาณคลอโรฟิลล์ บี ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งจากใบปกติที่ไม่ได้รับโอโซน จากภาพ 19 เมื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เจลีย์ ตามระยะการเจริญเติบโต พบว่า มีแนวโน้มลดลงหลักจากที่มีการติดเมล็ด ซึ่งเป็นระยะที่เริ่มมีการสะสมสารอาหารในเมล็ดของถั่วเหลือง ใบของถั่วเหลืองเริ่มแก่และลดการเจริญเติบโต

ตาราง 10 ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ย ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อกรัม)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ย เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	6.27±0.97 ^a	4.74±0.12 ^{ab}	5.10±0.48 ^b	+ 32.28	+ 7.59
V4	8.16±1.02 ^a	6.77±1.55 ^a	8.66±1.78 ^a	+ 20.53	+ 27.92
R1	9.04±0.38 ^a	8.22±1.21 ^a	5.98±1.33 ^b	+ 9.98	- 27.26
R3	9.97±1.59 ^a	9.32±1.36 ^a	4.22±1.53 ^b	+ 6.97	- 54.72
R5	8.35±0.32 ^a	6.62±2.22 ^{ab}	4.16±1.48 ^b	+ 32.28	+ 7.59
R8	5.49±0.68 ^a	4.78±0.24 ^a	3.15±0.89 ^b	+ 14.85	- 34.10

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 20 แนวโน้มปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ย ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

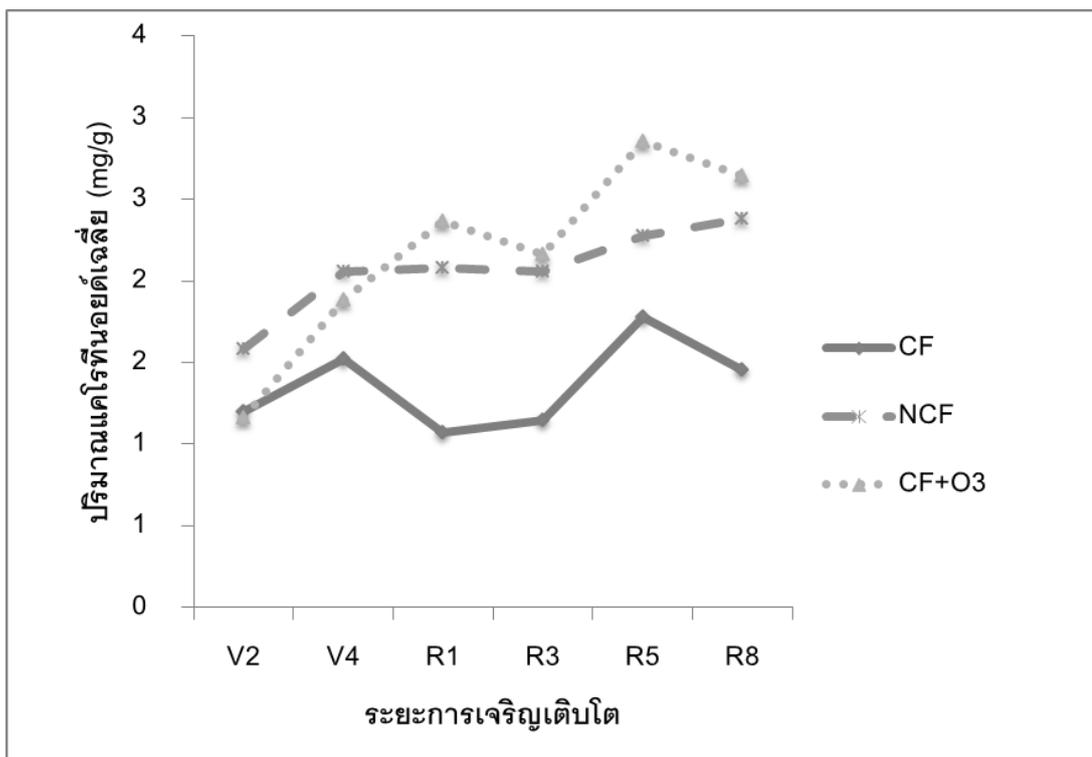
1.3 แคโรทีนอยด์ (Carotenoid)

จากตาราง 11 พบว่า ความเข้มข้นของไอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ ตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว มีปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ย เพิ่มขึ้น 13.94%, 4.85%, 25.44% และ 11.35% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม เมื่อพิจารณาปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ย ตามระยะการเจริญเติบโต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะการเจริญเติบโต (ภาพ 21) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในถั่วเหลืองที่ได้รับไอโซนความเข้มข้นเทียบเท่าธรรมชาติและสูงกว่าธรรมชาติ มีแนวโน้มของค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี

ตาราง 11 ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ย (มิลลิกรัมต่อกรัม)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ย เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ⁺⁰³	CF	CF ⁺⁰³
V2	1.20±0.06 ^b	1.58±0.10 ^a	1.17±0.28 ^b	- 24.05	- 25.95
V4	1.52±0.08 ^b	2.06±0.07 ^a	1.88±0.15 ^a	- 26.21	- 8.74
R1	1.07±0.02 ^c	2.08±0.14 ^b	2.37±0.17 ^a	- 48.56	+ 13.94
R3	1.15±0.13 ^b	2.06±0.05 ^a	2.16±0.23 ^a	- 44.18	+ 4.85
R5	1.78±0.07 ^c	2.28±0.18 ^b	2.86±0.16 ^a	- 21.93	+ 25.44
R8	1.46±0.28 ^b	2.38±0.18 ^a	2.65±0.08 ^a	- 38.66	+ 11.35

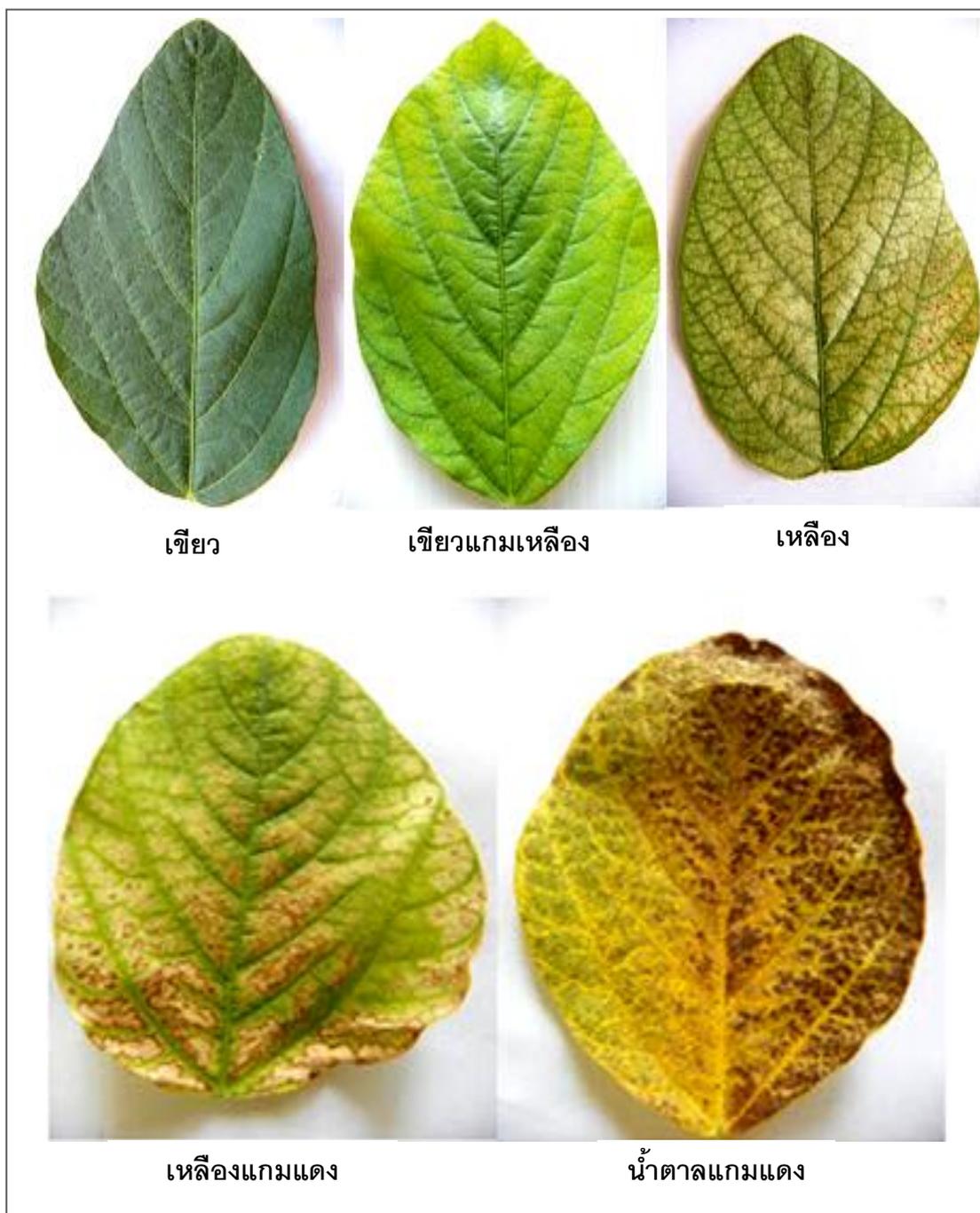
หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
 + ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 21 แนวโน้มปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

2. สีของใบ (Leaf Color)

ใบถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน เมื่อทำการสุ่มเก็บตัวอย่างใบจำนวน 30 ใบ และแบ่งตามสีของใบถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน ตามวิธีของ Mikkelsen and Jorgensen (1996) ได้ 5 ระดับ ดังนี้ คือ เขียว (green), เขียวแกมเหลือง (yellowish green), เหลือง (yellow), เหลืองแกมแดง (reddish yellow) และน้ำตาลแดง (reddish brown) (ภาพ 22) หาค่าเปอร์เซ็นต์การปรากฏสีของใบถั่วเหลืองทั้งหมด (ตาราง 12) พบว่า ใบของถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบจากโอโซนในระยะเริ่มมีใบประกอบสองใบจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว มีแนวโน้มของสีที่เปลี่ยนไปตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น คือ ที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติใบมีสีเขียว ที่ความเข้มข้นโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ ใบเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวแกมเหลือง และที่ความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ ใบเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองแกมแดง (ภาพ 23)



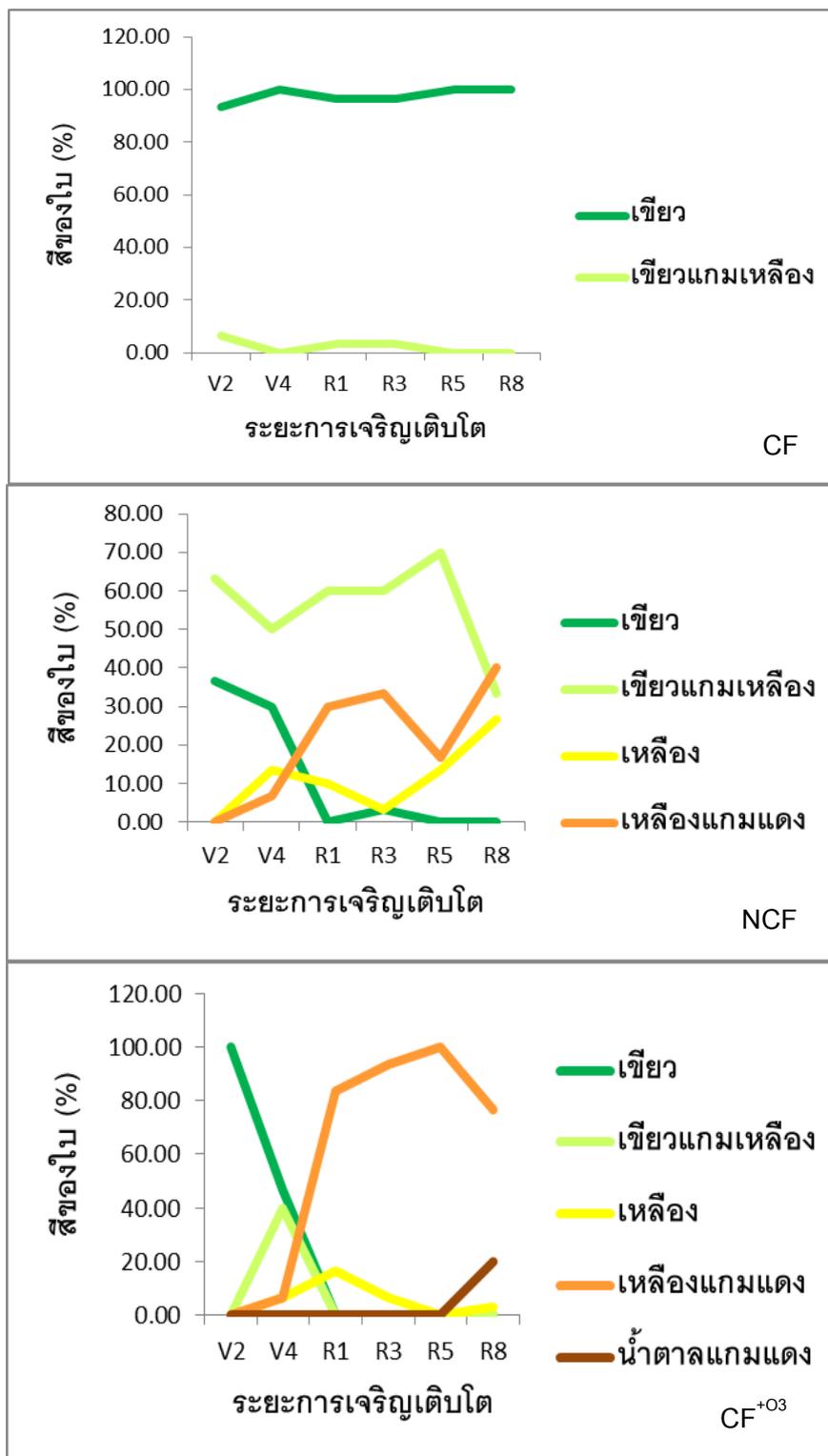
ภาพ 22 ระดับสีของใบถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบของไอน์

ที่มา: ดัดแปลงจาก Mikkelsen and Jorgensen, 1996

ตาราง 12 สีของใบถั่วเหลืองเมื่อได้รับไอโซนที่ความเข้มข้นต่างกัน

ระยะการ เจริญเติบโต	ระดับความ เข้มข้นของ ไอโซน	สีของใบ (เปอร์เซ็นต์)				
		เขียว	เขียวแกม เหลือง	เหลือง	เหลือง แกมแดง	น้ำตาล แกมแดง
V2	CF	93.33	6.67	0	0	0
	NCF	36.67	63.33	0	0	0
	CF ⁺⁰³	100	0	0	0	0
V4	CF	100	0	0	0	0
	NCF	30	50	13.33	6.67	0
	CF ⁺⁰³	46.67	40	6.67	6.67	0
R1	CF	96.67	3.33	0	0	0
	NCF	0	60	10	30	0
	CF ⁺⁰³	0	0	16.67	83.33	0
R3	CF	96.67	3.33	0	0	0
	NCF	3.33	60	3.33	33.33	0
	CF ⁺⁰³	0	0	6.67	93.33	0
R5	CF	100	0	0	0	0
	NCF	0	70	13.33	16.67	0
	CF ⁺⁰³	0	0	0	100	0
R8	CF	100	0	0	0	0
	NCF	0	33.33	26.67	40	0
	CF ⁺⁰³	0	0	3.33	76.67	20

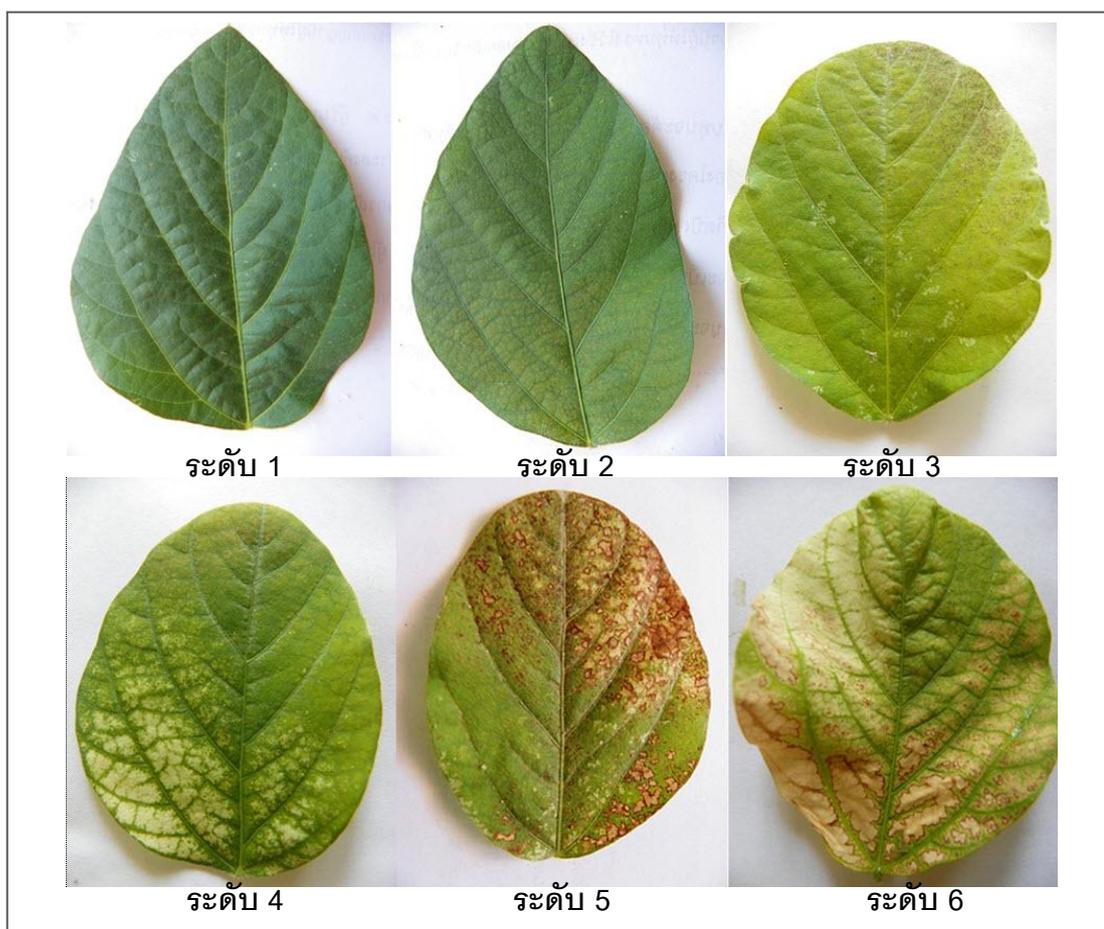
หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์สีของใบที่มากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นของไอโซน



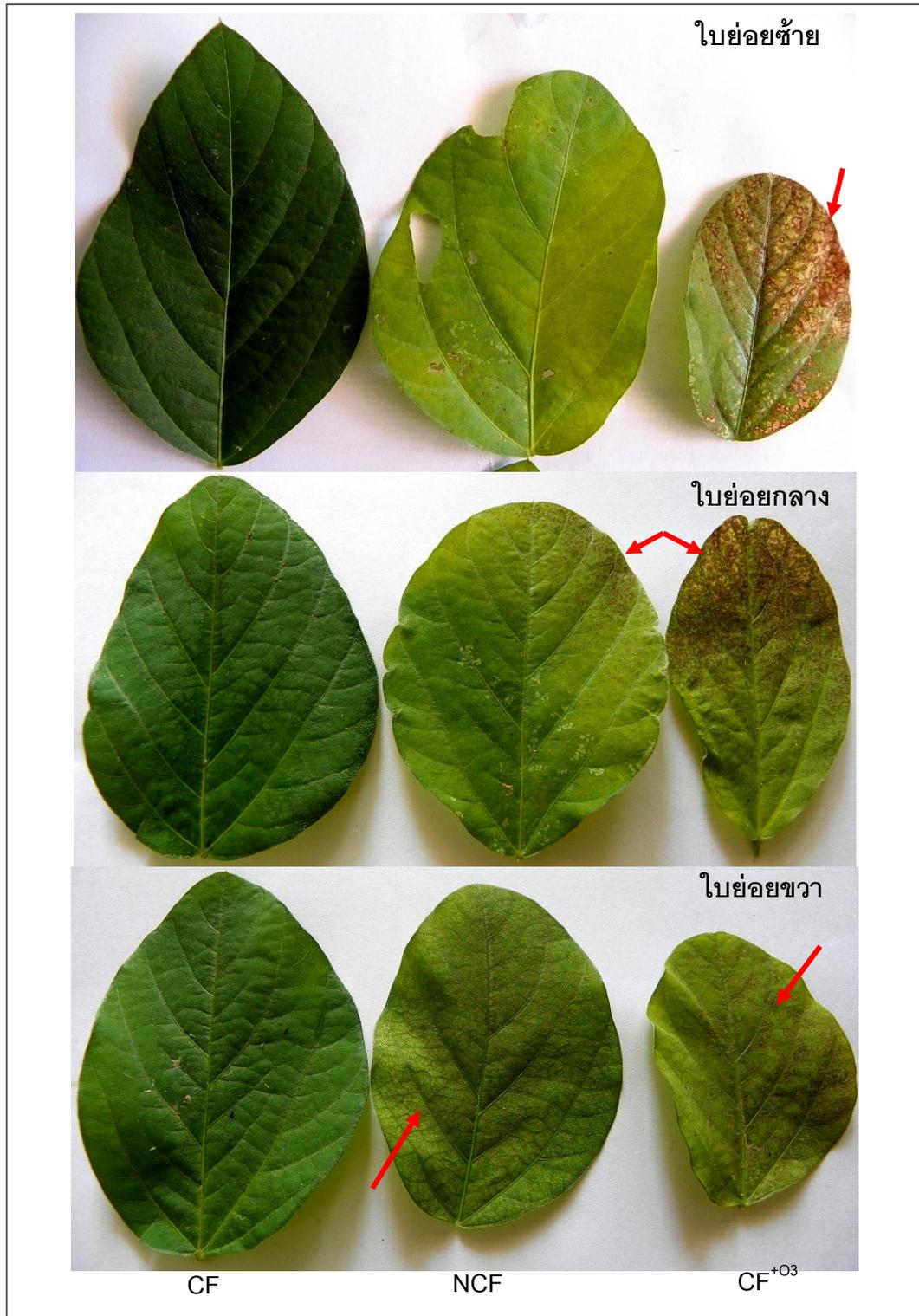
ภาพ 23 แนวโน้มการเปลี่ยนสีของใบถั่วเหลือง

3. ความเสียหายของใบ (Leaf symptom)

ใบถั่วเหลืองที่ได้รับความเสียหายจากโอโซนแสดงดังภาพ 25 เมื่อทำการเก็บตัวอย่างใบทั้ง 30 ใบ และแบ่งระดับความเสียหายจากโอโซนได้ 6 ระดับตามวิธีของ Vollenweider and Goerg (2005) ดังนี้ คือ 1 (0%), 2 (1-6%), 3 (7-25%), 4 (26-50%), 5 (51-75%) และ 6 (>75%) (ภาพ 24) และหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน (ตาราง 13) พบว่า ใบของถั่วเหลืองที่ได้รับผลกระทบจากโอโซนในระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว มีแนวโน้มความเสียหายของใบเพิ่มขึ้น คือ ในชุดทดลองที่ความเข้มข้นโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติใบของถั่วเหลืองไม่ปรากฏความเสียหาย ชุดทดลองที่ความเข้มข้นโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ ใบของถั่วเหลืองมีความเสียหาย 50% และ ในชุดทดลองที่ความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ ใบของถั่วเหลืองมีความเสียหายมากกว่า 75% (ภาพ 26)



ภาพที่ 24 ระดับความเสียหายของใบถั่วเหลือง

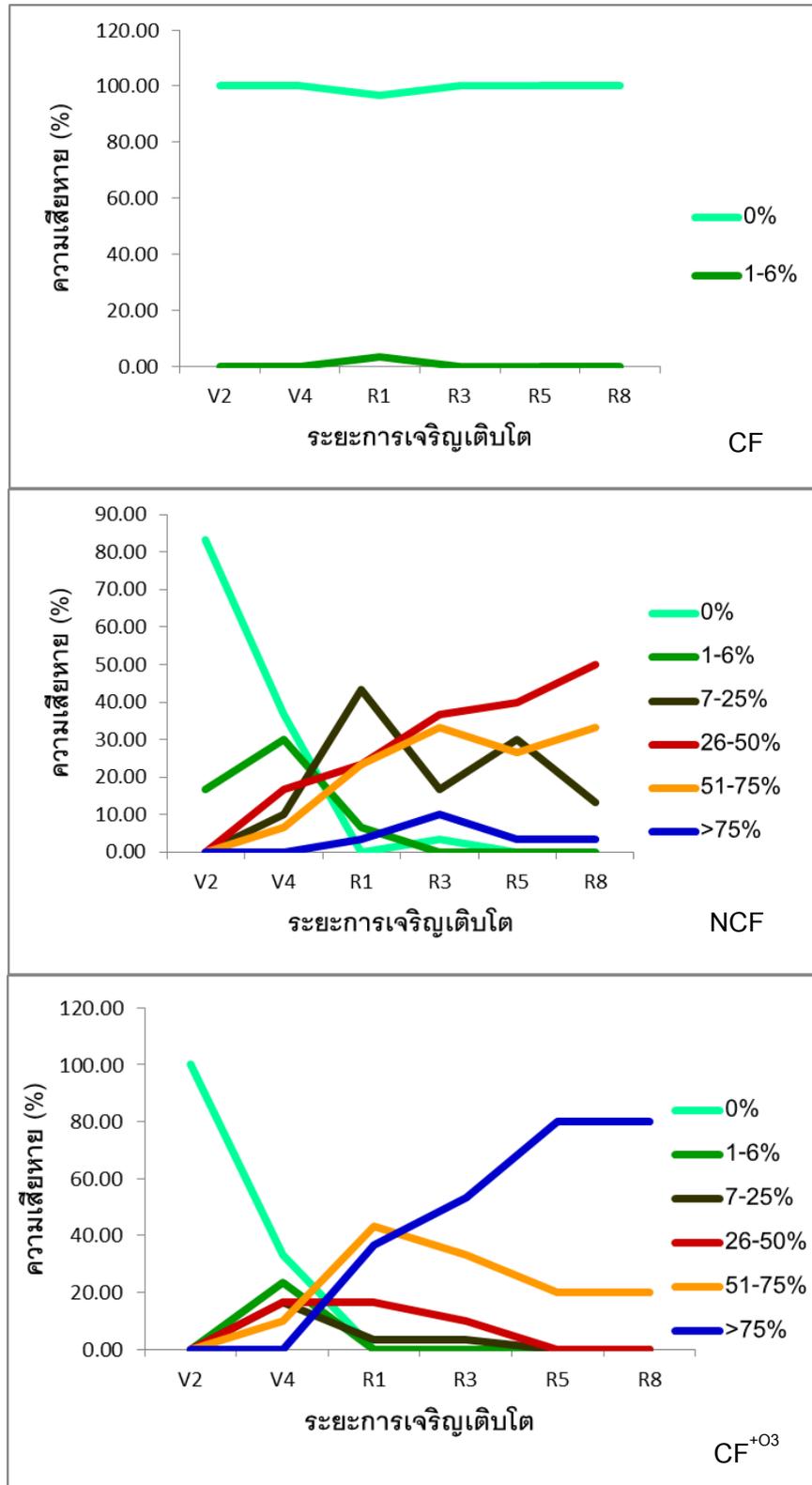


ภาพ 25 ลักษณะของใบที่เกิดความเสียหาย (ลูกศรชี้) จากโอโซนที่ระยะเริ่มติดฝัก (R3)

ตาราง 13 จำนวนใบถั่วเหลืองที่ได้รับความเสียหายเมื่อได้รับไอโซนที่ความเข้มข้นต่างกัน

ระยะเวลา เจริญเติบโต	ระดับความ เข้มข้นของ ไอโซน	จำนวนใบที่ได้รับความเสียหาย (เปอร์เซ็นต์)					
		1	2	3	4	5	6
V2	CF	100	0	0	0	0	0
	NCF	83.33	16.67	0	0	0	0
	CF ⁺⁰³	100	0	0	0	0	0
V4	CF	100	0	0	0	0	0
	NCF	36.67	30	10	16.67	6.67	0
	CF ⁺⁰³	33.33	23.33	16.67	16.67	10	0
R1	CF	96.67	3.33	0	0	0	0
	NCF	0	6.67	43.33	23.33	23.33	3.33
	CF ⁺⁰³	0	0	3.33	16.67	43.33	36.67
R3	CF	100	0	0	0	0	0
	NCF	3.33	0	16.67	36.67	33.33	10
	CF ⁺⁰³	0	0	3.33	10	33.33	53.33
R5	CF	100	0	0	0	0	0
	NCF	0	0	30	40	26.67	3.33
	CF ⁺⁰³	0	0	0	0	20	80
R8	CF	100	0	0	0	0	0
	NCF	0	0	13.33	50	33.33	3.33
	CF ⁺⁰³	0	0	0	0	20	80

หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของใบที่มากที่สุดในแต่ละความเข้มข้นของไอโซน



ภาพ 26 แนวโน้มความเสียหายของใบถั่วเหลือง

ผลกระทบของไอโซนต่อกายวิภาคของใบถั่วเหลือง

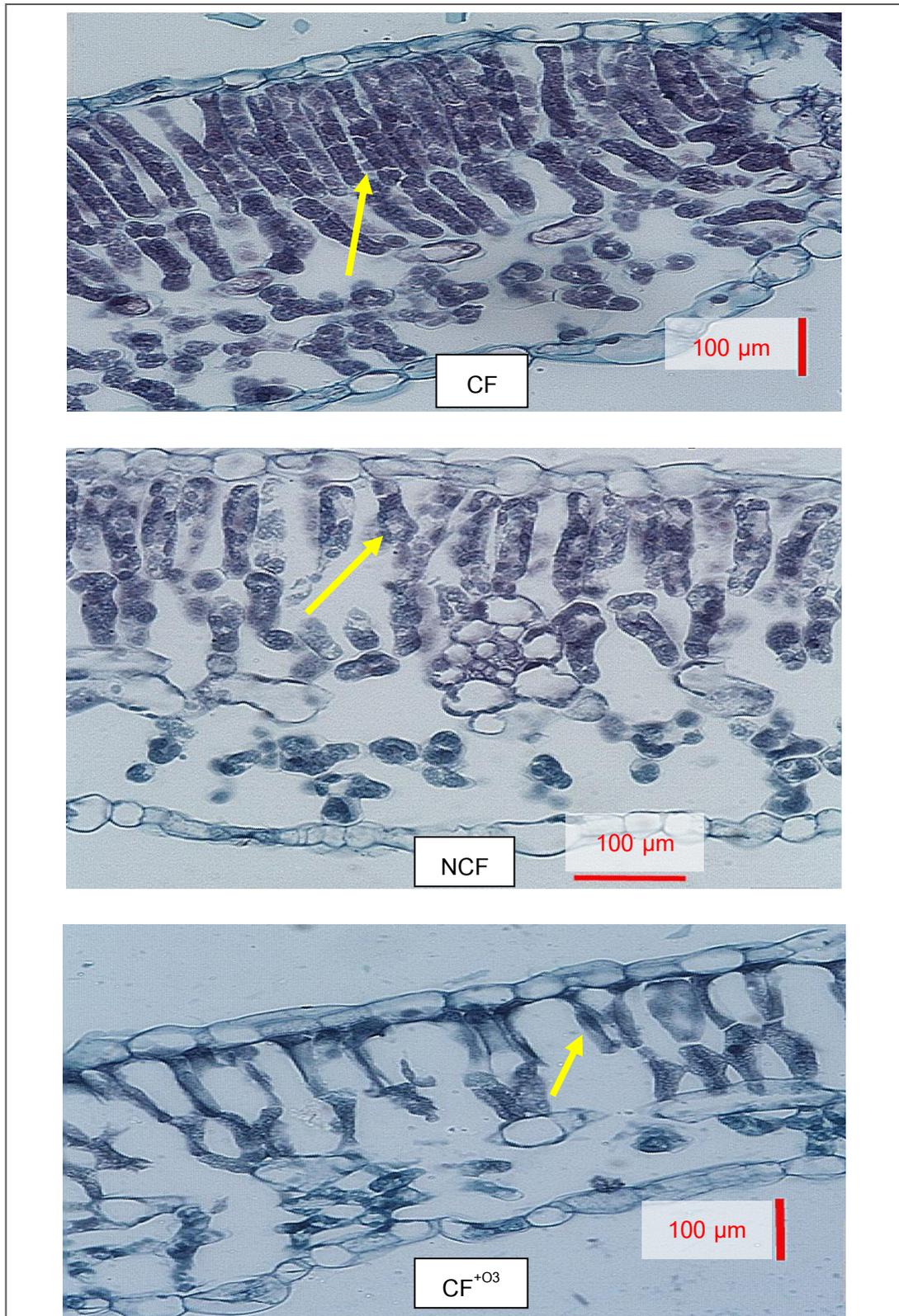
1. ความหนาของชั้นแพลลิสเมโซฟิลล์ (Palisade mesophyll layer width)

ค่าความหนาชั้นแพลลิสเมโซฟิลล์ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นของไอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ (ตาราง 14) พบว่า ในระยะเริ่มติดฝักจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว มีค่าลดลง 3.80%, 21.09% และ 38.34% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยเซลล์แพลลิสเมโซฟิลล์ เกิดความเสียหายโดยมีความหนาแน่นของเซลล์และคลอโรพลาสต์ลดลงผนังเซลล์ยวบตัวหรือเหี่ยวลง พบช่องว่างระหว่างเซลล์มากขึ้น (ภาพ 27) ในทางกลับกันเมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ความเข้มข้นไอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ เซลล์แพลลิสเมโซฟิลล์มีจำนวนและความหนาแน่นมากขึ้น เซลล์เต่งไม่ยวบตัว คลอโรพลาสต์เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

ตาราง 14 ความหนาเฉลี่ยชั้นแพลลิสเมโซฟิลล์ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความหนาเฉลี่ยชั้นแพลลิสเมโซฟิลล์ (ไมโครเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความหนาเฉลี่ยชั้นแพลลิสเมโซฟิลล์ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ⁺⁰³	CF	CF ⁺⁰³
V2	25.64±3.44 ^a	27.80±2.09 ^a	28.19±2.83 ^a	- 7.77	+ 1.40
V4	12.94±1.35 ^c	26.90±1.83 ^b	30.38±4.38 ^a	- 51.90	+ 12.94
R1	29.36±3.17 ^{ab}	27.27±2.76 ^b	30.76±2.71 ^a	+ 5.73	+ 10.77
R3	24.11±2.80 ^a	26.80±3.67 ^a	25.82±6.98 ^a	- 10.04	- 3.80
R5	25.56±1.93 ^b	29.16±2.02 ^a	23.01±4.03 ^b	- 12.35	- 21.09
R8	43.49±18.53 ^a	30.91±1.87 ^b	19.06±4.08 ^c	+ 40.70	- 38.34

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง



ภาพ 27 แพลลิสโตไมโซฟิลล์กำลังขยาย 20 เท่า (ลูกศรชี้) ที่ระยะเริ่มติดเมล็ด

2. ความหนาของชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์ (Spongy mesophyll layer width)

เมื่อพิจารณาค่าจากตาราง 15 พบว่า ความหนาเฉลี่ยของชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับไอโซนที่ความเข้มข้นสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 8.1 ไมโครเมตร และ 7.6 ไมโครเมตร ในระยะเริ่มออกดอกและติดเมล็ดตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับใบที่ได้รับความเข้มข้นไอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ ผลกระทบจากไอโซนที่เกิดกับเซลล์สปีนจิมิโซฟิลล์ เห็นผลได้ไม่ชัดเจนนัก เนื่องจากเซลล์มีจำนวนที่น้อยกว่าแพลลิสเมสโซฟิลล์ และอยู่บริเวณด้านล่างของผิวใบจึงสัมผัสกับไอโซนได้น้อยกว่า

ตาราง 15 ความหนาเฉลี่ยชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์ของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความหนาเฉลี่ยชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์ (ไมโครเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความหนาเฉลี่ยชั้นสปีนจิมิโซฟิลล์ เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	24.42±2.78 ^c	30.46±2.98 ^b	33.58±4.09 ^a	- 19.83	+ 10.24
V4	15.56±2.35 ^b	31.12±2.93 ^a	32.16±4.39 ^a	- 50.00	+ 3.34
R1	25.90±6.52 ^b	30.54±3.33 ^a	31.65±4.33 ^a	- 15.19	+ 3.63
R3	25.70±5.07 ^b	29.81±4.45 ^a	33.31±4.79 ^a	- 13.79	+ 11.74
R5	33.79±3.71 ^a	31.71±4.55 ^a	29.22±3.16 ^c	+ 6.56	- 7.85
R8	44.91±17.06 ^a	29.22±3.16 ^b	31.59±5.52 ^b	+ 53.70	+ 8.11

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง

3. พื้นที่ช่องว่างทั้งหมดภายในใบ (Total leaf airspace)

ค่าเฉลี่ยพื้นที่ช่องว่างทั้งหมดภายในใบของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ที่ตอบสนองต่อไอโซน พบว่า ในชุดทดลองที่ความเข้มข้นไอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ระยะที่มีใบประกอบสีเขียวจนถึงระยะเริ่มติดฝักเท่ากับ 48.92%, 16.52% และ 19.76% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ตาราง 16) พื้นที่ช่องว่างทั้งหมดภายในใบที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการยุบตัวและมีการทำลายเซลล์พเลิเซด ทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อเยื่อมากขึ้น และยังเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านของไอโซนให้เข้าไปในทำลายเนื้อเยื่อของใบมากขึ้น

ตาราง 16 พื้นที่ช่องว่างทั้งหมดภายในใบเฉลี่ยของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	พื้นที่ช่องว่างทั้งหมดภายในใบ (ตารางไมโครเมตร; 10^3)			การลดลงและเพิ่มขึ้น ของพื้นที่ช่องว่าง ทั้งหมดภายในใบ เฉลี่ยเมื่อเทียบกับชุด ควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	19.07±3.92 ^b	24.83±5.09 ^a	24.69±3.30 ^a	- 23.19	- 0.56
V4	10.82±3.24 ^c	25.88±5.36 ^b	38.53±12.82 ^a	- 58.16	+ 48.92
R1	26.29±4.69 ^a	26.48±5.56 ^a	30.85±5.36 ^a	- 0.71	+ 16.52
R3	18.59±6.34 ^b	29.70±8.51 ^a	35.57±7.94 ^a	- 37.41	+ 19.76
R5	25.18±7.80 ^b	33.87±10.50 ^a	35.17±9.69 ^a	- 25.67	- 3.85
R8	37.71±19.69 ^a	43.79±8.99 ^a	36.69±6.82 ^a	- 13.88	- 16.21

หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง

4. ความหนาของใบ (Total leaf width)

จากค่าเฉลี่ยความหนาของใบดังตาราง 17 พบว่า ในชุดทดลองที่ความเข้มข้นไอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าลดลง 26.28% และ 17.98% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ในระยะเริ่มติดเมล็ดจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว ซึ่งความหนาของใบ สามารถบ่งบอกได้ว่าเนื้อเยื่อมีการตาย ทำให้เกิดการยุบตัวของเนื้อเยื่อ เนื่องจากได้รับความเข้มข้นไอโซนสะสม รวมทั้งเป็นระยะที่การซ่อมแซมของเนื้อเยื่อลดลง เนื้อเยื่อจึงเริ่มเสื่อมสภาพและสูญเสียการทำงาน

ตาราง 17 ความหนาเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

ระยะการเจริญเติบโต	ความหนาเฉลี่ยของใบ (ไมโครเมตร)			การลดลงและเพิ่มขึ้นของความหนาเฉลี่ยของใบเมื่อเทียบกับชุดควบคุม (เปอร์เซ็นต์)	
	CF	NCF	CF ^{+O3}	CF	CF ^{+O3}
V2	256.86±33.00 ^c	477.65±29.63 ^b	396.47±74.71 ^a	- 45.81	- 17.00
V4	247.19±18.03 ^b	494.86±48.34 ^a	470.95±91.36 ^a	- 50.05	- 4.83
R1	375.03±39.22 ^b	496.35±33.82 ^a	404.55±44.92 ^b	- 33.13	- 18.50
R3	331.92±79.48 ^b	386.34±41.87 ^a	390.36±43.78 ^a	- 14.09	+ 1.04
R5	515.81±39.96 ^a	479.06±43.66 ^b	353.18±35.07 ^c	+ 7.67	- 26.28
R8	591.14±199.62 ^a	455.68±33.41 ^b	373.75±42.51 ^c	+ 29.73	- 17.98

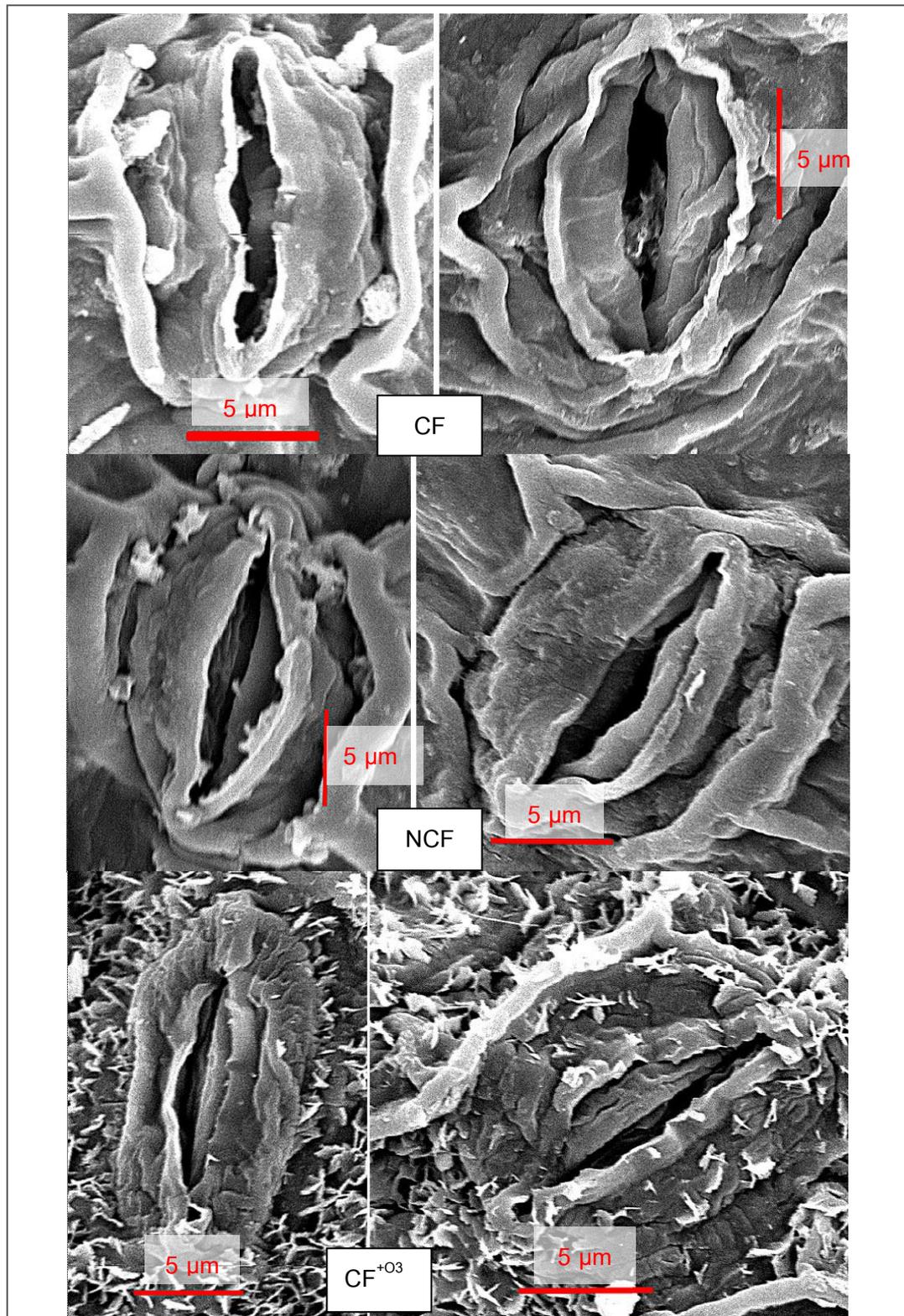
หมายเหตุ: ตัวอักษร a - c แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$
+ ค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น, - ค่าเฉลี่ยลดลง

5. ปากและขนใบ (Stomata and trichomes)

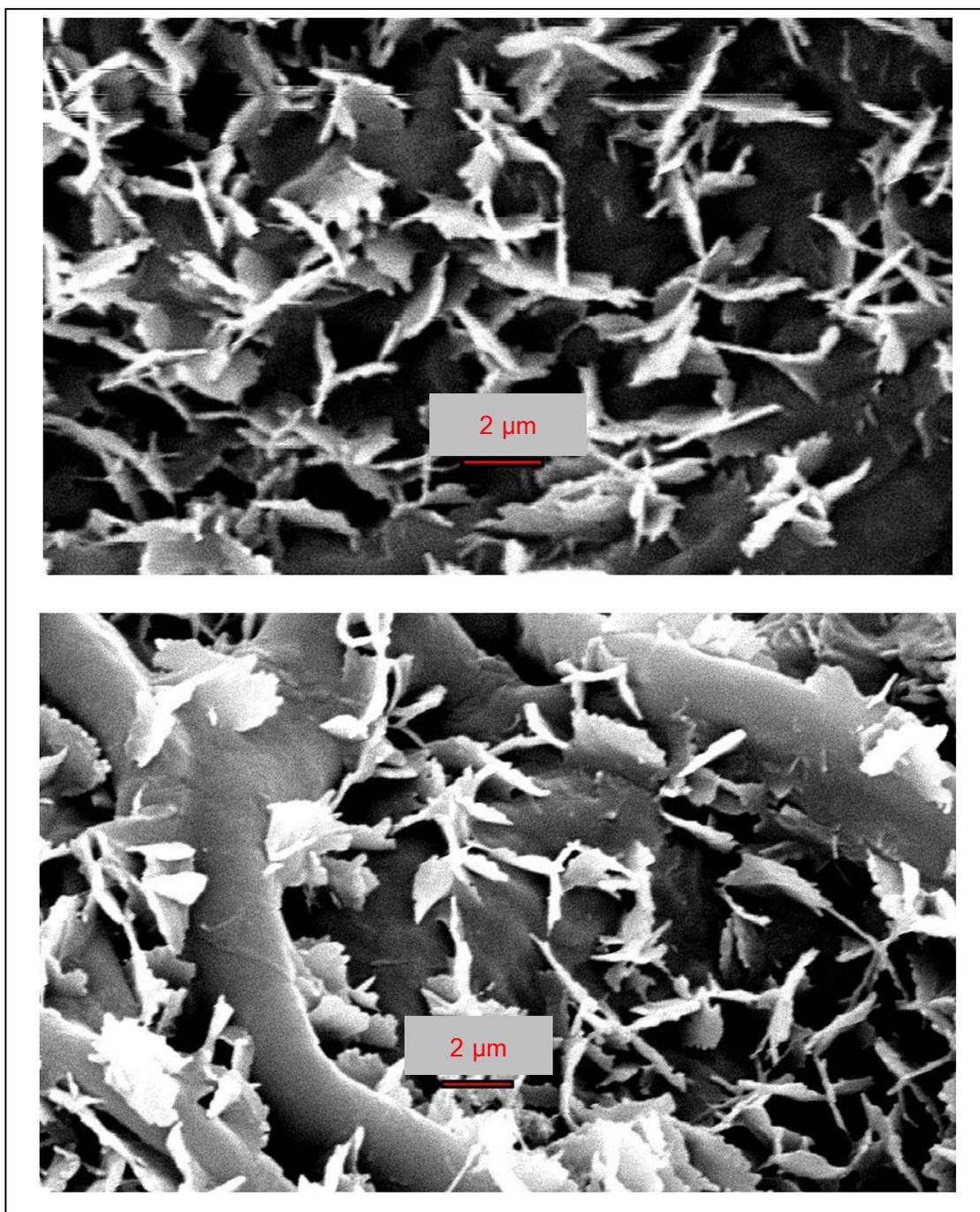
เมื่อทำการถ่ายภาพ SEM ของปากใบและขนใบถั่วเหลืองในระยะเริ่มติดเมล็ด พบว่าปากใบมีขนาดเล็กลง (มีการปิดของปากใบ) ในชุดทดลองที่ระดับไอโซนสูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+03}) เซลล์คุม (Guard cell) มีการยุบตัว และขนาดของขนใบ (trichomes) สั้นลง พบว่า ผิวใบด้านบน (upper epidermis) ลดลง 457.4 μm และผิวใบด้านล่าง (lower epidermis) ลดลง 394.4 μm รวมทั้งยังปรากฏผิวเคลือบคิวตินขึ้นที่บริเวณผิวใบ เนื่องจากพืชป้องกันตัวเองเพื่อลดการสูญเสียน้ำ และส่งผลต่อการสังเคราะห์แสง แสดงดังภาพ 28-29 และตาราง 18

ตาราง 18 ขนาดของขนและปากใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

	ความเข้มข้น ของไอโซน	ผิวใบ	ปากใบ (ไมโครเมตร)		ขนใบ (ไมโครเมตร)
			ความยาว	ความกว้าง	ความยาว
ต่ำกว่า		ผิวใบด้านบน	462.0	237.0	1364.6
ธรรมชาติ		ผิวใบด้านล่าง	402.0	81.0	1420.9
เทียบเท่า		ผิวใบด้านบน	460.3	154.6	1231.9
ธรรมชาติ		ผิวใบด้านล่าง	494.6	126.3	1223.3
สูงกว่า		ผิวใบด้านบน	436.9	96.2	907.2
ธรรมชาติ		ผิวใบด้านล่าง	515.4	73.4	1026.5



ภาพ 28 ลักษณะของปากใบที่ได้รับการฟ่นไอโซนที่ระยะเริ่มติดเมล็ด
 ผิวไบด้านบน (ซ้าย) ผิวไบด้านล่าง (ขวา)



ภาพ 29 ผิวนเคลือบคิวดินเมื่อได้รับการพ่นไอโซนที่ระยะเริ่มติดเมล็ด
ผิวนด้านบน (บน) ผิวนด้านล่าง (ล่าง)