บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลไกการเกิดโอโซนและแนวโน้มในอนาคต

โอโซนตามธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในชั้นสตราโทสเฟียร์ ที่ระดับความสูงมากกว่า 25 กิโลเมตร มีบทบาทสำคัญในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลต ที่ความยาวคลื่นในช่วง 200-400 นาโนเมตร ช่วยกรองรังสีอัลตราไวโอเลตทำให้รังสีส่องไม่ถึงพื้นโลก และเป็นประโยชน์ต่อ มนุษย์ สัตว์ และพืช โอโซนในชั้นสตราโทสเฟียร์เกิดจากปฏิกิริยาดังนี้ (นิพนธ์ และคณิตา ตังคณานุรักษ์, 2552)

โมเลกุลของออกซิเจนในชั้นสตราโตสเฟียร์เกิดการแตกตัวกลายเป็นออกซิเจนอะตอมโดยรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการ

$$O_3 + h\nu \longrightarrow O_2 + O \qquad \lambda = 242.4\ nm$$

เกิดปฏิกิริยาสามโมเลกุลมาจับกัน (three-body reaction) โดยออกซิเจนอะตอมจะชนอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนในบรรยากาศเกิดเป็นโอโซนและให้พลังงานสูงขึ้น จึงต้องมีโมเลกุลที่สาม (third–molecule, M) มารับพลังงานส่วนเกินไปเพื่อให้ได้เป็นโอโซนที่เสถียรมากขึ้นและอยู่ร่วมกับ M ได้ดังสมการ

$$O + O_2 + M\ (N_2, O_2) \longrightarrow O_3 + M \qquad \text{(พลังงานสูงมากขึ้น)}$$

โอโซนที่เกิดในชั้นโทรโปสเฟียร์ (15 กิโลเมตรจากพื้นโลก) เป็นอันตรายกับสิ่งมีชีวิต เพราะสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่น และเปลี่ยนรูปได้ตลอดเวลา ระดับโอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์ที่ระดับความเข้มข้นสูงจะเป็นพิษกับสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะพืชเมื่อได้รับในระดับความเข้มข้นสูงและสัมผัสเป็นระยะเวลานาน ปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่ส่งผลต่อการเพิ่มระดับความเข้มข้นของโอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์ คือการเพิ่มระดับอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศ (Akimoto, et al., 2007) โดยมีอัตราเร่งที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยา คือ สภาวะอุณหภูมิสูง ความเข้มแสงสูง และความเร็วลมต่ำ โทรโปสเฟียริคโอโซนเกิดจากปฏิกิริยาแสงของก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ที่ได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar Radiation) ที่ความยาวคลื่น 300-400 นาโนเมตร โดยที่ M คือ โมเลกุลใดๆ ที่เข้ามาดูดซับพลังงานที่มากเกินพอ (โดยส่วนใหญ่ในบรรยากาศจะเป็น N_2 และ O_2) และโอโซนที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นออกซิเจนโดยก๊าซไนตริคออกไซด์ (NO) แสดงรายละเอียดของปฏิกิริยาในสมการ (Kenneth and Cecil, 1981; Vanloon and Duffy, 2000)

$NO_2 + h\nu\ (<400nm) \longrightarrow O^{\cdot} + NO$ (1)

$O^{\cdot} + O_2 + M \longrightarrow O_3 + M$ (2)

$O_3 + NO \longrightarrow NO_2 + O_2$ (3)

$VOC + OH^{\cdot} \longrightarrow RO_2^{\cdot}$ (4)

$RO_2^{\cdot} + NO \longrightarrow NO_2 + RO^{\cdot}$ (5)

$RO^{\cdot} + O_2 \longrightarrow HO_2^{\cdot} + R'CHO$ (6)

$HO_2^{\cdot} + NO \longrightarrow NO_2 + OH^{\cdot}$ (7)

จากปฏิกิริยาลูกโซ่ (Chain Reaction) ข้างต้นจะเห็นได้ว่าสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile organic compounds, VOCs) จะถูกออกซิไดซ์ และเปลี่ยนเป็น $RO_2^{\cdot}$ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ NO ให้ไปเป็น NO_2 ตามปฏิกิริยาที่ 4 และ 5 โดย NO_2 ที่เกิดขึ้นนี้จะกลายเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการเกิดก๊าซโอโซนในสมการที่ 1 สำหรับ $RO^{\cdot}$ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาตามสมการที่ 5 จะทำปฏิกิริยากับ O_2 ดังสมการที่ 6 ได้ $HO_2^{\cdot}$ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ NO ให้ NO_2 ดังสมการที่ 7 และพบว่าปฏิกิริยานี้ทำให้ปริมาณของ NO ลดลง ส่วนปริมาณของ NO_2 เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงทำให้มีปริมาณ NO ที่จะไปทำปฏิกิริยากับ O_3 ในสมการที่ 3 ลดลงรวมทั้งทำให้ปริมาณ NO_2 ที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดโอโซนตามปฏิกิริยาที่ 1 เพิ่มขึ้น อีกทั้ง$OH^{\cdot}$ ที่เกิดขึ้นจะทำการออกซิไดซ์ VOCs ตัวอื่นๆ ตามปฏิกิริยาที่ 4 ต่อไป ปฏิกิริยาที่ 4-7 แสดงให้เห็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริมาณโอโซนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้ค่าของโอโซนเพิ่มขึ้นนี้มาจากปฏิกิริยาในการเปลี่ยน NO กลับไปเป็น NO_2 โดยไม่มีการใช้ O_3 ในการทำปฏิกิริยา โดยที่ปฏิกิริยาของ O_3 ที่เปลี่ยนไปนี้มีผลมาจากเปอร์ออกซีเรดิคอล (Peroxy Radicals) ($RO_2^{\cdot}$) ที่มาจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (HCs) หรือ VOCs จึงทำให้การทำลายโอโซนลดลงและทำให้เกิดโอโซนสะสมมากขึ้น สรุปถึงปฏิกิริยาของ NO ที่ส่งผลต่อระดับของก๊าซโอโซนได้ดังนี้

$NO_2 + h\nu \longrightarrow O^{\cdot} + NO$ (8)

$O^{\cdot} + O_2 + M \longrightarrow O_3 + M$ (9)

$CO + HO^{\cdot} \longrightarrow H + CO_2$ (10)

$H + O_2 \longrightarrow HOO^{\cdot}$ (11)

$HOO^{\cdot} + NO \longrightarrow NO_2 + HO^{\cdot}$ (12)

จากปฏิกิริยาลูกโซ่ดังสมการที่ 8 ถึง 12 เมื่อนำปฏิกิริยาทั้งหมดมาพิจารณารวมกันจะพบว่าเป็นปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเพิ่มของโอโซนและมีกระบวนการของปฏิกิริยาคล้ายกับ $RO_2^{\cdot}$ ที่เกิดในกรณีของ NO_x และ VOCs โดยมีปฏิกิริยารวมดังสมการที่ 13

$$CO + 2O_2 + h\nu \longrightarrow CO_2 + O_3 \qquad (13)$$

คุณสมบัติทางเคมีของโอโซนบริสุทธิ์จะมีสีน้ำเงินแก่ กลิ่นคล้ายคลอรีนจางๆ ละลายน้ำได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน มีจุดเดือดที่ -111.9°C และจุดหลอมเหลวที่ –192.7°C เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นก๊าซบริสุทธิ์จะมีเสถียรภาพดีพอสมควร แต่ถ้ามีสารอินทรีย์ปนอยู่โอโซนจะสลายตัวเป็นออกซิเจนได้ง่าย เมื่ออุณหภูมิถึง 300°C จะสามารถสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว

ผลกระทบของโอโซน

ค่ามาตรฐานความเข้มข้นของการสัมผัสโอโซนของมนุษย์และพืชที่กำหนดโดย WHO (1987) กำหนดให้มนุษย์ไม่ควรสัมผัสโอโซนที่ความเข้มข้น 76-100 ppb ติดต่อกันนานเกิน 1 ชั่วโมง ส่วนในพืชไม่ควรให้สัมผัสโอโซน 100 ppb เกิน 1 ชั่วโมง แต่จากสถานการณ์ปัจจุบันพบการเพิ่มขึ้นของโอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์เกินสภาวะปกติและสูงกว่าค่ามาตรฐานในหลายพื้นที่ทั่วโลก จากรายงานสถานการณ์โอโซนของ Mccurdy (1994) ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกาและแคนาดา ในช่วงปี ค.ศ.1985–1987 พบว่าระดับโอโซนเกินระดับ 120 ppb ในหลายพื้นที่ของประเทศ และจากรายงานของ Muhammad (1996) พบว่า ในกรุงลอนดอนประเทศอังกฤษช่วงปี 1988 ระดับโอโซนสูงสุดถึง 72 ppb และกรุงไคโรประเทศอียิปต์ในปี ค.ศ.1989 มีระดับโอโซนสูงสุดถึง 500 ppb ส่วนในเอเชียพบระดับโอโซนที่เพิ่มมากขึ้นและมีระดับความเข้มข้นเฉลี่ยสูงในหลายพื้นที่ตามเมืองใหญ่ๆ เช่น โตเกียวในประเทศญี่ปุ่นช่วงปี ค.ศ. 1968-1970 ระดับความเข้มข้นของโอโซนเฉลี่ยอยู่ที่ 35-45 ppb (Muhammad, 1996) ในประเทศอินโดนีเซียช่วงเดือนพฤศจิกายน 1992 - มิถุนายน 1994 ที่เมือง Bandung และเมือง Watukosek ระดับโอโซนสูงสุดมีค่า 60-70 ppb ในปัจจุบันแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์ผลจากโลกร้อนมีการรวมผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากโอโซนไว้ด้วย จากการคาดการณ์พบว่าโอโซนจะสูงเกิน 40 ppb ในทุกพื้นที่ของโลกภายใน พ.ศ.2643 และในพื้นที่ยุโรปตะวันตก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของอเมริกา บราซิลและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะมีความเข้มข้นของโอโซนเกิน 70 ppb และจากการจำลองโดยเพิ่มจำนวนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโอโซนให้เพิ่มขึ้นดังที่คาดการณ์แนวโน้มในอนาคต พบว่าจะเกิดผลเสียหายต่อพืชและลดการดูดซึมคาร์บอนลงเหลือ 170 พันล้านเมตริกตันต่อปี (Perkins, 2007) เมื่อทำการเปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของระดับโอโซน

ประจำปีโดยเฉลี่ยในปี 2020 (2020-2030) เมื่อเทียบกับปี 1990 (1990-2000) พบว่าในซีกโลกเหนือมีโอโซนเพิ่มขึ้น 5 ppb และ 15 ppb ในทวีปเอเชีย (Dentener, et al., 2005) ในประเทศไทยมีการศึกษาระดับปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในหลายพื้นที่ของประเทศไทย พบว่าระดับค่าเฉลี่ยในพื้นที่ทั่วไปยังไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดในประเทศไทย (ไม่เกิน 0.1 ppm (0.20 mg/m^3) ในเวลา 1 ชั่วโมง และไม่เกิน 0.04 ppm (0.10 mg/m^3) ในเวลา 1 ปี) แต่พบว่าในระหว่าง พ.ศ.2546-2547 ค่าปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในพื้นที่เขตอุตสาหกรรม เช่น ชลบุรี ระยอง และสมุทรปราการ สูงเกินค่ามาตรฐาน โดยอยู่ในระดับเฉลี่ย 1 ชั่วโมงตรวจวัดได้ 0-134.8 ppb และใน พ.ศ. 2547 เฉลี่ย 1 ชั่วโมงตรวจวัดได้ 0-173 ppb และในจังหวัดพิษณุโลกพบว่าความเข้มข้นของโอโซนใน พ.ศ.2539-2554 มีค่าเฉลี่ย 29.84 ppb (สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง, 2554)

โอโซนก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพมนุษย์ ความเป็นพิษในระดับเรื้อรัง จะส่งผลให้มีการเร่งปฏิกิริยาของเม็ดโลหิตแดงที่มีต่อการรับรังสีเอกซเรย์ และทำลายโครโมโซม เมื่อเม็ดโลหิตขาวในทอนซิลรับโอโซน จะลดการผลิตอินเทอร์เฟอร์รอน โดยเฉพาะเมื่อมีการเสริมฤทธิ์กันกับ NO_2 (วงค์พันธ์ ลิมปเสนีย์ และคณะ, 2543) จากการศึกษาพบว่าถ้าร่างกายได้รับโอโซนเกินระดับมาตรฐานทำให้เกิดอาการดังข้อมูลในตารางที่ 1

การเพิ่มระดับความเข้มข้นของโอโซนในชั้นโทรโปสเฟียร์นอกจากจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ ยังส่งผลกระทบต่อพืชพรรณต่างๆ รวมทั้งพืชเศรษฐกิจทางการเกษตรทั่วโลก (Ashmore, 2005) จากรายงานของนักวิทยาศาสตร์พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณโอโซนใกล้พื้นผิวโลกส่งผลกระทบต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืช และยังลดความสามารถในการรักษาสมดุลของปริมาณก๊าซเรือนกระจก โดยการเพิ่มขึ้นของปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศที่ระดับสูงกว่าปกติจะลดความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชถึงหนึ่งในสาม เมื่อเทียบกับสภาพปกติ ผลกระทบของโอโซนที่มีต่อพืชนั้นสามารถเกิดขึ้นได้แม้ในระดับความเข้มข้นไม่เกินค่ามาตรฐานของ WHO เช่น สามารถก่อให้เกิดความเสียหายทางใบที่เห็นได้ชัดเจนในใบยาสูบ และต้นสน ที่ระดับความเข้มข้นของโอโซน 50 ppb นาน 3 ชั่วโมงต่อวัน และ 70 ppb นาน 4 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ

ตาราง 1 ผลกระทบของโอโซนต่อมนุษย์เมื่อได้รับเกินระดับมาตรฐาน

ระดับความเข้มข้น	ระยะเวลา	อาการ
ระดับเกิน 0.15 ppm	-	ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ
ระดับเกิน 0.25 ppm	-	มีอาการปวดหน้าอก
ระดับเกิน 0.30 ppm	-	มีอาการเจ็บคอและไอ และลดศักยภาพการทำงานของปอดในผู้ที่ออกกำลังกายอย่างต่อเนื่องมากกว่า 1 ชั่วโมง
ระดับ 0.20 mg/m^3	1 ชั่วโมง	ระคายตา
ระดับ 0.20 mg/m^3	2 ชั่วโมง	ระบบหายใจผิดปกติสำหรับผู้ป่วย
ระดับ 100-460 mg/m^3	24 ชั่วโมง เป็นเวลา 21 วัน	เป็นโรคปอดเรื้อรัง
ระดับเกิน 500 mg/m^3	-	มีอาการหอบหืดบ่อยขึ้นในหมู่ผู้ป่วยด้วยโรคหืด

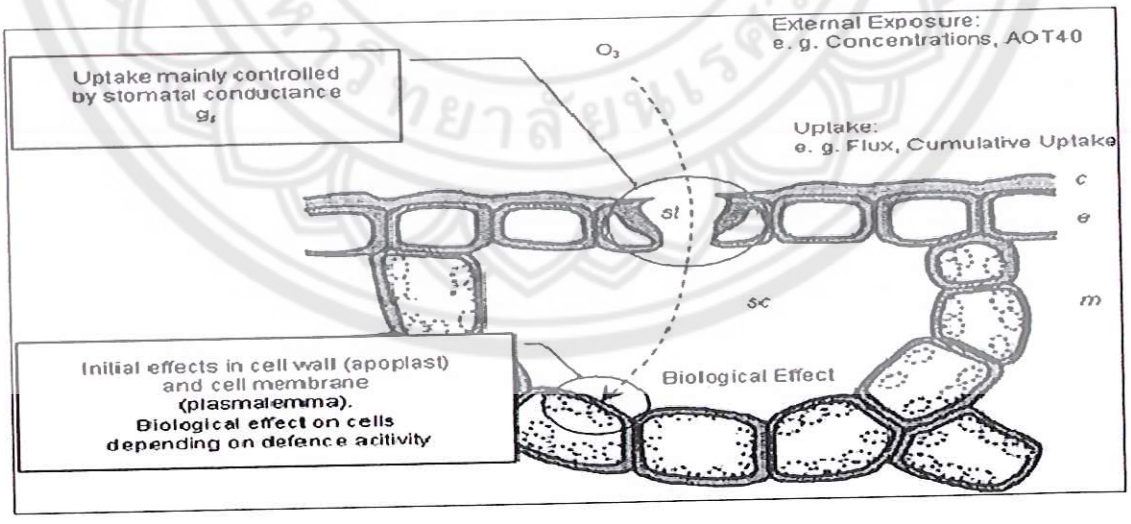
ที่มา: Jacobson, 2002; วงค์พันธ์ ลิมปเสนีย์ และคณะ, 2543

ผลกระทบของโอโซนต่อพืช

การตอบสนองของพืชต่อโอโซนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม เช่น เมื่อปากใบปิดเพื่อรักษาความชุ่มชื้นในใบจะทำให้พืชได้รับผลกระทบน้อยลง นอกจากนั้นสภาวะการเจริญเติบโตของพืช อาหาร แสง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิและองค์ประกอบอื่นๆ ยังสามารถร่วมส่งผลต่ออาการที่พืชตอบสนองต่อโอโซนได้อีกด้วย มีงานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของโอโซนรวมกับปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ พบว่าโอโซนสามารถส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการตรึงไนโตรเจนของถั่ว นอกจากผลกระทบที่เกิดกับผลผลิต ปริมาณไขมัน และความเสียหายที่ผิวใบที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน จากการศึกษาปริมาณการสะสมไนโตรเจนในพืชตระกูลถั่วและปริมาณการสะสมไนโตรเจนในดิน พบว่าปริมาณการสะสมไนโตรเจนในพืชและปริมาณการสะสมไนโตรเจนในดินลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของโอโซนเพิ่มมากขึ้น และยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยโอโซนจะลดการพัฒนาระบบราก ทำลายระบบการดูดน้ำจากพื้นดิน (Grantz, 2003 อ้างอิงใน ศศินภา ชูช่วง, 2552) ส่งผลให้การตรึงไนโตรเจนลดลงและส่งผลต่อปริมาณคลอโรพลาสต์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (เฉลิมพล แซมเพชร, 2542) นอกจากนั้นยัง

พบว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไรโซเบียมในปมรากทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรจีเนสและคุณภาพของปมที่มีประสิทธิภาพลดลง (ศศินภา ชูช่วง, 2552)

ผลกระทบจากโอโซนขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ช่วงเวลาการปลูก การพัฒนาการของพืช ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมภายนอก และช่วงเวลาในการเปิดปิดปากใบของพืช (Ferdinand, et al., 2000; Paolettia and Grulke, 2005) โอโซนจะเข้าสู่พืชโดยผ่านทางปากใบ จากนั้นจะแพร่กระจายไปยังเซลล์พืชส่งผลกระทบเป็นลูกโซ่ในเซลล์พืช ซึ่งผลกระทบที่สำคัญคือ การยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชรวมทั้งมีผลกระทบต่อสรีรวิทยาของพืช ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พืชมีกลไกในการป้องกันตัวเองเรียกว่า Ozone detoxification mechanism โดยลดการเปิดของปากใบเพื่อลดผลกระทบจากการได้รับโอโซนในระดับความเข้มข้นที่สูงมากขึ้น (Darrall, 1989; Edwin, et al., 2005) โดยมีระดับความเข้มข้นของโอโซนเป็นปัจจัยควบคุมการเปิดปิดของปากใบอธิบายได้ดังภาพ 1 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Crous, et al. (2006) ที่ทำการศึกษาผลกระทบของโอโซนต่อต้น clover (*Trifoliun repens* L.cv. Regal) พบว่ามีค่า g_s (stomatal conductance คือ ความสามารถในการสร้างแรงดึงให้ลำเลียงก๊าซเข้าทางปากใบ) ลดลงถึง 30% และยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง การเคลื่อนย้ายอิเลคตรอน ทำให้เกิดความเสียหายในใบ สารหลักที่สามารถก่อให้เกิดกลไกการป้องกันตัวเองจากโอโซน คือ ascorbic acid และ glutathione α- tocopherol (vit E)



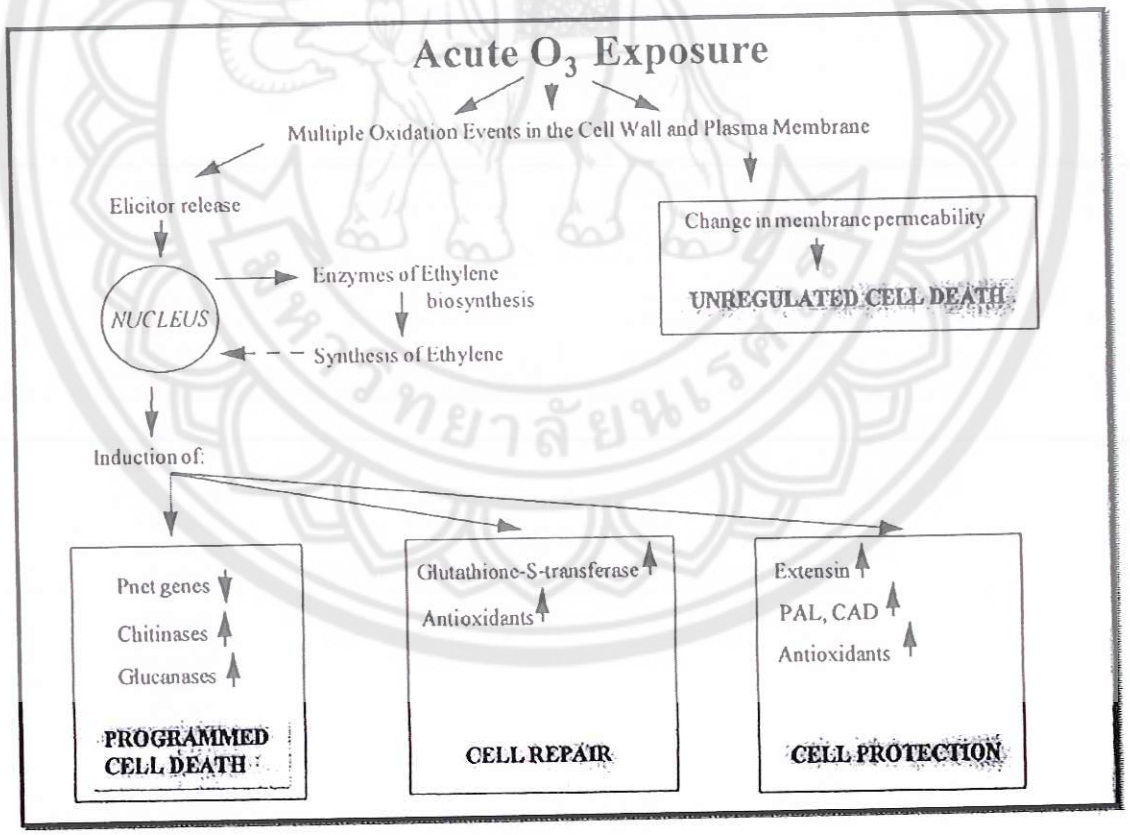
ภาพ 1 Ozone uptake and biological effect on leaves; stoma (*st*), substomatal cavity (*sc*), cuticle (*c*), epidermis (*e*), mesophyll (*m*), stomatal conductance (g_s).

ที่มา: Tausz, et al., 2007

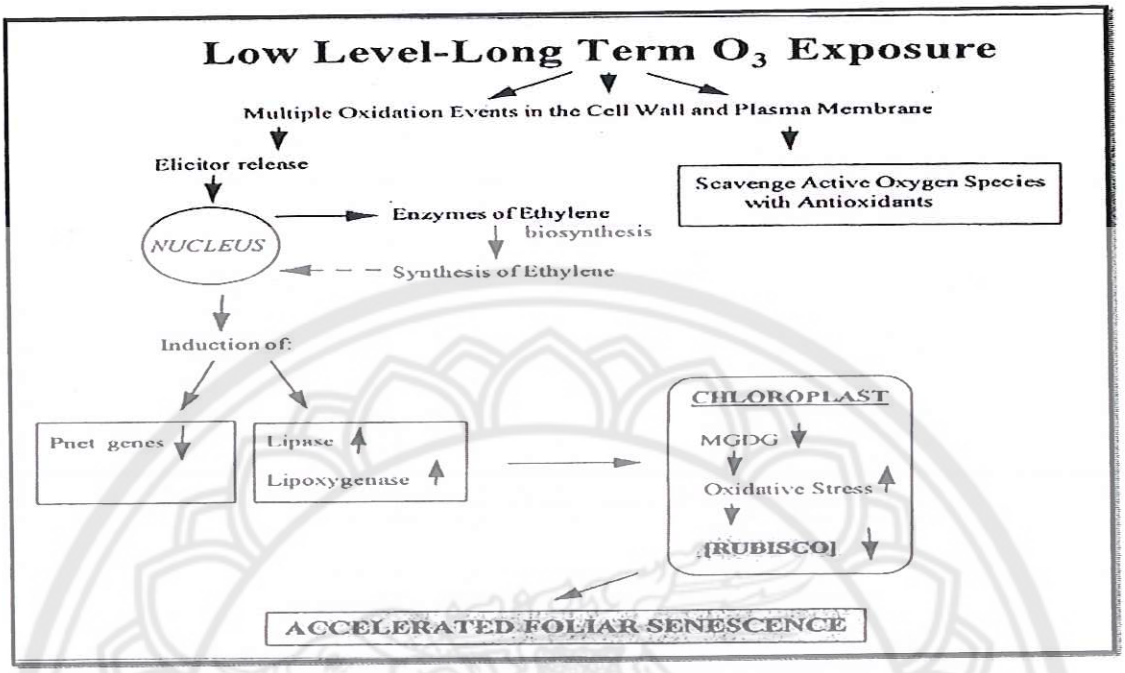
จากข้อมูลดังกล่าวจึงพบว่า ถ้าพืชไม่สามารถสร้างกลไกเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากโอโซนได้จะก่อให้เกิดความเสียหายในระดับเซลล์ในส่วนของ organelles ต่างๆ เช่น membranes, cell wall, cytoplasm และ pigment เกิดผลกระทบต่อเนื่องในการลดอัตราการสังเคราะห์แสง การเจริญเติบโต อัตราการสร้างผลผลิต และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในสายพันธุ์ จากการศึกษาพบว่าเมื่อโอโซนแพร่เข้าสู่ปากใบจะเริ่มต้นทำปฏิกิริยากับอิออนของน้ำในใบพืช นำไปสู่การผลิต ROS (reactive oxygen species) หลายชนิด ใน apoplast ของ mesophyll cell ทำให้เกิดการทำลายในระดับต่างๆและปฏิกิริยาเป็นลูกโซ่อย่างต่อเนื่อง (Cataldo and Wilson, 2000) จากการศึกษา พบว่าโอโซนส่งผลกระทบในเชิงลบต่อความหนาของชั้น mesophyll ทำให้ความหนาแน่นของ palisade cell และ spongy cell มีค่าลดลง (Gaastra, 1959; Chameides, 1989; Pleijel and Selden, 1991; Plochl, et al., 2000) และจากการศึกษาของ Craker (1971) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิต ethylene ในใบเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการทำลายเซลล์ในใบของพืชที่สัมผัสกับโอโซน สามารถอธิบายได้ด้วยกลไกทางสรีรวิทยาว่าโอโซนจะส่งผลต่อการทำลายผนังเซลล์ทำให้เกิดความเสียหายต่อคลอโรฟิลล์ส่งผลต่อเนื่องในการลดอัตราการสังเคราะห์แสงของพืช ลดการเจริญเติบโตเนื่องจากกระบวนการผลิตอาหารและพลังงานลดลง และส่งผลต่อการลดคาร์โบไฮเดรตที่ใช้ในการสร้างผลผลิต นอกจากนั้นโอโซนยังส่งผลกระทบทำให้เกิดการลดพื้นที่ใบ เกิดอาการใบแก่และร่วงก่อนกำหนด (Darrall, 1989; Pleijei, et al., 2004) ยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสง ลดปริมาณคลอโรฟิลล์ การลดลงของโปรตีนนั้นเกิดจากกลไกการต่อต้าน ROS ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา oxidation ส่งผลต่อการทำลายโปรตีนในเมล็ดถั่ว โดยเกิดกับ amino acid ในส่วนของพันธะเปปไทด์มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อลดผลกระทบของโอโซนทำให้โครงสร้างของ methionine และ tryptophan เปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นกรดอะมิโนตัวอื่น ทำให้โครงสร้างหลักของโปรตีนจำเป็นในถั่วเหลืองเปลี่ยนไป และปฏิกิริยา oxidation ทำให้เกิดการแตกหักของอนุมูลอิสระเข้าสู่ DNA เกิดความเสียหายมีการเกิด mutation ในสายของน้ำตาลและเบสใน DNA โดยมี $HO^{\cdot}$ เข้ามาแทนที่ อธิบายดังภาพ 2

ผลกระทบของโอโซนต่อกลไกทางชีวเคมีเกิดขึ้นเมื่อโอโซนเข้าสู่ใบพืช โอโซนจะทำปฏิกิริยากับกลุ่มไขมันของ palisade mesophyll จนก่อให้เกิดอาการที่มองเห็นได้ชัดเจนที่ใบพืช การเพิ่มขึ้นของอัตราการเกิด ethylene ในใบจะทำให้ใบแก่เร็วขึ้นซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของปริมาณโอโซน ทำให้เกิดสาร ROS ซึ่งไปทำให้เกิด NADPH Oxidase เพิ่มขึ้น เพิ่มการเกิดของ superoxide จึงเกิดการสะสมของสาร ROS เพิ่มมากขึ้นที่เยื่อหุ้มเซลล์ เพิ่มการเกิดของ salicylic acid ซึ่งเป็นสัญญาณให้เกิด programmed cell death เพิ่มการเกิดของ jasmonic acid

ที่ทำหน้าที่ในการยับยั้งความเสียหายทางใบ อธิบายดังภาพ 3 กลไกการทำปฏิกิริยาของโอโซนในพืชเริ่มจาก O_3 แพร่เข้าทางปากใบและทำปฏิกิริยากับส่วนที่มีน้ำ เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับองค์ประกอบของ apopalstic fluid (Ascorbate, SOD (superoxide dismutase), APX (ascorbate peroxidase), polymine) ซึ่งเป็นของเหลวที่อยู่รอบๆ mesophyll จากนั้น O_3 จะสลายตัวอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนเป็นอนุพันธ์ของ ROS (O_2, HO, H_2O_2, O_2^-) เป็นกลุ่มสารที่ทำลายส่วนประกอบของโปรตีนและไขมันใน plasma membrane พืชจึงมีกลไกทำลายโมเลกุลที่เป็นต้นเหตุของการเกิดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น โดยผลิตสารกลุ่ม SOD, CAT (catalase) และ APX เพื่อมาทำลาย ROS พบว่ากลไกในการป้องกันตัวเองของพืชเกิดขึ้นได้เองเรียกว่า Ozone detoxification mechanism (Runeckles and Chevone, 1992) สารหลักที่ใช้คือ ascorbic acid (Vit C), glutathione α-tocopherol (vit E) ซึ่งระดับปฏิกิริยาการต่อต้านขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของพืชแต่ละชนิด (Tascon and Rodriguez, 2004) อธิบายดังภาพ 4

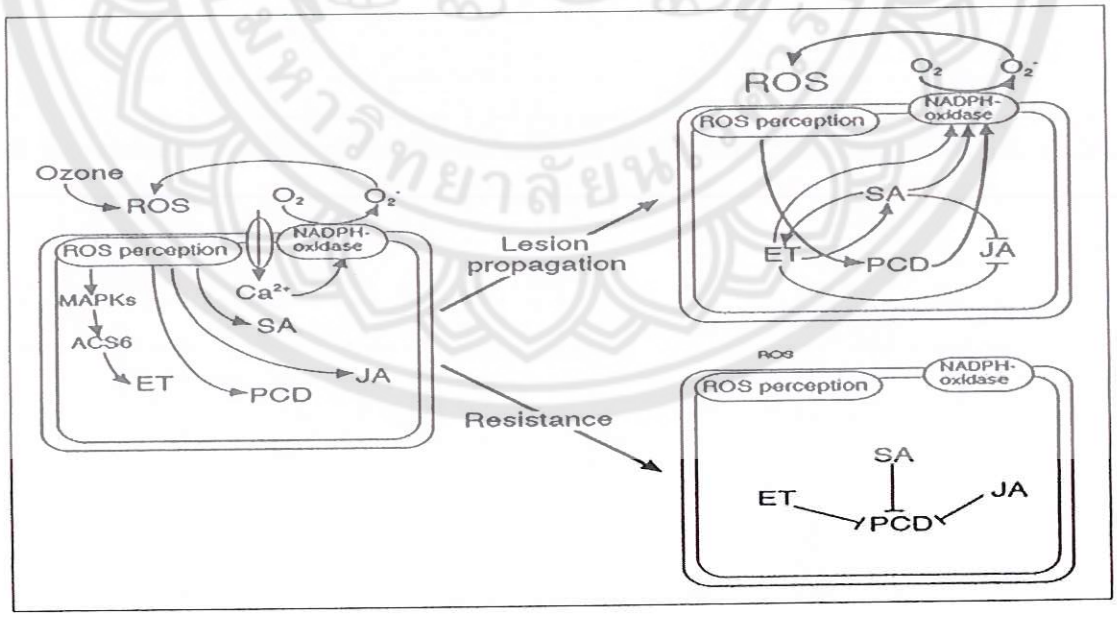


ภาพ 2 Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction



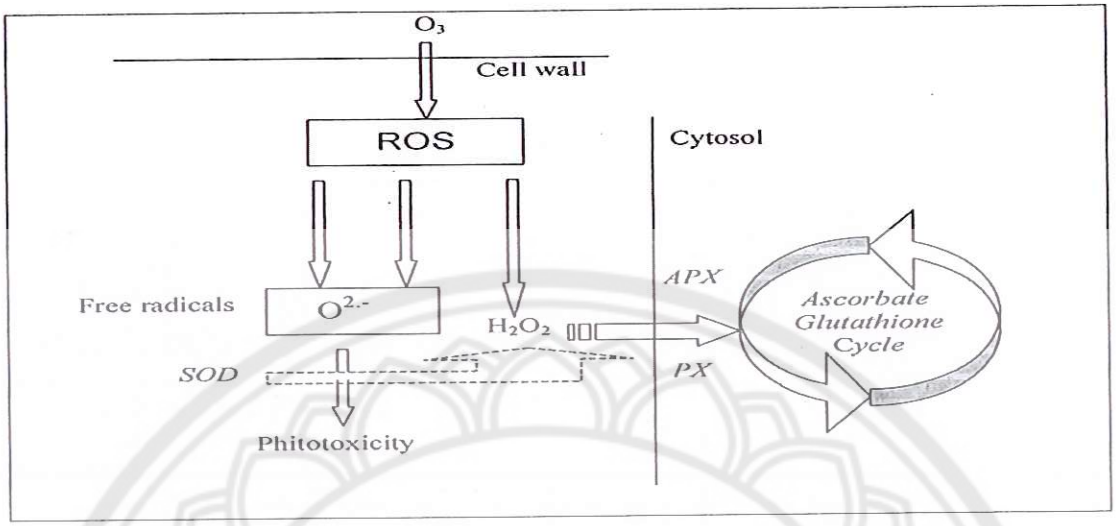
ภาพ 2 (ต่อ)

ที่มา: Pell, et al., 1997



ภาพ 3 Interactions among phytohormones in ozone exposed plants

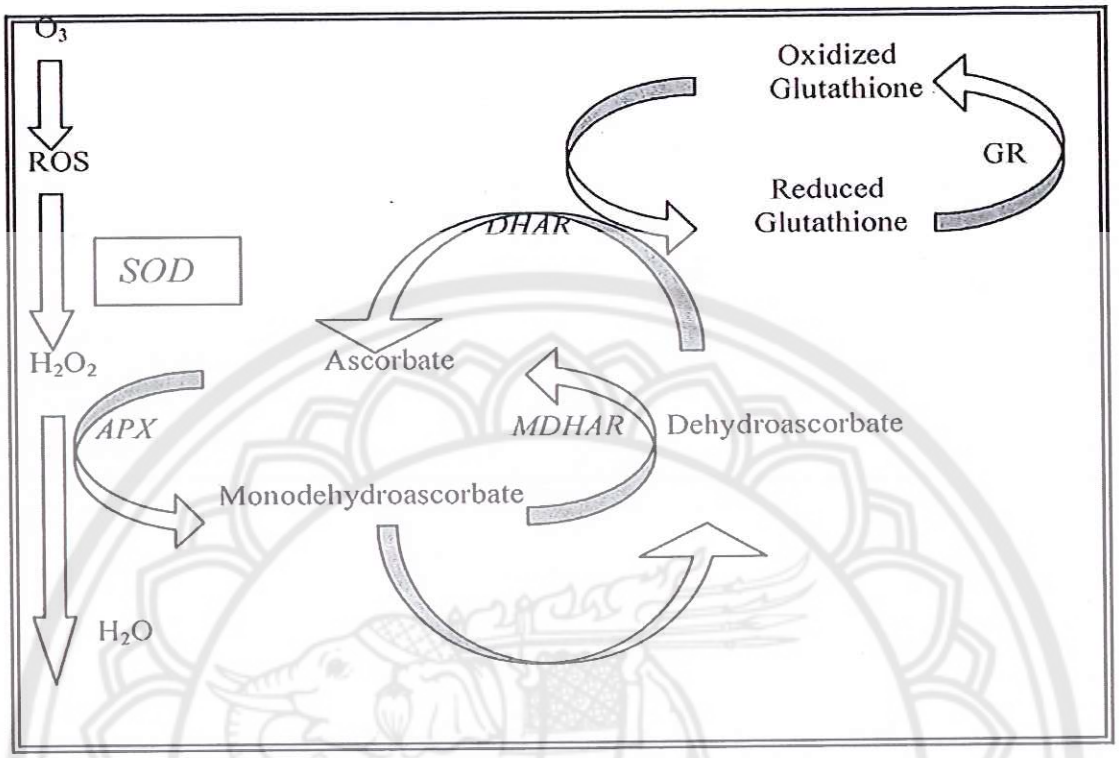
ที่มา: Tamaoki, 2008



ภาพ 4 Mechanisms of ozone damage

ที่มา: Tascon and Rodriguez, 2004

ปฏิกิริยาเริ่มต้นในการกำจัด ROS เริ่มจาก SOD ที่ทำหน้าที่กำจัด O_2^- โดยเปลี่ยน O_2^- ให้เป็น H_2O_2 (hydrogen peroxide) และ O_2 เพื่อป้องกันไม่ให้ O_2^- รวมตัวกับ H_2O_2 เกิดเป็น HO (Hydroxyl radical) ที่มีความเป็นพิษสูงพร้อมที่จะทำปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อของเซลล์ และเป็นสาเหตุให้เกิด Lipid peroxidation ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการทำลายไขมันที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำลาย DNA ทำให้เอนไซม์บางชนิดไม่สามารถทำงานได้ (Chaen and Pan, 1996 อ้างอิงใน สุขลัคน์ นาเนกรังสรรค์, 2548) หลังจากนั้น enzymatic antioxidants ชนิด CAT หรือ APX จะกำจัด H_2O_2 โดย CAT เปลี่ยน H_2O_2 ให้เป็นน้ำและออกซิเจน ส่วน APX เปลี่ยน H_2O_2 ให้เป็นน้ำและ DHA (dehydroascorbate) APX ใช้ AA (arachidonic acid) เป็นตัวรับอิเลคตรอนในการรีดิวซ์ H_2O_2 ให้เป็นน้ำและ DHA (dehydroascorbate)ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระที่ไม่เสถียรจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น 2 ปฏิกิริยา คือ MDHA จะรีดิวซ์กลับไปเป็น AA โดย enzymatic antioxidant ชนิด MDHAR เปลี่ยนเป็น DHA (dehydroascorbate) และ AA อย่างรวดเร็ว ต่อมา enzymatic antioxidant ชนิด DHAR (dehydroascorbate reductase) เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยน DHA เป็น AA (Olga, et al., 2003; Tascon and Rodriguez, 2004; Xiuli, et al., 2005) อธิบายดังภาพ 5



ภาพ 5 The ascorbate-glutathione (Halliwell-Asada) cycle

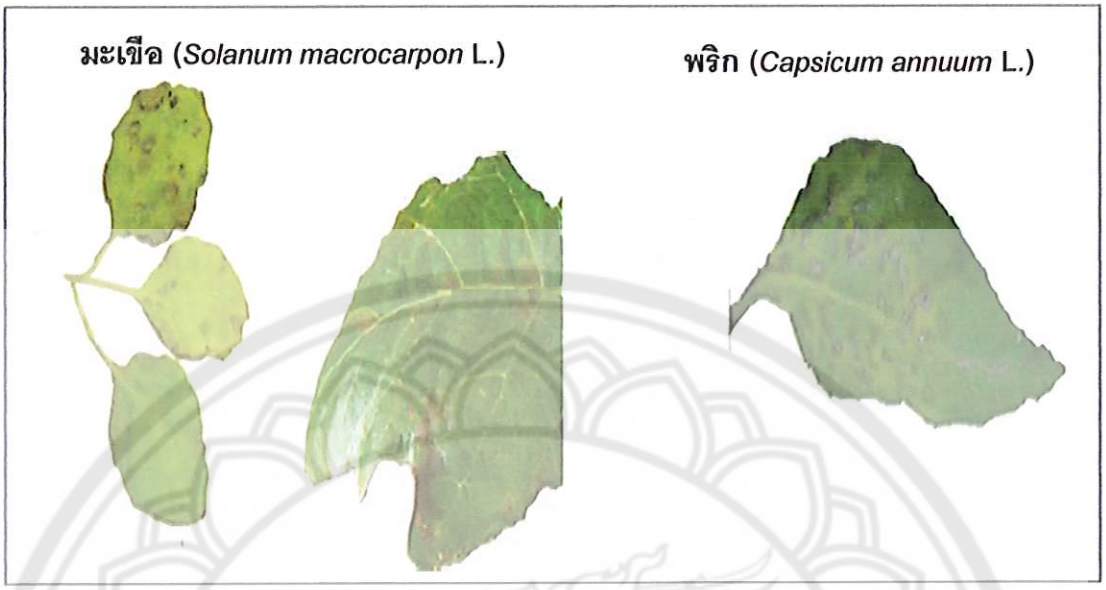
ที่มา: Tascon and Rodriguez, 2004

ผลกระทบของโอโซนต่อสัณฐานวิทยาและกายวิภาคของพืชที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน พบว่าเป็นความเสียหายที่ผิวใบ อาการของพืชที่ได้รับความเสียหายอาจมีอาการเดียวหรือมากกว่าก็ได้ ใบของพืชเมื่อได้รับโอโซนจะมีอาการแก่เร็ว เห็นเป็นรอยด่างสีบรอนซ์ในพืชตระกูลถั่ว มีสีบรอนซ์ปนแดงในใบถั่วเหลือง รอยจุดสีขาวในใบแตงกวา จุดแดงและดำในผลและใบขององุ่น (Richards, et al., 1959) หรือรอยสีเทา- ขาวในใบผักขม ความเสียหายที่ผิวใบพืชจากการสัมผัสโอโซนสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ(Bioindicator) เพื่อระบุและประเมินผลกระทบ จากมลพิษทางอากาศได้อีกทางหนึ่ง (Coulston, et al., 2002; Burkey, et al., 2005; Heinz, 2007; Nydick, 2010) ความเสียหายที่ผิวใบที่สามารถมองเห็นได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ เฉียบพลัน (acute) และเรื้อรัง (chronic) แบ่งเป็น 4 อาการดังนี้ Necrosis เป็นอาการที่เซลล์ยุบตัวและเกิดลายเหี่ยวแห้ง เกิดขึ้นเฉียบพลัน เซลล์ ในส่วนของ palisade และ spongy ของพืชจะเฉาและเหี่ยวจนเซลล์ตาย ใบมีสีตั้งแต่ใกล้ขาวจนถึงแดงอมส้ม มักเกิดลายเหี่ยวแห้งที่ขอบหรือยอดของใบ Chlorosis

เป็นอาการเรื้อรัง เซลล์ของพืชยังมีชีวิตแต่ส่วนของคลอโรฟิลล์ถูกทำลายทำให้มีปริมาณน้อยลง เกิดเป็นลายซีดสีต่างๆ ทำให้เกิดสีเขียวจางหรือเหลืองอ่อน จัดเป็นความผิดปกติของรงควัตถุทำให้เกิดลายตกกระ ใต้ใบเป็นเงาวาวสีเงินหรือบรอนซ์ มักเกิดที่ palisade cell ผิวใบด้านบนหรือทั้งสองด้านมีสีซีด ผิวใบด้านบนจะปรากฏลายตกกระ เหี่ยวแห้ง สีซีด หรือผิวใบด้านบนแค่มีสีซีดลง palisade cell ยุบตัวลงเมื่อได้รับโอโซน บางครั้งมีลายเหี่ยวแห้งเกิดขึ้นที่กลางใบ ลายจะเป็นจุดเล็กๆ บริเวณที่ซีดจะมีรูปร่างไม่ชัดเจน pigmented lesions ลายสีทำให้ผนังเซลล์หนา มีสีเป็นหย่อมๆ ดูเหมือนเป็นจุดเล็กๆ คล้ายตกกระชัดเจน palisade cell จะไวต่อโอโซนและได้รับผลกระทบก่อน ลายจะจำกัดอยู่เฉพาะผิวด้านบน อาจเป็นสีน้ำตาลเข้ม ดำ ม่วง หรือแดง พบว่าเมื่อพืชได้รับโอโซนจะมีการสังเคราะห์เม็ดสีแอนโธไซยานินในช่องว่างระหว่างแขนงย่อยภายในใบ (Knudson, et al., 1977; Avnery, et al., 2000; Abeyratne and Ileperuma, 2006; วงค์พันธ์ ลิมปเสนีย์ และคณะ, 2543; ศศินภา ชูช่วง, 2552) ความเสียหายที่ผิวใบพืชจากการสัมผัสก๊าซโอโซนที่สามารถสังเกตได้แสดงดังภาพ 6-8

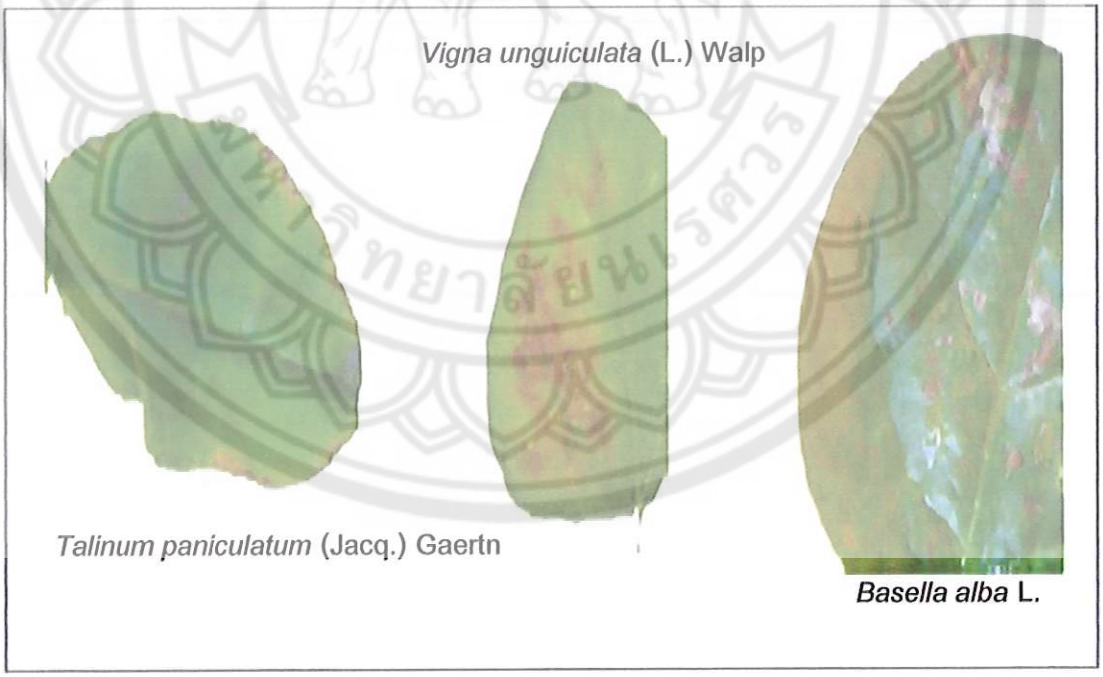
ภาพ 6 Yellowing on leaves after expose to ozone

ที่มา: Abeyratne and Ileperuma, 2006



ภาพ 7 Browning on leaves after expose to ozone

ที่มา: Abeyratne and Ileperuma, 2006



ภาพ 8 Reddening in leaves after exposure to ozone

ที่มา: Abeyratne and Ileperuma, 2006

การศึกษาเพื่อตรวจสอบสภาวะของโอโซนในระดับต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อพืชทั้งทางด้านสรีรวิทยาและผลผลิตในพื้นที่การเพาะปลูกจริง มีการรายงานอย่างต่อเนื่อง เช่น การศึกษาของ Heagle, et al. (1973) ได้พัฒนาการทดลองผลกระทบของโอโซนต่อพืชโดยสร้างห้องทดลองรูปทรงกระบอกระบบเปิดด้านบน (open top chamber) โดยพ่นอากาศผ่านชั้นกรองก๊าซที่เป็นมลพิษโดยใช้ถ่านคาร์บอน (charcoal filtered) สามารถกรองโอโซนได้ประมาณ 60-70% และชั้นกรองฝุ่นผ่านอากาศจากด้านล่างสู่ด้านบนซึ่งเป็นระบบเปิดหลังคา วิธีนี้สามารถแก้ปัญหาการเพิ่มอุณหภูมิภายในห้องทดลองได้และแพร่หลายในการใช้ทดลองของหลายๆ องค์กร

พืชเศรษฐกิจสำคัญทางการเกษตรที่ได้รับผลกระทบจากโอโซน เช่น ข้าว ถั่วเหลือง หอมใหญ่ มันฝรั่ง ผักขม ใบยาสูบ ฟักทอง มีลักษณะอาการที่ปรากฏเริ่มตั้งแต่เป็นรอยด่างหรือรอยจุด เช่น น้ำตาล เหลือง ขาว บรอนซ์ รวมทั้งมีอาการใบยุบ ใบเหี่ยว พับงอ ช่วงอายุของพืชที่เกิดอาการเริ่มตั้งแต่พืชเป็นต้นอ่อนจนถึงระยะเก็บเกี่ยว (Reilly, et al., 2007; Eastburn, et al., 2010) ในประเทศแถบเอเชียมีงานวิจัยที่ประเมินผลกระทบของโอโซนต่อพืชเศรษฐกิจทางการเกษตรหลายชนิดเช่น ในญี่ปุ่นได้ศึกษาผลกระทบของโอโซนต่อประสิทธิภาพการใช้แสงในใบข้าวพันธุ์ Koshi-hikari และ Nippom-bare ในช่วงปี ค.ศ.1987-1989 โดยควบคุมโอโซน 6 ระดับในห้องทดลองกลางแจ้ง และวัดการดูดกลืนแสงบริเวณเหนือใบและใต้ใบ พบว่าประสิทธิภาพการใช้แสงในใบข้าวลดลงในช่วงหลังการปักดำเป็นผลกระทบจากการได้รับโอโซน (Kobayashi and Okada, 1995) ในปากีสถานมีการศึกษาผลกระทบต่อข้าวพันธุ์ Basmati-385 และ IRRI-6 โดย Wahid, et al. (1995) โดยใช้ห้องควบคุมระบบเปิดด้านบนในพื้นที่เพาะปลูก เปรียบเทียบชุดทดลองระหว่างชุดที่กรองโอโซนโดยใช้ถ่านกัมมันต์ ชุดที่ไม่มีถ่านกัมมันต์ และชุดทดลองที่อยู่นอกห้องทดลอง พบว่าในชุดทดลองที่ไม่มีถ่านกัมมันต์กรองโอโซนนั้นจำนวนการแตกหน่อลดลง 32% ในข้าวพันธุ์ Basmati-385 และ 27% ในข้าวพันธุ์ IRRI-6 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ได้รับการกรองโอโซน น้ำหนักแห้งของเมล็ดลดลง 47 % และ 37% ในข้าวพันธุ์ Basmati-385 และ IRRI-6 ตามลำดับ

ในประเทศไทยได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของโอโซนต่อพืชต่างๆ โดย Ariyaphanphitak, et al. (2004) ได้ศึกษาผลกระทบของโอโซนต่อข้าว 8 พันธุ์ ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 และ สจ.4 ในห้องทดลองระบบปิดโดยควบคุมการระบายอากาศด้วยพัดลมดูดอากาศ พบว่าการควบคุมโอโซนโดย Program Delphi ที่ระดับ 50 ppb 100 ppb และ 150 ppb มีอัตราผลผลิตลดลงอย่างชัดเจนและเปอร์เซนต์การลดลงจะเพิ่มขึ้นตามระดับโอโซน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Ariyaphanphitak (2005) พบว่าโอโซนในระดับสูง ตั้งแต่ 50-150 ppb ส่งผลเชิงลบอย่างมี

นัยสำคัญต่อการเจริญเติบโต อัตราการสังเคราะห์แสง และผลผลิตของถั่วเหลือง 2 สายพันธุ์ และข้าวหอมมะลิไทย 4 สายพันธุ์

จากการศึกษาในกลุ่มพืชทางการเกษตรพบว่าถั่วเหลืองเป็นพืชประเภทหนึ่งที่มีความไวต่อการรับผลกระทบจากโอโซน (Miller, et al., 1994) โดยทั่วไปผลผลิตของถั่วเหลืองจะลดลงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นของโอโซน 50 ppb (Heagle, et al., 1986) และมีการคาดการณ์โดยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายว่าในปี ค.ศ.1990 ประเทศจีน ญี่ปุ่น และเกาหลี สูญเสียปริมาณผลผลิตของถั่วเหลืองไปถึง 23-27% ภายใต้ผลกระทบของโอโซน (Wang and Mauzeral, 2004) การศึกษาของ Morgan, et al. (2006) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของโอโซนเฉลี่ยในเวลากลางวัน 13 ppb ทำให้ผลผลิตและเมล็ดถั่วเหลืองลดลง 20% และจากการศึกษาของกณิตา ธนเจริญชนภาส (2551) ได้ศึกษาผลกระทบของโอโซนที่มีต่อถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 พบว่าผลกระทบของโอโซนที่ระดับสูงกว่าธรรมชาติส่งผลทำให้ผลผลิตลดลง ความชื้น เถ้า เยื่อใยลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าปริมาณโปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองลดลง 27-28% เมื่อเทียบกับชุดควบคุมแต่ส่งผลให้ไขมันรวมเพิ่มขึ้น 15% การศึกษาผลกระทบของโอโซนที่เพิ่มขึ้นต่อการตอบสนองของใบ ผลผลิต เมล็ดและปริมาณโปรตีนของถั่วเหลือง พบว่าโอโซนในระดับสูงมีผลกระทบเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ น้ำหนัก 100 เมล็ด และปริมาณโปรตีน โดยพบว่าน้ำหนักเมล็ดลดลงถึง 13% ในชุดการทดลองที่โอโซนเพิ่มขึ้นจากระดับธรรมชาติ และภายใต้การสัมผัสโอโซนระดับสูงพบว่าปริมาณโปรตีนลดลงอย่างชัดเจนถึง 94.7 % ผลการวิจัยสรุปได้ว่าการสัมผัสโอโซนในระดับที่เพิ่มสูงกว่าธรรมชาติอย่างต่อเนื่องส่งผลต่อการลดลงของพารามิเตอร์ด้านรงควัตถุ น้ำหนัก 100 เมล็ด และโปรตีนในถั่วเหลืองพันธุ์ศรีสำโรง 1 (Boontapanya, et al., 2552)

ถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง (*Glycine max* (L.) Merrill) เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลกและของประเทศไทย ทั่วโลกมีความต้องการใช้ถั่วเหลืองอย่างมากเพราะในเมล็ดถั่วเหลืองมีคุณค่าทางโภชนาการ มีสารอาหารหลายประเภทที่มีประโยชน์ เมล็ดถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน 30-50% น้ำมัน 13-24% คาร์โบไฮเดรท 12-24% ของน้ำหนักเมล็ดแห้ง น้ำมันถั่วเหลืองมีกรดไขมันอิ่มตัวเพียง 12-14% แต่กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงถึง 86-88% ประกอบด้วยกรด oleic 30-35% กรด linoleic 45-55% กรด linolenic 5-10% ในด้านองค์ประกอบของกรดอะมิโน มีกรดอะมิโนโดยเฉพาะ lysine และ tryptophan สูงกว่าธัญพืชอื่น นอกจากนี้ในถั่วเหลืองยังมีสารสกัดจากเมล็ดชื่อ

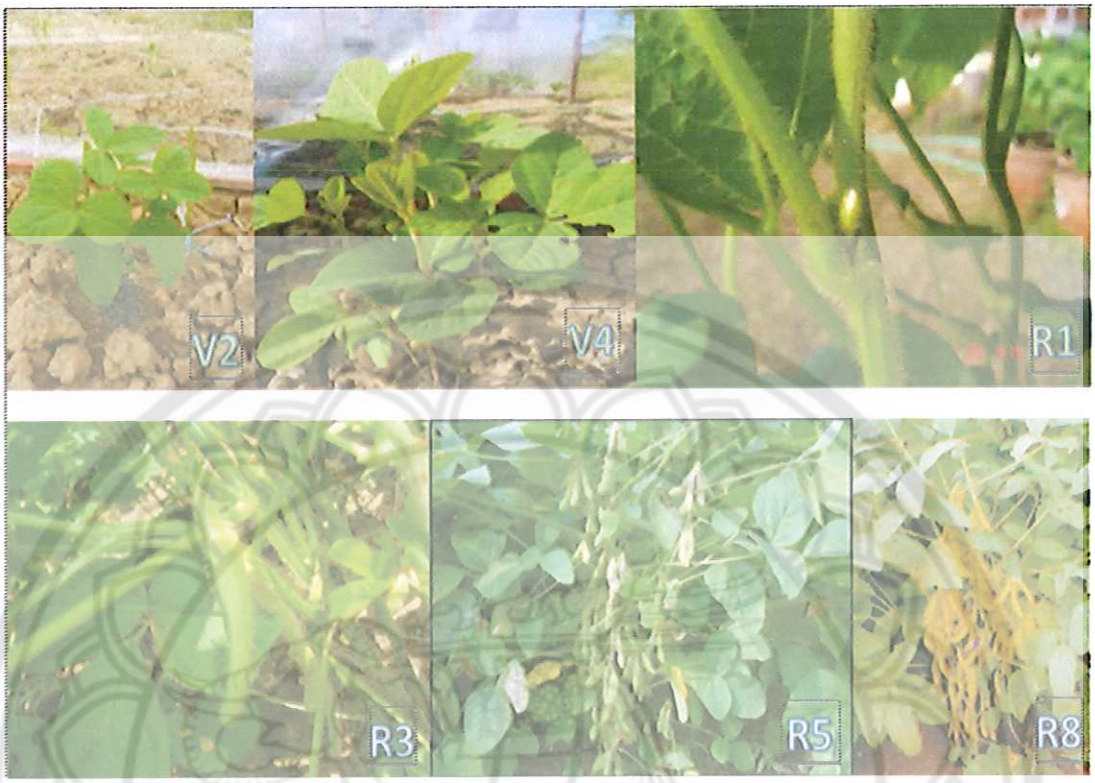
isoflavones เป็นสารช่วยเพิ่มมวลกระดูก ลดความเสี่ยงจากโรคกระดูกพรุน (Osteoporosis) ลดอาการจากสาเหตุการหมดประจำเดือนหรืออาการวัยทอง (Menopausal Symptoms) ลดความเสี่ยงจากการเกิดมะเร็งเต้านม (Breast cancer) มะเร็งต่อมลูกหมาก (Prostate cancer) โรคหลอดเลือดหัวใจตีบ (Coronary Heart Disease) หรือใช้ในอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันและอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่นๆ ส่วนกากถั่วเหลืองยังใช้เป็นแหล่งโปรตีนสำหรับอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ปัจจุบันมีการปลูกถั่วเหลืองกระจายอยู่ทั่วโลก ในปี 2553 มีผลผลิตเฉลี่ย 242.07 ล้านตัน ประเทศที่มีพื้นที่ผลิตและผลผลิตถั่วเหลืองมากที่สุด คือ สหรัฐอเมริกา บราซิล และอาร์เจนตินา ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตถั่วเหลืองได้เป็นอันดับที่ 23 ของโลก โดยประเทศไทยมีผลผลิตเฉลี่ย 251 กิโลกรัมต่อไร่ ผลผลิต 190,480 ตัน และมีพื้นที่เพาะปลูก 758.041 ไร่ (ข้อมูลพื้นฐานการเกษตร, 2552) พื้นที่ปลูกถั่วเหลืองส่วนใหญ่จะอยู่ทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือโดยจังหวัดที่ปลูกมาก คือ เชียงใหม่ แพร่ เลย แม่ฮ่องสอน และสุโขทัย

ถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 คือ ถั่วเหลืองที่ได้จากการผสมระหว่างพันธุ์ William ที่มีลำต้นแข็งแรง จำนวนฝักต่อต้นมาก และพันธุ์นครสวรรค์ 1/DM 8032-1-9 จนได้พันธุ์ที่สามารถต้านทานโรคราน้ำค้างและให้ผลผลิตสูง เป็นพันธุ์ที่คณะกรรมการการวิจัยและปรับปรุงพันธุ์แนะนำให้ปลูกในเขตภาคเหนือตอนล่าง มีดอกสีขาว ผลผลิต 300 กิโลกรัมต่อไร่ น้ำหนัก 100 เมล็ด 15-17 กรัม มีน้ำมัน 20% โปรตีน 44% ระยะการพัฒนาของถั่วเหลืองสามารถแยกออกเป็นระยะต่าง ๆ ดังนี้คือ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative stage) แทนด้วย V และระยะการเจริญเติบโตทางผลผลิต (Reproductive stage) แทนด้วย R การนับระยะ V ให้ถือตามจำนวนข้อในต้นหลัก (main stem) และระยะ R เริ่มจาก R1 อธิบายดังตาราง 2 และภาพ 9

ตาราง 2 ระยะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

ระยะ	ลักษณะการเจริญเติบโต
V2	ลำต้นมี 2 ข้อ (เหนือข้อใบจริงคู่แรก) และใบประกอบ (compound leaves) คู่แรกคลี่เต็ม
V4	ลำต้นมี 8 ข้อ ใบประกอบ 4 คู่
R1	ระยะดอกเริ่มบาน 50% ของต้นทั้งหมด มีดอกบานอย่างน้อย 1 ดอก
R3	มีฝักในข้อใดข้อหนึ่งของ 4 ข้อจากปลายยอดของต้น
R5	เมล็ดเริ่มพัฒนาในฝักบนข้อที่หนึ่งในสี่ข้อจากบนยอด
R8	ฝักใน R7 มีเมล็ดโตเต็มที่ พร้อมเก็บเกี่ยว

ที่มา: ดัดแปลงจากอภิพรรณ พุกภักดี, 2546



ภาพ 9 ลักษณะการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง

ผลกระทบของโอโซนต่อถั่วเหลือง

จากการศึกษาผลกระทบของโอโซนต่อความเสียหายที่ผิวใบพืชของ Chappelka, et al. (2003) ในพื้นที่สวนสาธารณะ Great Smoky Mountains National Park พบว่าพืชที่ปลูกอยู่ในสวนได้รับผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของโอโซนจากการเป็นย่านธุรกิจกลางเมือง อาการที่เห็นจากผิวใบคือ มีลายซีดและเกิดจุดขาว 50% จากตัวอย่างใบพืชที่นำมาศึกษาทั้งหมด การทดลองในใบยาสูบ 7 ชนิด ที่ความเข้มข้นของโอโซน 90 ppb และ 150 ppb โดยให้โอโซน 8 ชั่วโมงต่อวัน นาน 20 วัน พบว่าในยาสูบทั้ง 7 ชนิดเกิด Necrosis และ Chlorosis (Saitanis, et al., 2001) ในพื้นที่ประเทศกรีกกลางเดือนตุลาคมปี 1998 พบว่าพืชจำพวกผักกาดหอมและ Chicory ใบเกิดความเสียหาย 100% โดยเกิดอาการเป็นจุดสีแดงและอาการ Necrosis ทำให้ผลผลิตไม่สามารถขายได้ เกิดความเสียหายแก่ภาคเกษตร (Fuhrer and Achermann, 1999 อ้างอิงใน ฤทัยรัตน์ โพธิ, 2548) การทดลองในพืชตระกูลถั่วที่ความเข้มข้นของโอโซน 150 ppb เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบเกิดความเสียหายที่ใบในถั่ว 7 พันธุ์ หลังจากทดลอง 2-4 ชั่วโมง ถั่วพันธุ์ Marconi และ Cannellino เกิดลาย Chlorosis 41.9% และ 47.2% ตามลำดับ หลังจากการทดลอง 20 ชั่วโมง พันธุ์

Montalbano เกิด Necrosis เป็นสีเหลืองบริเวณขอบใบ 10.2% พันธุ์ Corallo เกิด Necrosis เป็นสีแดงที่ผิวใบ 65.5% และพันธุ์ Borlotto Lingua di Fuoco เกิดจุดสีแดง 54.3% (Keen and Taylor, 1974) ความเสียหายที่ผิวใบถั่วเหลืองเมื่อสัมผัสกับก๊าซโอโซนแสดงในภาพ 10

ภาพ 10 Ozone Injury in Soybeans (leaf)

ที่มา: Keen and Taylor, 1974

ความเสียหายของผิวใบที่สามารถมองเห็นได้ เป็นอาการเริ่มแรกที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง และกระบวนการสร้างผลผลิตในพืช ซึ่งในถั่วเหลืองศักยภาพการให้ผลผลิตของพืช ขึ้นอยู่กับขนาด คุณภาพ และความสมดุลระหว่างอวัยวะหรือส่วนของพืชสองส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง เรียกว่า Source (ในทางวิชาการพืชไร่ พื้นที่ใบเป็น Source) และส่วนของพืช ที่ทำหน้าที่รองรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสง (photoassimilate) เรียกส่วนของพืชนี้ว่า Sink (จำนวนและขนาดของเมล็ดหรือจำนวนต่างๆ ขององค์ประกอบของผลผลิต) ขนาด Source ของพืชไร่ พิจารณาจากดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index: LAI: พื้นที่ใบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ดิน) ที่ทำให้มีการรับแสงที่สองลงมาได้ทั้งหมดพอดี เรียกดัชนีพื้นที่ใบระดับนี้ว่า ดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสม (optimum LAI) ดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสมของถั่วเหลืองอยู่ระหว่าง 5.00-6.00 พันธุกรรมและสภาพแวดล้อมในระหว่างการเจริญของพืชเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดขนาดของส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง หากสภาพแวดล้อมที่พืชขึ้นอยู่เกิด

ความเครียดจะส่งผลกระทบในทางลบต่ออวัยวะทั้งสองและกระทบต่อผลผลิตในที่สุด (เฉลิมพล แซมเพชร, 2542)

พื้นที่ใบเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่รับแสงและสังเคราะห์แสง การสังเคราะห์แสงจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับตามดัชนีพื้นที่ใบที่เพิ่มขึ้นจนกระทั่งพืชมีดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสมและการเพิ่มดัชนีพื้นที่ใบให้สูงกว่านี้การสังเคราะห์แสงก็จะไม่เพิ่มขึ้นแต่อาจทำให้การสังเคราะห์แสงกลับลดลงได้ กับพืชบางชนิด พืชแต่ละชนิดมีดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสมไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสัณฐานวิทยาของทรงพุ่มของพืชหรือทรงพุ่มที่เอื้ออำนวยต่อการส่องผ่านและกระจายแสงภายในทรงพุ่มได้ดี เช่น ทรงพุ่มพืชที่ประกอบด้วยขอบใบแคบเรียวและตั้งชันจะมีดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสมสูงกว่าทรงพุ่มที่มีใบกว้างและอยู่ในแนวนอน (Yoshida, 1981) ดัชนีพื้นที่ใบควรจะคงทนมีอายุยาวและสามารถดำเนินกิจกรรมการสังเคราะห์แสงได้ดี ความคงทนของดัชนีพื้นที่ใบขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและธาตุอาหารในใบโดยเฉพาะไนโตรเจนเพราะว่าไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ Rubisco (1,5-riburose bisphosphate carboxylase-oxygenase) และการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เมื่อพิจารณาส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง ต้องพิจารณาทั้งปริมาณ (ขนาดของดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสม) คุณภาพขนาดและคุณภาพที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของหลายปัจจัยและที่สำคัญได้แก่ พันธุกรรม และสภาพแวดล้อม (โดยเฉพาะภูมิอากาศ) ส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงจะมีความไวหรืออ่อนไหวต่อการขาดธาตุอาหาร (ความอุดมสมบูรณ์ของดิน) เมื่อสภาพแวดล้อมหรือปัจจัยหนึ่งไม่เหมาะสมหรือมีความเครียด (stress) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจริญเติบโตจะส่งผลกระทบทำให้ขนาดและคุณภาพลดลง ผลจากการศึกษาในถั่วเหลืองถึงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงกับผลผลิตแสดงให้เห็นว่า ถ้าส่วนที่ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงได้รับผลกระทบในระหว่างการเจริญทางการขยายพันธุ์จะมีผลกระทบต่อผลผลิตมากกว่าเมื่อเกิดขึ้นในระยะการเจริญทางลำต้นและใบ และในระหว่างการเจริญทางแพร่พันธุ์ถ้าได้รับผลกระทบในระยะต้นของการเจริญ (R1-R5) (Ferh, et al., 1971) จะส่งผลกระทบต่อผลผลิตรุนแรงกว่าระยะปลาย (R6-R7) การที่ผลผลิตลดลงเป็นผลมาจากการมีจำนวนฝักลดลง (Board and Harville, 1998)

แม้ในปัจจุบันพื้นที่ปลูกถั่วเหลืองและผลผลิตได้ลดลงจากการใช้ประโยชน์ที่ดินในด้านต่างๆ แต่ยังถือว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสูงต่อประเทศ และขณะเดียวกันจากข้อมูลการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของโอโซนจากกรมควบคุมมลพิษในช่วงปี พ.ศ.2539-2548 พบว่าค่าเฉลี่ยในหลายๆ พื้นที่อยู่ในช่วงประมาณ 20-30 ppb และจากข้อมูลในปัจจุบันพบว่ามีค่าความเข้มข้นสูงกว่ามาตรฐานในบริเวณเมืองใหญ่ๆ ในเขตนิคมอุตสาหกรรม และในเขตพื้นที่จังหวัด

ป GC
641
.2575
ต23 ผ
2556

162165
25
5 มิ.ย. 2556
สำนักฯ

พิษณุโลกช่วงปี พ.ศ. 2549-2550 มีค่าอยู่ในช่วง 20-50 ppb (กรมควบคุมมลพิษ, 2551) ด้วยเหตุนี้การศึกษาถึงปัญหาของมลพิษจากโอโซนในสภาวะที่เกิดขึ้นได้จริงตามสภาวะโลกร้อนที่มีผลกระทบต่อคุณภาพและปริมาณผลผลิต ผลกระทบต่อเนื่องจากการได้รับโอโซนในระดับต่างๆ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาคของใบถั่วเหลืองที่ถือเป็นแหล่งให้พลังงานสำคัญต่างๆ แก่ถั่วเหลืองและรวมถึงผลผลิตที่จะเกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แสงจึงเป็นสิ่งที่สมควรศึกษาอย่างเร่งด่วน เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพและปริมาณผลผลิตของถั่วเหลืองที่ดีอีกทางหนึ่งถือเป็นส่วนหนึ่งในการประเมินสถานการณ์ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่มีต่อทรัพยากรทางด้านการเกษตร และทันต่อสภาวการณ์เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโลก ข้อมูลทั้งหมดเบื้องต้นสามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของการรองรับปัญหาสภาวะโอโซนในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นและมีผลกระทบต่อระบบนิเวศเกษตรที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในประเทศไทยต่อไป