บทที่ 5

บทสรุป

สรุปผลการวิจัย

การตอบสนองต่อระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นในบรรยากาศของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 โดยแบ่งระดับของโอโซนเป็น 3 ระดับ คือ ความเข้มข้นโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ (CF) ความเข้มข้นโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ (ชุดควบคุม, NCF) และความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+O3})ถั่วเหลืองได้รับโอโซนเป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวัน (9.00-16.00 น.) ตั้งแต่ระยะเริ่มมีใบประกอบสองใบ (V2) จนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว (R8) สรุปผลกระทบของระดับโอโซนที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต สัณฐานและกายวิภาคใบของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ได้ดังนี้

1. การควบคุมความเข้มข้นโอโซนในชุดการทดลอง CF^{+O3} เพื่อให้มีความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ ตลอดช่วงระยะเวลาในการศึกษา พบว่า โอโซนมีความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 107.30 ppb โดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าระดับธรรมชาติ ในชุดควบคุม NCF (ความเข้มข้นโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติ 37.17 ppb) ประมาณ 70.13 ppb และความเข้มข้นของโอโซนในชุดควบคุมที่ความเข้มข้นต่ำกว่าธรรมชาติในชุดทดลอง CF พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 17.14 ppb ซึ่งมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า ชุดควบคุม NCF ประมาณ 20.03 ppb

2. ผลการศึกษาบ่งชี้ว่าความเข้มข้นโอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+O3}) ส่งผลกระทบในเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (NCF) โดยลดการเจริญเติบโตที่สามารถมองเห็นได้จากลักษณะภายนอกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยพบในปัจจัยด้านความสูงของลำต้น ดัชนีพื้นที่ใบ และขนาดเฉลี่ยของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60

3. ความเข้มข้นโอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+O3}) ส่งผลกระทบในเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($P \leq 0.05$) ต่อรงควัตถุในใบอย่างเด่นชัด (พบในคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี) โดย**ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เริ่มมีการลดลงในระยะที่มีใบประกอบสี่ใบ (V4) จนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว (R8) ส่วนคลอโรฟิลล์ บี เริ่มมีการลดลงในระยะเริ่มออกดอก (R1) จนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว แต่ความเข้มข้นโอโซนที่เพิ่มขึ้นจากระดับธรรมชาติ กลับส่งผลกระทบในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ต่อปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์มีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่ระยะเริ่มออกดอกจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว**

4. ความเข้มข้นโอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ (CF^{+O3}) ส่งผลกระทบในเชิงลบต่อลักษณะทางสัณฐานและกายวิภาคของใบถั่วเหลือง ในเชิงสีของใบและความเสียหายต่อใบที่สามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ สีของใบจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองแกมแดงอย่างชัดเจน และความเสียหายของใบโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 50% ตั้งแต่ระยะเริ่มติดฝัก (R3) ความหนาของใบโดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นแพลิเซดมีโซฟิลล์ (palisade mesophyll) มีค่าลดลงทั้งขนาดและความหนาของผนังเซลล์ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดช่องว่างภายในเนื้อเยื่อเพิ่มมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อเนื่อง ในเชิงลบต่อการเปิดปิดปากใบของถั่วเหลือง บริเวณเซลล์คุม (guard cell) โดยพบความเสียหายของปากใบ ปากใบปิด และมีความหนาแน่นลดลง ขน (trichome) ที่ผิวใบหดสั้น เนื้อเยื่อชั้นผิว (epidermis) ทั้งสองด้าน มีการสร้างผิวเคลือบคิวติน (cuticle) เพิ่มขึ้น ส่งผลต่อการคายน้ำ แลกเปลี่ยนก๊าซ และการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในใบ

5. ความเข้มข้นโอโซนที่ต่ำกว่าธรรมชาติ (CF) ส่งผลกระทบในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (NCF) ต่อความสูงของลำต้น ดัชนีพื้นที่ใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นในระยะที่มีใบประกอบสี่ใบจนถึงระยะเริ่มเก็บเกี่ยว สอดคล้องกับสีของใบที่ยังคงเป็นสีเขียว และใบไม่ได้รับความเสียหาย จำนวนเซลล์ของแพลิเซดมีโซฟิลล์ (palisade mesophyll) มีค่ามากขึ้น มีการเรียงตัวกันแน่นของเซลล์ทำให้ช่องว่างภายในเนื้อเยื่อลดลง บริเวณเซลล์คุม (guard cell) ไม่ได้รับความเสียหาย ทำให้ปากใบเปิด ส่งผลให้มีการคายน้ำ แลกเปลี่ยนก๊าซ และสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ในใบมากขึ้น

สรุปในภาพรวมจากผลการศึกษาในครั้งนี้บ่งชี้ว่า ความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลกระทบในเชิงลบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ในปัจจัยด้านการเจริญเติบโต ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี สอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาและกายวิภาคของใบ คือ เมื่อได้รับความเข้มข้นโอโซนที่สูงกว่าธรรมชาติ 3 เท่า ใบจะเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองแกมแดง ความหนาของใบลดลงเนื่องจากมีการทำลายเซลล์ในชั้นแพลิเซดมีโซฟิลล์ ที่ทำหน้าที่โดยตรงต่อการสังเคราะห์แสง และส่งผลต่อการลดลงของผลผลิตรวมทั้งคุณภาพสารอาหาร ดังนั้นในอนาคตทางรัฐบาลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทั้งกรมวิชาการเกษตรและกรมควบคุมมลพิษจึงควรหาแนวทางและนโยบายการป้องกันมลพิษจากโอโซนที่เพิ่มขึ้นที่ส่งผลต่อภาคการเกษตร อาจมีการออกนโยบายการควบคุมระดับโอโซนในธรรมชาติ และจัดทำตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Bio indicator) ที่ให้เกษตรกรได้สังเกตและเฝ้าระวังผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของโอโซน โดยชี้ให้เห็นความแตกต่างของความเสียหายทางใบที่เกิดจากโอโซนและโรคของถั่วเหลือง เพื่อไม่ให้เกษตรกรเกิดความสับสน และหาทางป้องกันได้ถูกต้องเหมาะสมต่อไป

อภิปรายผล

การศึกษาระดับความเข้มข้นของโอโซนที่มีความแตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ โดยมีระดับโอโซนที่เทียบเท่าธรรมชาติเป็นชุดควบคุม ทำการบันทึกผลตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเมษายน 2554 ดังแสดงค่าในบทที่ 4 พบว่าค่าระดับความเข้มข้นซึ่งควบคุมให้มีค่าสูงกว่าระดับธรรมชาติโดย มี ระดับความเข้มข้นสูงสุด 107.30 ppb นั้น จัดว่ามีระดับความเข้มข้นเทียบเท่ากับระดับสูงของบางช่วงในเวลากลางวันของพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจวัดของผู้ศึกษาด้วยตนเองในเขตเมือง และชานเมือง ซึ่งพบว่าบางวันระดับโอโซนอยู่ในช่วงระหว่าง 50-120 ppb ในช่วงเวลาระหว่าง 10.00 -15.00 น.

ซึ่งจากการศึกษาพบว่าที่ระดับความเข้มข้น ประมาณ 107.30 ppb เป็นระดับที่สูงเพียงพอต่อการรบกวน เปลี่ยนแปลง ยับยั้ง หรือทำลาย กระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชโดยทั่วไปรวมทั้งพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง งานวิจัยของ Bender, et al.(1990) ซึ่งศึกษาผลของโอโซนกับถั่ว เป็นเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าระดับโอโซนที่ 24-109 ppb สามารถลดปริมาณคลอโรฟิลล์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในครั้งนี้ที่พบว่าโอโซนส่งผลกระทบในเชิงลบในด้านการเจริญเติบโตทั้งทางลำต้นและใบ ปริมาณรงควัตถุที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสง รวมทั้งยังทำลาย organelles ต่างๆ ในเนื้อเยื่อของใบ ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสร้างผลผลิตในด้านสารอาหารที่จำเป็น เช่น โปรตีน และยังส่งผลกระทบต่อปริมาณผลผลิตของถั่วเหลืองด้วย

จากข้อมูลดังกล่าวจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจว่าระดับโอโซนในปัจจุบันและอนาคตในเขตพื้นที่จังหวัดพิษณุโลกจะส่งผลกระทบต่อถั่วเหลือง และ พืชเศรษฐกิจอื่นๆ อย่างไรต่อไป และเนื่องจากผลการศึกษาส่วนหนึ่งที่พบว่าโอโซนมีผลต่อความเสียหายของใบได้อย่างชัดเจน ซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตา (visible symptom) ดังนั้นจึงเป็นคำถามต่อไปสำหรับการวิจัยในอนาคตว่า สามารถนำมาเป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ (Bio-indicator) ในสิ่งแวดล้อมได้หรือไม่ เพื่อเกษตรกรจะนำมาเป็นข้อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพืชในพื้นที่ได้

การตอบสนองต่อโอโซนด้านการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง (ความสูงของลำต้น ขนาดของใบ ดัชนีพื้นที่ใบ และรงควัตถุในใบ)

จากการศึกษาผลกระทบของโอโซนที่มีต่อปัจจัยด้านการเจริญเติบโตและรงควัตถุในใบของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 เป็นเวลา 7 ชั่วโมงต่อวัน นาน 76 วัน พบว่าระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 ทั้งทางด้านลำต้นและใบ ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม โดยความสูงเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตเท่ากับ 84.2, 77.1 และ 66.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของ

โอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ ความสูงของลำต้นเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 9.18% และที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนสูงกว่าธรรมชาติความสูงเฉลี่ยลดลง 13.42% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Calatayud (2003) ที่ทำการศึกษากลไกทางสรีรวิทยาพบว่าเมื่อโอโซนแพร่เข้าทางปากใบจะมีการปิดของปากใบ ทำให้ลดอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสง ทำให้ลดประสิทธิภาพของ Carboxylation ที่ทำหน้าที่สำคัญในการซ่อมแซมระบบการสังเคราะห์แสงทำให้การสังเคราะห์แสงลดลงและลดอัตราการเจริญเติบโตรวมทั้งการสร้างสารอาหารในถั่วเหลือง

ความสูงจัดเป็นลักษณะที่แสดงถึงการเจริญเติบโตที่สามารถสังเกตได้ง่ายเมื่อพืชได้รับผลกระทบจากโอโซนนอกจากความเสียหายทางใบที่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ray (1983) พบว่าโอโซนที่ระดับความเข้มข้น 0.2 ppm ทำให้ความสูงของต้นข้าวพันธุ์ M7, M9 และ S201 มีค่าลดลง และจากการศึกษาของ Saitanis and Karandinos (2002) พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนมากกว่า 90 ppb ส่งผลกระทบให้ความสูงของต้นยาสูบสายพันธุ์ Bel-3, KK6/5 และ K63 มีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Borowiak and Wujeska (2012) ที่พบว่าความเข้มข้นของโทรโปสเฟียริคโอโซนที่เพิ่มขึ้นส่งผลกระทบโดยตรงต่อความสูงของต้นยาสูบและถั่ว

ขนาดของใบ และดัชนีพื้นที่ใบเป็นส่วนสำคัญที่พืชใช้ในการแลกเปลี่ยนก๊าซ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ดัชนีพื้นที่ใบที่เหมาะสมของถั่วเหลืองอยู่ระหว่าง 5.00-6.00 (Yoshida, 1981) จากผลการวิจัยพบว่าโอโซนที่มีระดับความเข้มข้นสูงส่งผลกระทบในเชิงลบต่อดัชนีพื้นที่ใบของถั่วเหลือง พบว่าในชุดทดลองที่ระดับโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ เทียบเท่าธรรมชาติ และสูงกว่าธรรมชาติ มีค่า 2.2, 1.8 และ 1.7 ตามลำดับ ในชุดทดลองที่ระดับโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 24.57% ซึ่งในชุดทดลองที่มีระดับความเข้มข้นโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีค่าเฉลี่ยลดลง 5.14% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากการศึกษาค่าดัชนีพื้นที่ใบมีความสำคัญมากในระยะที่เริ่มติดฝัก (R3) ถ้ามีค่าน้อยกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับระดับค่าปกติจะทำให้ผลผลิตทั้งหมดของถั่วเหลืองลดลง 6% สอดคล้องกับการศึกษาของวิภาพรรณ ชนะภักดิ์ และคณะ (2553) พบว่าดัชนีพื้นที่ใบที่ระยะเริ่มติดเมล็ด (R5) และปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ระยะเมล็ดพัฒนาเต็มที่ (R6) มีความสัมพันธ์ทางบวกกับผลผลิต และจากการวิจัยในครั้งนี้พบว่าค่าดัชนีพื้นที่ใบที่ระยะเริ่มติดฝักมีค่าเฉลี่ยลดลง 15.05% เมื่อได้รับความเข้มข้นของโอโซนในระดับที่สูงกว่าธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาข้าวญี่ปุ่นพันธุ์ Koshihikari และ Nipponbare ที่ได้รับโอโซนเป็นระยะเวลานาน มีผลให้ค่าดัชนีพื้นที่ใบลดลง 14% และ 17% ตามลำดับ (Kobayashi and Okada, 1995) และจาก

การศึกษาของ Zouzoulas, et al. (2009) พบว่าที่ระดับโอโซน 100 ppb ส่งผลมากที่สุดต่อการลดดัชนีพื้นที่ใบของต้นฝ้าย

จากการศึกษาผลกระทบของระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นต่อปริมาณรงควัตถุในใบของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 พบว่าคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ มีการตอบสนองต่อระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P \leq 0.05$ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เฉลี่ยเท่ากับ 13.1, 8.3 และ 5.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ยเท่ากับ 5.5, 4.8 และ 3.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีปริมาณแคโรทีนอยด์เท่ากับ 1.5, 2.4 และ 2.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (CF, NCF และ CF^{+O3}) ที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ยลดลง 32.33% และ 34.10% ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ (CF) มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี เฉลี่ยเพิ่มขึ้น 58.14% และ 14.85% ตามลำดับ แต่กลับพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น 11.35% ในชุดทดลองที่ระดับโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ และลดลง 38.66% ในชุดทดลองที่ระดับโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Salam and Soja (1995) พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซน 50 ppb ส่งผลต่อการลดปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงในถั่วพุ่ม รวมทั้งก่อให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ 2 (PS II) และยังมีผลให้จำนวนใบ ปากใบ ทำให้เกิดความเสียหายทางใบในถั่ว 3 สายพันธุ์คือ Lit, Goffry และ Stella เท่ากับ 69.8%, 57.8% และ 71.1% ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ Arminana, et al. (2004) พบว่าระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลกระทบต่อการลดจำนวนเม็ดสีคลอโรฟิลล์ในคลอโรพลาสต์ของ *Pistacia lentiscus* L. นอกจากนั้นจากงานวิจัยของ Saitanis, et al. (2001) ยังพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของโอโซน 90 ppb และ 135 ppb นาน 8 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 20 วัน มีผลต่อการลดปริมาณของคลอโรฟิลล์เอมากกว่าคลอโรฟิลล์บี เกิดอาการ necrotic และ chlorotic เร่งการแก่ก่อนวัยของใบ ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ และยังลดกลไกในการสังเคราะห์แสง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ramaškevicienė, et al. (2008) พบว่าระดับโอโซนที่สูงภายใต้สภาวะอากาศร้อนส่งผลต่อการลดจำนวนเม็ดสีลง 18-29% ลดความยาวของใบและมวลชีวภาพของถั่วเหลือง

การตอบสนองต่อโอโซนทางสัณฐานและกายวิภาคของใบถั่วเหลือง

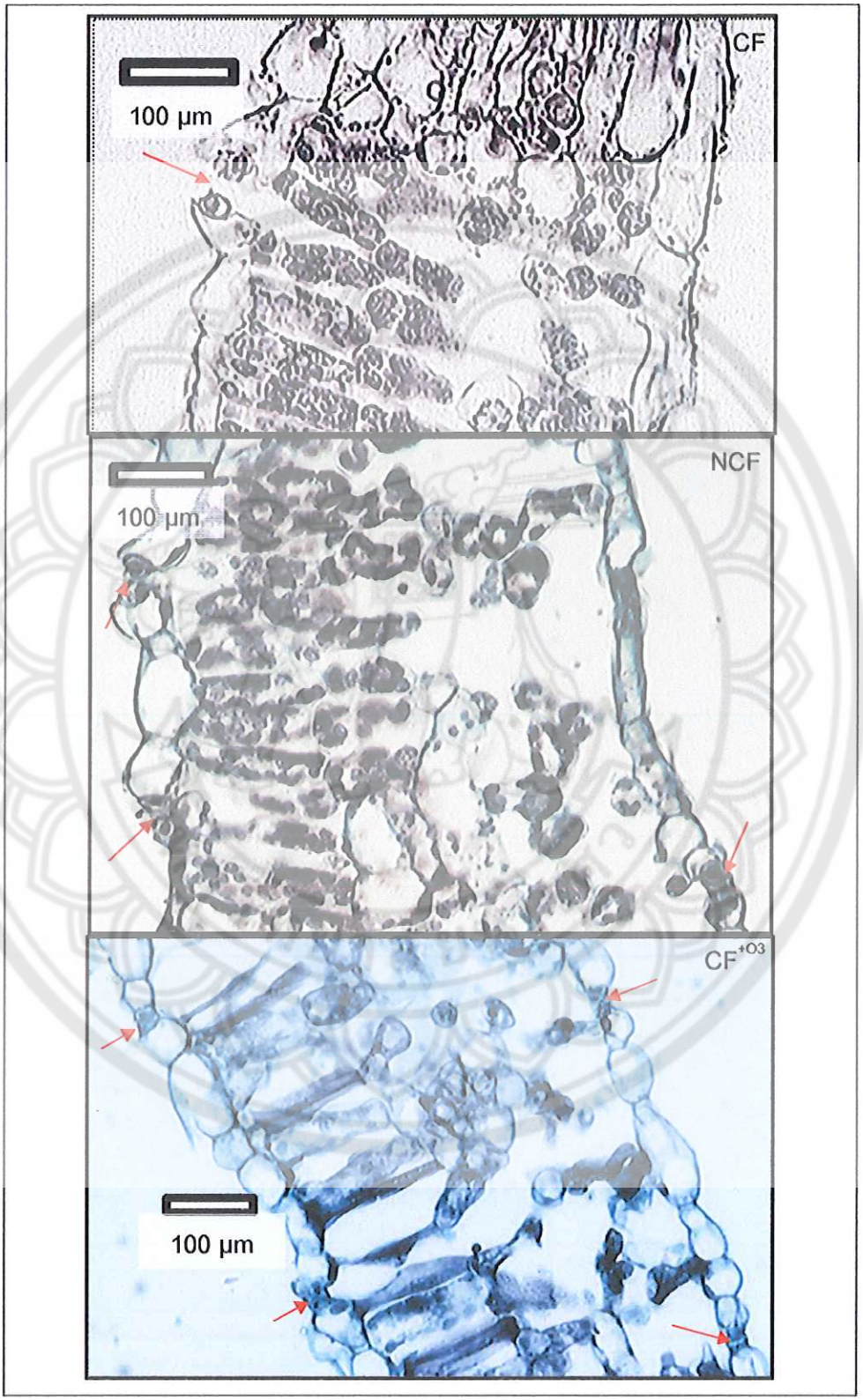
จากการศึกษาผลกระทบของระดับโอโซนที่เพิ่มขึ้นต่อสัณฐานและกายวิภาคใบของถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60 พบว่าใบของถั่วเหลืองมีแนวโน้มของสีเปลี่ยนไปตามระดับความเข้มข้นของโอโซนที่เพิ่มขึ้น คือ ที่ระยะเริ่มเก็บเกี่ยว (R8) ในชุดทดลองที่ระดับโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ

ใบเป็นสีเขียว 100% ชุดทดลองที่ระดับโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติและชุดทดลองที่ระดับโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ ใบเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองแกมแดง 40% และ 76.67% รวมทั้งมีแนวโน้มความเสียหายของใบเพิ่มขึ้นตามระดับความเข้มข้นของโอโซน คือ ในชุดทดลองที่มีระดับโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติ ใบของถั่วเหลืองไม่ได้รับความเสียหาย ชุดทดลองที่ระดับโอโซนเทียบเท่าธรรมชาติมีใบที่เสียหายในระดับ 4 มากถึง 50% ของใบทั้งหมด และในชุดทดลองที่ระดับโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ มีใบที่เสียหายในระดับ 6 ประมาณ 80% ซึ่งความเสียหายของใบที่สามารถมองเห็นได้ (Visible symptom) มีความสอดคล้องกับการศึกษาโครงสร้างภายในของใบ โดยพบว่าในชุดทดลองที่ระดับโอโซนสูงกว่าธรรมชาติในระยะเริ่มเก็บเกี่ยว ความหนาของชั้นแพลิเซดมีโซฟิลล์ มีค่าเฉลี่ยลดลง 38.34% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากการถ่ายภาพ SEM ของปากและขนใบถั่วเหลืองในระยะเริ่มติดเมล็ด พบว่าเซลล์คุม (guard cell) จำนวนมากได้รับความเสียหายทำให้ปากใบปิดและมีความหนาแน่นลดลง ขน (trichome) ที่ผิวใบหดสั้น เนื้อเยื่อชั้นผิว (epidermis) ทั้งสองด้าน มีการสร้างผิวเคลือบคิวติน (cuticle) เพิ่มขึ้น (ภาพ 30 และภาพ 31) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Goerg (1996) ที่ทำการศึกษาการตอบสนองของ ต้นยาสูบ Poplar Birch และ Alder ที่สัมผัสโอโซนความเข้มข้น 75 ppb ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน พบว่าในเวลากลางคืนพืชไม่ได้รับผลกระทบจากโอโซน แต่ในเวลากลางวันต้นยาสูบมีความเสียหายทางใบที่เห็นเด่นชัด และลดการเจริญเติบโตลง ในพืชทั้ง 3 ชนิด พบว่าในช่วงเวลา 10.00 น. เมื่อได้รับโอโซนจะมีการปิดของปากใบ และปรากฏความเสียหายที่ผิวใบ มีการทำลายผนังเซลล์ (cell wall)ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Paoletti, et al. (2009) พบว่าเมื่อต้น Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) ได้รับโอโซนในระดับธรรมชาติจะส่งผลกระทบที่รุนแรงต่อโครงสร้างของปากใบในใบที่มีอายุน้อย มีผลต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซ ลดการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ของปากใบ และการปรับตัวของชั้น epidermis ส่งผลต่อการหายใจและสร้างพลังงาน ผลกระทบของโอโซนที่มีต่อปากใบนั้นเกิดจากเมื่อโอโซนจะดูดซึมเข้าไปในเนื้อเยื่อพืชผ่านทางปากใบซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของรูปากใบ เป็นปัจจัยสำคัญในการต่อต้านของพืช (Kondo and Sugahara, 1978) ที่ความชื้นสูงยังเพิ่มการดูดซึมโอโซนในส่วนด้านบนที่มีผิวเคลือบคิวติน (Zhang, et al., 2002) โอโซนส่วนใหญ่ผ่านทางปากใบที่เปิด การปิดปากใบจึงเป็นกลไกการป้องกันเพื่อควบคุมการแพร่กระจายของโอโซนทางปากใบ (ลด conductance ที่ปากใบ) (Madkour and Laurence, 2002) การเปิดปิดปากใบขึ้นอยู่กับการสูญเสีย water potential ที่เกิดกับเซลล์จากการซึมผ่านของโอโซนเนื้อเยื่อในเซลล์เหล่านี้จะเกิดการปรับเปลี่ยนความสมดุลและทำให้เกิดประจุลบและมีการเปิดปิดของปากใบ โอโซนที่เหนี่ยวนำให้มีการปิดของปากใบส่งผลกระทบต่อการลดกระบวนการสังเคราะห์แสง ลดปริมาณ CO_2 ใน

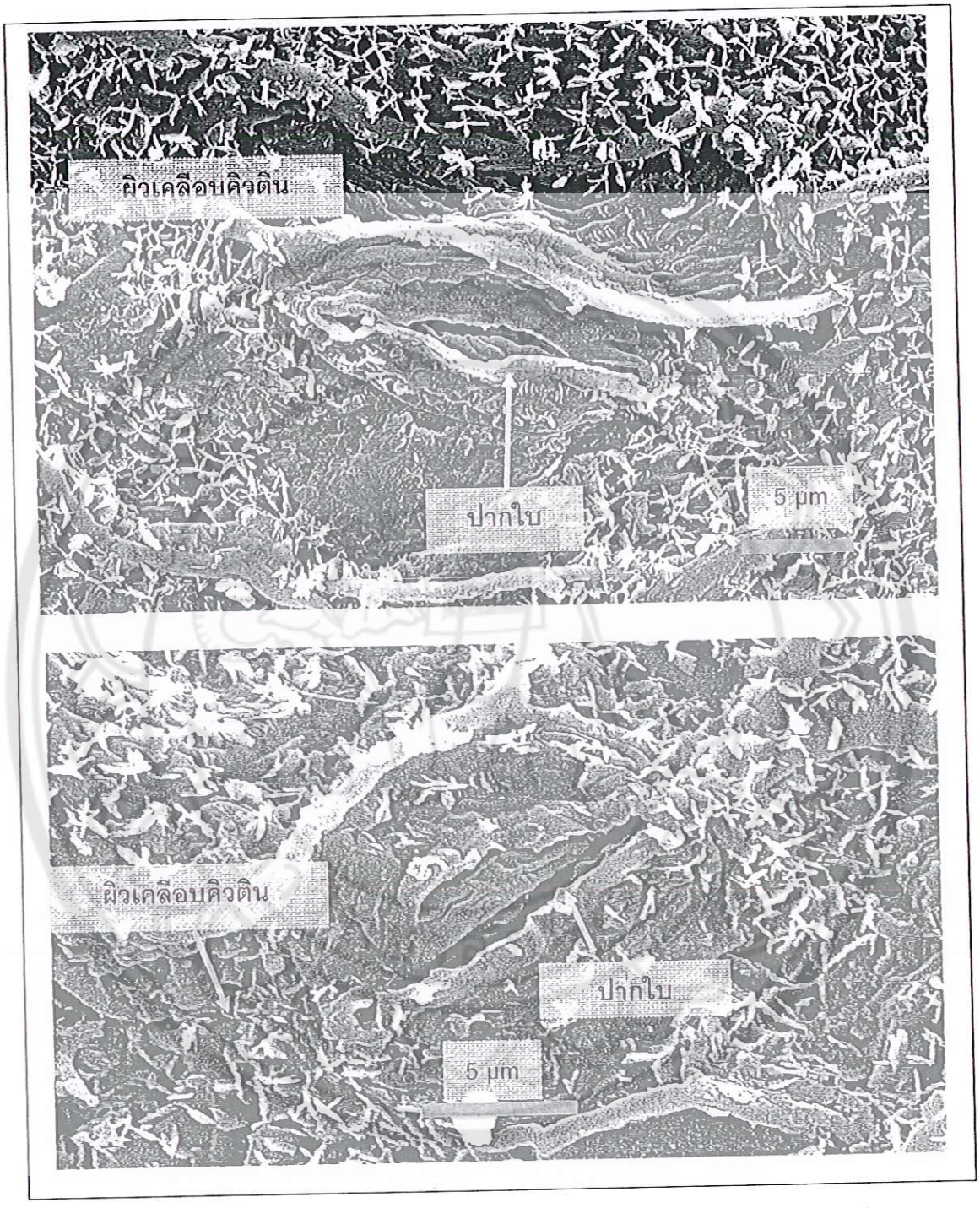
เนื้อเยื่อ เพิ่มการซึมผ่านของ K^+ และ Na^+ หยุดการทำงานของ guard-cells และเพิ่มอนุพันธ์ของสารพิษ (Dominy and Heath, 1985; Robinson, et al., 1998; McAinsh, et al., 1996; Reiling and Davison, 2006)

จากการศึกษางานวิจัยในประเทศต่างๆ พบว่าผลการศึกษาแสดงไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างกันไป อาทิเช่น การวิจัยของ Sawada and Kohno (2009) แสดงผลที่ขัดแย้งกับงานวิจัยที่ได้ระบุในข้างต้น โดยพบว่าข้าวในแต่ละสายพันธุ์มีการตอบสนองต่อโอโซนที่ต่างกัน โดยข้าวอินเดียสายพันธุ์ Kasalath มีความทนทานต่อโอโซนมากที่สุด และข้าวญี่ปุ่นสายพันธุ์ Kirara 397 มีความว่องไวต่อโอโซนมากที่สุด ความเสียหายที่ผิวใบข้าวให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับการลดลงของผลผลิต คือ ในข้าวที่ได้รับความเสียหายทางใบมากกลับให้ผลผลิตที่มีค่าทางสถิติไม่แตกต่างกับข้าวที่ได้รับความเสียหายทางใบน้อย แต่กลับพบว่างานวิจัยของ Dolan (2011) ให้ผลที่แสดงลักษณะที่คล้ายคลึงและไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยส่วนมากโดยพบว่าองค์ประกอบเนื้อเยื่อภายในใบของ Coneflower (*Rudbeckia laciniata* var. *digitata*) ที่มีความว่องไวต่อโอโซน มีการลดลงของผนังเซลล์ที่ชั้นแพลิเซดมีโซฟิลล์ มีการทำลายเนื้อเยื่อชั้นผิว มีการตายของเซลล์เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของเม็ดสีมีค่าลดลง เมื่อได้รับโอโซนในระดับที่สูง ในการวิจัยครั้งนี้ยังพบว่าความไวของพืชต่อโอโซน นอกจากองค์ประกอบทางกายภาพและชีวภาพภายนอกของพืชเององค์ประกอบของเนื้อเยื่อภายในก็ส่งผลต่อการตอบสนองของพืชต่อโอโซนเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าความหนาแน่นของแพลิเซดมีโซฟิลล์มาก ผนังของเซลล์หนา และมีพื้นที่ช่องว่างภายในเนื้อเยื่อทั้งหมดน้อย พืชนั้นจะมีความทนทานต่อโอโซนที่ดี เช่นเดียวกับการศึกษาของ Bennett, et al. (1992) พบว่าหลังจากการสัมผัสกับโอโซน *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. และ *Prunus serotina* Ehrh. มีการลดลงของชั้นแพลิเซดมีโซฟิลล์ 27% และ 17% ในใบที่ไวต่อโอโซน เมื่อเทียบกับใบที่ทนต่อโอโซน ดังนั้นความหนาของใบมีผลต่อการตอบสนองกับโอโซนในพืช

โอโซนที่สูงกว่าระดับธรรมชาติส่งผลกระทบเชิงลบต่อการเจริญเติบโต รงควัตถุในใบ และสร้างความเสียหายให้แก่ใบ ซึ่งจากผลการศึกษาทั้งหมดนี้เป็นข้อมูลที่ชี้ให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานที่มองเห็นและผลที่ได้จากการศึกษาทางกายวิภาค ทำให้ทราบว่าโอโซนส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาเนื่องจากมีการทำลายผนังเซลล์ ทำให้หน้าที่และการทำงานรวมทั้งการขนส่งสารต่างๆ ผิดปกติ ส่งผลต่อการทำลายเม็ดสี ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของถั่วเหลือง และส่งผลต่อเนื่องในด้านปัจจัยผลผลิตและคุณภาพสารอาหาร โดยเฉพาะปริมาณของโปรตีนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลกระทบสืบเนื่องจากการลดปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของถั่วเหลือง



ภาพ 30 ปากใบของถั่วเหลืองเมื่อได้รับโอโซนที่ระยะเริ่มติดเมล็ด (R5)



ภาพ 31 ปากใบและสารเคลือบคิวตินของใบถั่วเหลืองพันธุ์เชียงใหม่ 60
ที่ได้รับโอโซนสูงกว่าธรรมชาติ; ผิวใบด้านบน (บน) ผิวใบด้านล่าง (ล่าง)

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

1.1 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ในกรณีที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ ที่ร่วมส่งผลส่งเสริมการเกิดผลกระทบของโอโซนต่อพืช ทั้งในด้านการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิในรอบวัน ช่วงฤดูกาลปลูกในแต่ละฤดูของถั่วเหลือง ควรมีการศึกษาและเก็บข้อมูลที่ต่อเนื่องเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการจัดทำดัชนีชี้วัดทางชีวภาพได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์

1.2 ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นของจัดการเพื่อลดปริมาณความเข้มข้นของโอโซนในพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก เนื่องจากผลการศึกษาพบว่า ในชุดทดลองที่ระดับความเข้มข้นของโอโซนต่ำกว่าธรรมชาติในพื้นที่ (ambient level) ส่งผลกระทบในเชิงบวกต่อความสูงและดัชนีพื้นที่ใบ ซึ่งแสดงว่าถ้าอนาคตระดับโอโซนในบรรยากาศลดลงย่อมส่งผลดีต่อพืชโดยทั่วไปเช่นเดียวกัน

2. ข้อเสนอแนะด้านการใช้ประโยชน์ของข้อมูล

ข้อมูลจากผลการศึกษานี้ ควรนำเสนอต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องโดยตรงเช่น ศูนย์วิจัยพืชไร่ จังหวัดพิษณุโลก เพื่อนำไปสู่การต่อยอดองค์ความรู้ หรือถ่ายทอดเทคโนโลยีในการป้องกันและแก้ไขปัญหา ที่มีต่อพืชทางการเกษตรที่สำคัญต่อไป