

ลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวที่มีต่อสถานะเครียดจากก๊าซโอโซนด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัลภาคพื้นดิน

Spectral signature reflectance of rice to monitor the response of rice to ozone stresses using *in-situ* measured hyperspectral remote sensing technology

ปวิวิชช์ สาระพิน^{1*}, ชลดา เดชาเกียรติไกรธีรการณวงศ์¹ และ ฤทัยรัตน์ โพรธิ¹

Pativit Sarapin^{1*}, Chonlada Dechakiatkrai Theerakarunwong¹ and Rutairat Phothi¹

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ 60000

¹ Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, 6000

* Corresponding author: pativit.s@nsru.ac.th

Received: date; March 24, 2020 Accepted: date; September 8, 2020 Published: date

บทคัดย่อ: การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข 43 ที่มีต่อ สถานะความเครียดจากผลกระทบของก๊าซโอโซนที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่า 10 ppb (ชุดควบคุม) 40 ppb และ 80 ppb ด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัล (Spectroradiometer) ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต ผลการศึกษาพบว่า เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัล สามารถแยกข้าวที่ได้รับและไม่ได้รับก๊าซโอโซน ได้ในช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (หลังรมก๊าซโอโซน 14 วัน) หากพิจารณาค่าการสะท้อนในแต่ละช่วงคลื่น พบว่า ช่วงคลื่นสีเขียว สีสแดง อินฟราเรดใกล้ และอินฟราเรดคลื่นสั้น สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยในช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ มีค่าการสะท้อนที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (740 - 1350 nm) ที่ระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.385 ± 0.024 รองลงมา คือ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.373 ± 0.019) และชุดควบคุม (0.256 ± 0.011) ผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการติดตามและเฝ้าระวังผลกระทบจากก๊าซโอโซนต่อข้าว ด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัลภาคพื้นดิน

คำสำคัญ: ลายเซ็นเชิงคลื่น; โอโซน; ไฮเปอร์สเปกตรัล; ข้าว

ABSTRACT: The purpose of this research was to study spectral signature reflectance of RD43 rice variety on stress conditions from the effect of ozone gas at the concentrations which was less than 10 ppb (control), 40 ppb and 80 ppb measured by the hyperspectral remote sensing technology in each growth phases. The results showed that the *in-situ* measured hyperspectral remote sensing technology was able to classify the

RD43 rice that has received ozone compared with the control group (no ozone fumigation) at reproductive growth phase (14 days ozone fumigated). The strong correlations of the reflectances of green band, red band, near-infrared (NIR) and shortwave infrared (SWIR) were clearly observed between experimental group and control group with significantly different at $p < 0.05$. During the reproductive growth; under near infrared wave of 740 - 1350 nm, the concentration of ozone gas 80 ppb exhibited the highest reflectivity of the electromagnetic wave by 0.385 ± 0.024 , followed by the concentration of 40 ppb (0.373 ± 0.019) and control group (0.256 ± 0.011), respectively. The findings of this research could benefit for using as a guideline to monitor the effects of ozone gas on rice with hyperspectral remote sensing technology.

Keywords: spectral signature; ozone; hyperspectral; *Oryza sativa* L.

บทนำ

ก๊าซโอโซนจัดเป็นมลพิษทุติยภูมิที่สร้างความเสียหายให้กับผลผลิตทางการเกษตรในหลายพื้นที่ทั่วโลก (Fiscus et al., 2005) โดยเฉพาะข้าว ซึ่งมีความไวต่อมลพิษทางอากาศ (Akhtar et al., 2010; Phothi et al., 2016) จากการศึกษาผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อสรีรวิทยาในข้าวหลายสายพันธุ์ เช่น ข้าวสาลี (Rai et al., 2007) ข้าวอินเดีย (Sarkar and Agrawal, 2009) ข้าวบังคลาเทศ (Akhtar et al., 2010) และข้าวไทย (Phothi et al., 2016) พบว่า ข้าวจะเริ่มแสดงอาการเสียหายทางใบที่มองเห็นได้ที่มีความเข้มข้นของก๊าซโอโซนต่ำสุด 40 ppb ส่งผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ การสังเคราะห์แสง และผลผลิตของข้าวลดลง รวมทั้งมีแนวโน้มรุนแรงมากขึ้นเมื่อได้รับก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้น จากรายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศของประเทศไทย โดยกรมควบคุมมลพิษในปี 2562 พบก๊าซโอโซนมีค่าเฉลี่ย 8 ชั่วโมงสูงสุด อยู่ในช่วง 56-133 ppb (ค่ามาตรฐาน 70 ppb) ค่าเฉลี่ยทั้งประเทศ 90 ppb หากพิจารณาในภาพรวมจึงถือว่ามีความเกินมาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) ซึ่งการบริหารจัดการแปลงของเกษตรกรในยุคเกษตรอัจฉริยะ (Smart farmer) จึงจำเป็นต้องมีการติดตามและเฝ้าระวังการตอบสนองของข้าวที่มีต่อความเครียดทางสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะช่วยลดผลกระทบต่อผลผลิตของข้าวและบริหารจัดการแปลงปลูกได้อย่างเหมาะสม เช่น การใส่ปุ๋ย หรือการบริหารจัดการน้ำในแปลงนา (จรัญธร, 2557; Leinenkugel et al., 2013; Guan et al., 2016) สอดคล้องกับการศึกษาของ Sanz et al. (2014) พบว่า การเพิ่มปริมาณปุ๋ยไนโตรเจนให้กับข้าวเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดผลกระทบจากก๊าซโอโซนได้

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลในการสำรวจและติดตามการตอบสนองของข้าวต่อความเครียดจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความถูกต้องและแม่นยำนั้น เป็นเทคนิคที่มีความสำคัญต่อการทำเกษตรกรรมที่มีความแม่นยำสูง (Precision agriculture) จากการศึกษาของ Meroni et al. (2009) พบว่าลักษณะการสะท้อนของค่าสเปกตรัมหรือลายเซ็นเชิงคลื่น (Spectral signature) ของพืช ที่ได้จากการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัล สามารถตรวจพบการตอบสนองต่อความเครียดจากก๊าซโอโซนได้ดีกว่าการรับรู้จากระยะไกลแบบเดิมหรือแบบมัลติสเปกตรัล และจากการศึกษาของ Chi et al. (2016) พบว่า เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัลภาคพื้นดิน สามารถตรวจวัดผลกระทบของก๊าซโอโซนต่อข้าวสาลี 4 ชนิดพันธุ์ ทั้งชนิดพันธุ์ที่ทนและอ่อนแอต่อโอโซน ได้ดี

ดังนั้นในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่นิยมบริโภคในกลุ่มผู้รักสุขภาพ เพราะมีปริมาณน้ำตาลต่ำ โดยศึกษาการตอบสนองต่อสภาวะความเครียดจากผลกระทบของก๊าซโอโซนที่ความเข้มข้น 40 ppb (มาตรฐานขั้นต่ำที่ข้าวเริ่มแสดงอาการทางใบ) และความเข้มข้น 80 ppb (มาตรฐานของประเทศไทย 70 ppb) ด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัลภาคพื้นดิน ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้เป็นฐานข้อมูลสเปกตรัลอ้างอิง (Endmember) สำหรับประยุกต์ใช้ร่วมกับการจำแนก

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในการติดตามและเฝ้าระวังผลกระทบจากก๊าซโอโซน เพื่อที่จะช่วยลดผลกระทบต่อผลิตและบริหารจัดการแปลงปลูกข้าวได้อย่างเหมาะสม

วิธีการศึกษา

การเตรียมการทดลอง

ศึกษาทดลองในโรงเรือนเพาะชำ บริเวณอาคารศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ระหว่างเดือนธันวาคม 2562 ถึงเดือนมีนาคม 2563 โดยเพาะเมล็ดพันธุ์ข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ในถาดพลาสติก ซึ่งใช้เมล็ดพันธุ์จากศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท จนได้ใบแก่แรก จึงย้ายไปปลูกในภาชนะที่มีดินเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว จำนวน 1 ต้นต่อ 1 กระถาง ใส่ปุ๋ยทั้งหมด 3 ครั้ง ตามคำแนะนำการให้ปุ๋ยแก่ข้าวจากสถาบันวิจัยข้าว คือ ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ย 16-20-0 อัตรา 35 กิโลกรัมต่อไร่ หลังจากย้ายต้นกล้าปลูกในกระถาง 15 วัน ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (ยูเรีย : 46-0-0) อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ ในระยะแตกกอ ครั้งที่ 3 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (ยูเรีย : 46-0-0) อัตรา 10 กิโลกรัมต่อไร่ ในระยะสร้างรวงอ่อน (สถาบันวิจัยข้าว, 2548)

แผนการทดลองและสิ่งทดลอง

เลือกใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) จำนวน 3 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 4 ซ้ำ ประกอบด้วย กรรมวิธีควบคุม (โอโซนไม่เกิน 10 ppb) ความเข้มข้นของก๊าซโอโซนในระดับ 40 ppb และ 80 ppb ตามลำดับ โดยนำต้นข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ปลูกในโรงเรือนรมก๊าซด้วยเครื่องผลิตก๊าซโอโซน ขนาดกว้าง 1.5 ยาว 1.5 สูง 2 เมตร จำนวน 3 โรง คลุมด้วยพลาสติกโปร่งแสง ติดตั้งภายนอกอาคาร รมก๊าซโอโซนวันละ 8 ชั่วโมง (เวลา 9.00 น. – 17.00 น.) เป็นเวลา 3 สัปดาห์ โดยตรวจวัดระดับก๊าซโอโซนด้วยเครื่อง Ozone analyzer model 49 C (Thermo Environmental Instruments, USA)

การจัดเก็บข้อมูล

การเก็บข้อมูลแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลา เพื่อให้ครอบคลุมระยะการเจริญเติบโตของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ทั้ง 3 ช่วง ได้แก่ 1. ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative phase) เลือกวัดในระยะแตกกอสูงสุด (Maximum tillering stage) วันที่ 26 กุมภาพันธ์ 2563 (หลังรมก๊าซโอโซน 7 วัน อายุข้าว 53 วัน) 2. ช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (Reproductive phase) เลือกวัดในระยะออกดอก (Flowering) วันที่ 4 มีนาคม 2563 (หลังรมก๊าซโอโซน 14 วัน อายุข้าว 60 วัน) และ 3. ช่วงการเจริญเติบโตของเมล็ด (Ripening phase) เลือกวัดในระยะข้าวเป็นน้านม (Milky stage) วันที่ 11 มีนาคม 2563 (หลังรมก๊าซโอโซน 21 วัน อายุข้าว 67 วัน)

การวัดค่าการตอบสนองของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ต่อระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซนตามกรรมวิธีการทดลองที่กำหนดด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัล รุ่น ASD FieldSpec® 3 Spectroradiometer การวัดแต่ละครั้งจะกำหนดให้เก็บข้อมูลซ้ำ (Replication) จำนวน 30 ครั้งต่อ 1 กรรมวิธี กรรมวิธีละ 4 ซ้ำ รวม 120 ตัวอย่าง ทำการทดลองในห้องที่บดแสง โดยใช้หลอดไฟ Halogen ขนาด 14.5 โวลต์ 50 วัตต์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง (Figure 1) ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ระหว่างช่วงคลื่น 350 - 2500 nm (Table 1) เลือกใช้มุมแนวตั้ง (Nadir position) ที่ระดับความสูงเหนือชั้นเรือนยอด (Canopy level) 30 เซนติเมตร กำหนดค่ามุมรับภาพ (Field of view ; FOV) เท่ากับ 25 องศา ครอบคลุมพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) 13.3 เซนติเมตร โดยก่อนการวัดในแต่ละชุดการทดลองจะเทียบมาตรฐาน (Calibrate) ค่าการสะท้อนแสงด้วยแผ่น White reference

Table 1 Characteristics of the ASD FieldSpec® 3 Spectroradiometer

Characteristics of the ASD FieldSpec	
Spectral Range	350 – 2500 nm
Spectral Resolution	3 nm @ 700 nm 10 nm @ 1400/2100 nm
Sampling Interval	1.4 nm @ 350-1050 nm 2 nm @ 1000-2500 nm
Wavelength reproducibility	0.1 nm
Wavelength accuracy	0.5 nm
Bands	2151
Weight	5.44 kg (12 lbs)

ASD. (2010)

**Figure 1** Experimental setup a) Halogen lamp b) Fully assembled pistol grip c) ASD FieldSpec d) White reference panel e) Computer notebook

การจัดทำลายเซ็นเชิงคลื่น

ข้อมูลที่บันทึกได้ (Raw digital number) จะถูกนำมาแปลงเป็นค่าการสะท้อน (Reflectance) ด้วยซอฟต์แวร์ ViewSpec Pro จากนั้นลดค่าสัญญาณรบกวน (Noise) ให้กับข้อมูล โดยใช้วิธี Savitzky-Golay Filtering สมการโพลีโนเมียล ลำดับที่ 2 ขนาด Filter เท่ากับ 4-0 (n L - n R) ด้วยซอฟต์แวร์ SAM และตัดข้อมูลที่มีค่าการสะท้อนพลังงานผิดปกติ (outliner) ในช่วงคลื่น 350-399 นาโนเมตร เปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสง ในแต่ละกรรมวิธีด้วยค่าต่ำสุด-สูงสุด ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าขีดจำกัดล่างที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (95% Lower confident limit: LCL) และค่าขีดจำกัดบนที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (95% Upper confidence limit: UCL) จากนั้นจึงสร้างค่าการสะท้อนแสงของวัตถุมาตรฐาน (Digital spectral library) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ภายใต้สภาวะเครียดจากก๊าซโอโซน 40 ppb และ 80 ppb

การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าการสะท้อนแสงของข้าวภายใต้สภาวะเครียดจากก๊าซโอโซน ระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มทดลอง ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต ด้วยความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายคู่เชิงพหุ (Multiple comparison) ด้วยวิธี Duncan's multiple range test: DMRT)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

สามารถแบ่งผลการศึกษาได้เป็น 3 ช่วง ตามการเจริญเติบโตของข้าว ดังนี้

1. ลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่น ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น (Vegetative phase)

ผลการศึกษาลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 หลังการรมก๊าซโอโซน 7 วัน ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น ในระยะแตกกอสูงสุด (ช่วงอายุ 53 วัน) พบว่า ช่วงคลื่นสีเขียว สีแดง อินฟราเรดใกล้ และอินฟราเรดคลื่นสั้น 1 สามารถจำแนกความแตกต่างของโอโซนระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยลายเซ็นเชิงคลื่นระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง มีค่าการสะท้อนที่ต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (740 - 1350 nm) โดยระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 0.298 ± 0.014 รองลงมา คือ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.284 ± 0.014) และ ชุดควบคุม (0.258 ± 0.015) ส่วนค่าการสะท้อนแสงต่ำที่สุด พบในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (400-700 nm) โดยเฉพาะช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (400-500 nm) ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำที่สุด เท่ากับ 0.014 ± 0.013 รองลงมา คือ ชุดควบคุม (0.016 ± 0.014) และ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.017 ± 0.015) รายละเอียดดัง **Table 2** และ **Figure 2**

Table 2 Statistics of spectral reflectance of rice variety RD43 on stress conditions from the effect of 7 days ozone fumigated at the vegetative phase (n = 120)

Spectral region (wavelength)	Treatments	Spectral reflectance		
		Min	Max	Mean±SD
Blue (400-500 nm)	Control	-0.038	0.035	0.016±0.014
	O ₃ 40 ppb	-0.041	0.034	0.017±0.015
	O ₃ 80 ppb	-0.038	0.031	0.014±0.013
Green (501-600 nm)	Control	0.036	0.089	0.070±0.015 ^a
	O ₃ 40 ppb	0.035	0.084	0.066±0.014 ^{ab}
	O ₃ 80 ppb	0.031	0.081	0.061±0.014 ^b
Red (601-700 nm)	Control	0.033	0.090	0.049±0.012 ^a
	O ₃ 40 ppb	0.031	0.081	0.044±0.010 ^{ab}
	O ₃ 80 ppb	0.027	0.075	0.039±0.009 ^b
Near infrared (740-1350 nm)	Control	0.229	0.285	0.258±0.015 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.250	0.309	0.284±0.014 ^{ab}
	O ₃ 80 ppb	0.265	0.323	0.298±0.014 ^a
Short wavelength infrared 1 (SWIR1) (1461-1789 nm)	Control	0.121	0.207	0.183±0.025 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.127	0.224	0.197±0.028 ^a

	O ₃ 80 ppb	0.122	0.227	0.197±0.030 ^a
Short wavelength infrared 2 (SWIR2) (2101-2250 nm)	Control	0.116	0.136	0.130±0.005
	O ₃ 40 ppb	0.122	0.145	0.138±0.006
	O ₃ 80 ppb	0.120	0.143	0.136±0.006

Different letters indicate significant differences among treatments at $p \leq 0.05$

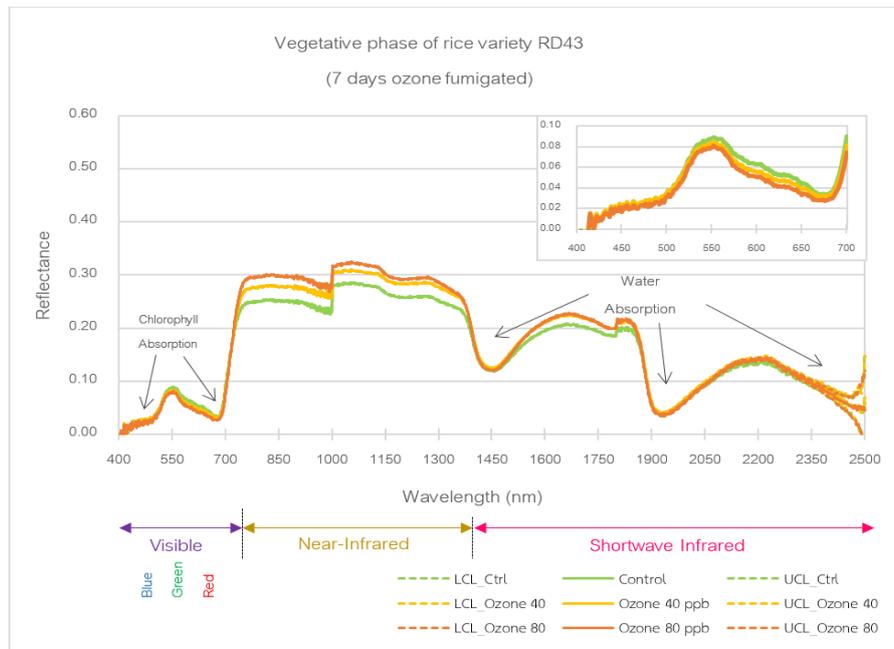


Figure 2 Spectral signature reflectance of RD43 rice variety on stress conditions from the effect of ozone gas at the vegetative phase ($n = 120$)

2. ลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่น ช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ (Reproductive phase)

ผลการศึกษาลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 หลังการรมก๊าซโอโซน 14 วัน ช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ในระยะออกดอก (ช่วงอายุ 60 วัน) พบว่า ทุกช่วงคลื่น ยกเว้นช่วงคลื่นสีน้ำเงิน สามารถจำแนกความแตกต่างของโอโซนระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยลายเซ็นเชิงคลื่นระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง มีค่าการสะท้อนที่ต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (740 - 1350 nm) โดยระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.385 ± 0.024 รองลงมา คือ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.373 ± 0.019) และ ชุดควบคุม (0.256 ± 0.011) ส่วนค่าการสะท้อนแสงต่ำที่สุด พบในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (400-700 nm) โดยเฉพาะช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (400-500 nm) ซึ่งชุดควบคุม มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำที่สุด เท่ากับ 0.009 ± 0.016 รองลงมา คือ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.013 ± 0.018) และ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb (0.016 ± 0.017) รายละเอียดดัง **Table 3** และ **Figure 3**

Table 3 Statistics of spectral reflectance of RD43 rice variety on stress conditions from the effect of 14 days ozone fumigated at the reproductive phase (n = 120)

Spectral region (wavelength)	Treatments	Spectral reflectance		
		Min	Max	Mean±SD
Blue (400-500 nm)	Control	-0.052	0.870	0.009±0.016
	O ₃ 40 ppb	-0.054	1.286	0.013±0.018
	O ₃ 80 ppb	-0.051	1.626	0.016±0.017
Green (501-600 nm)	Control	0.028	0.073	0.056±0.013 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.035	0.097	0.073±0.018 ^a
	O ₃ 80 ppb	0.037	0.098	0.074±0.018 ^a
Red (601-700 nm)	Control	0.024	0.067	0.036±0.009 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.029	0.088	0.044±0.012 ^a
	O ₃ 80 ppb	0.031	0.090	0.046±0.012 ^a
Near infrared (740-1350 nm)	Control	0.227	0.272	0.256±0.011 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.322	0.407	0.373±0.019 ^{ab}
	O ₃ 80 ppb	0.328	0.427	0.385±0.024 ^a
Short wavelength infrared 1 (SWIR1) (1461-1789 nm)	Control	0.110	0.195	0.171±0.024 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.173	0.304	0.267±0.037 ^a
	O ₃ 80 ppb	0.181	0.315	0.278±0.038 ^a
Short wavelength infrared 2 (SWIR2) (2101-2250 nm)	Control	0.095	0.113	0.108±0.005 ^b
	O ₃ 40 ppb	0.168	0.196	0.188±0.007 ^a
	O ₃ 80 ppb	0.176	0.206	0.197±0.007 ^a

Different letters indicate significant differences among treatments at $p \leq 0.05$

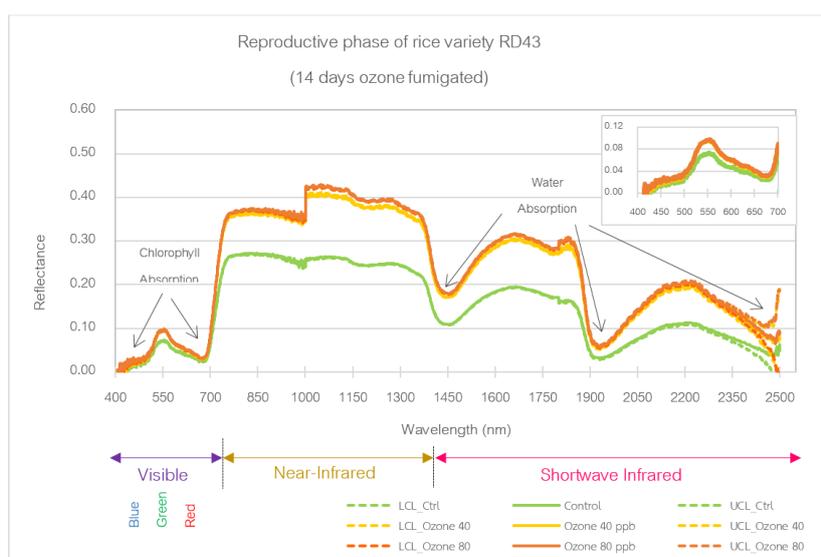


Figure 3 Spectral signature reflectance of rice variety RD43 on stress conditions from the effect of ozone gas at the reproductive phase (n = 120)

3. ลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่น ช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด (Ripening phase)

ผลการศึกษาลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 หลังการรมก๊าซโอโซน 21 วัน ช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด ในระยะข้าวเป็นนํ้านม (ช่วงอายุ 67 วัน) พบว่า ทุกช่วงคลื่น สามารถจำแนกความแตกต่างของโอโซนระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยลายเซ็นเชิงคลื่นระหว่างชุดควบคุมกับชุดทดลอง มีค่าการสะท้อนที่ต่างกันอย่างชัดเจนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (740 - 1350 nm) โดยระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.174 ± 0.009 รองลงมา คือ โดยระดับความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.171 ± 0.007) และ ชุดควบคุม (0.151 ± 0.006) ส่วนค่าการสะท้อนแสงต่ำที่สุด พบในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (400-700 nm) โดยเฉพาะช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (400-500nm) ซึ่งชุดควบคุม มีค่าการสะท้อนแสงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยต่ำที่สุดเท่ากับ 0.003 ± 0.010 รองลงมาคือ ความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 40 ppb (0.007 ± 0.010) และความเข้มข้นของก๊าซโอโซน 80 ppb (0.008 ± 0.008) รายละเอียดดัง **Table 4** และ **Figure 4**

Table 4 Statistics of spectral reflectance of rice variety RD43 on stress conditions from the effect of 21 days ozone fumigated at the ripening phase (n = 120)

Spectral region (wavelength)	Treatments	Spectral reflectance		
		Min	Max	Mean±SD
Blue (400-500 nm)	Control	-0.036	0.016	0.003 ± 0.010^b
	O ₃ 40 ppb	-0.029	0.021	0.007 ± 0.010^a
	O ₃ 80 ppb	-0.025	0.020	0.008 ± 0.008^a
Green (501-600 nm)	Control	0.016	0.043	0.033 ± 0.007^b
	O ₃ 40 ppb	0.020	0.051	0.040 ± 0.008^a
	O ₃ 80 ppb	0.020	0.050	0.039 ± 0.008^a
Red (601-700 nm)	Control	0.014	0.042	0.022 ± 0.006^b
	O ₃ 40 ppb	0.021	0.052	0.029 ± 0.006^a
	O ₃ 80 ppb	0.020	0.055	0.029 ± 0.007^a
Near infrared (740-1350 nm)	Control	0.132	0.160	0.151 ± 0.006^b
	O ₃ 40 ppb	0.153	0.184	0.171 ± 0.007^a
	O ₃ 80 ppb	0.153	0.190	0.174 ± 0.009^a
Short wavelength infrared 1 (SWIR1) (1461-1789 nm)	Control	0.059	0.111	0.095 ± 0.015^b
	O ₃ 40 ppb	0.078	0.134	0.118 ± 0.016^a
	O ₃ 80 ppb	0.079	0.139	0.123 ± 0.017^a
Short wavelength infrared 2 (SWIR2) (2101-2250 nm)	Control	0.055	0.067	0.063 ± 0.003^b
	O ₃ 40 ppb	0.074	0.086	0.083 ± 0.003^{ab}
	O ₃ 80 ppb	0.077	0.090	0.086 ± 0.003^a

Different letters indicate significant differences among treatments at $p \leq 0.05$

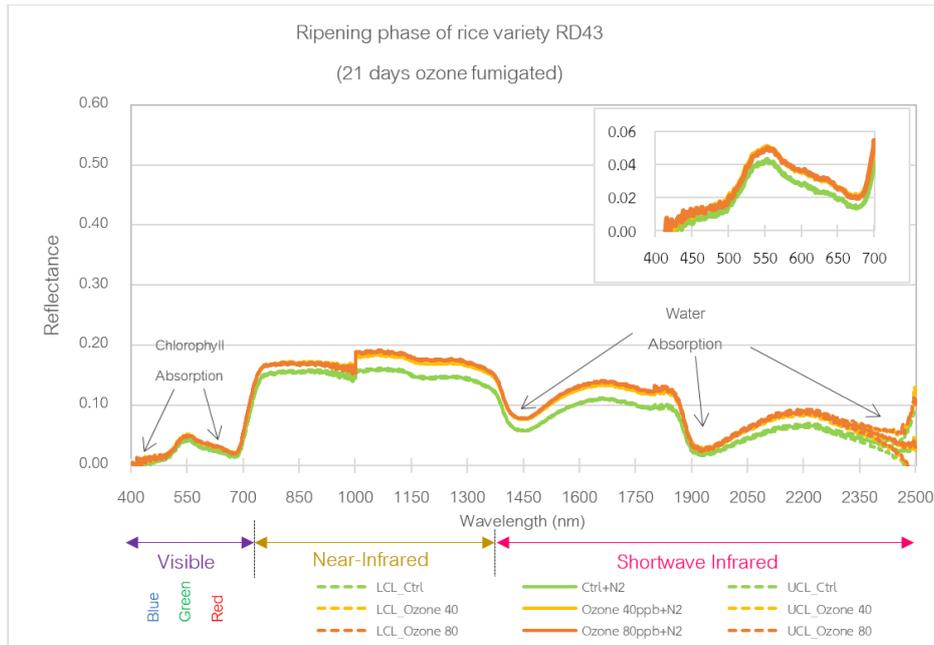


Figure 4 Spectral signature reflectances of rice variety RD43 on stress conditions from the effect of ozone gas at the ripening phase (n = 120)

จาก **Figure 2-4** พบว่า ลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่นของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 หลังการรมก๊าซโอโซน ในระดับ 40 ppb 80 ppb เปรียบเทียบกับกรรมวิธีควบคุม (โอโซนไม่เกิน 10 ppb) ที่ระดับชั้นเรือนยอด ทั้ง 3 ช่วงการเจริญเติบโต สามารถพิจารณาตามลักษณะการสะท้อนพลังงานของข้าว โดยมีรายละเอียดสำคัญในแต่ละช่วงคลื่น ดังนี้

1. ช่วงคลื่นที่ตามองเห็น (Visible light: 400-700 nm) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ทั้ง 3 กรรมวิธี จะมีการสะท้อนพลังงานต่ำในช่วงคลื่นนี้ โดยจะดูดกลืนพลังงานในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและช่วงคลื่นสีแดง เนื่องจากคลอโรฟิลล์ที่อยู่ในใบข้าว ซึ่งเป็นรงควัตถุ (Pigments) จะดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นนี้ได้ดี (Chlorophyll absorption bands) โดยเฉพาะความยาวคลื่น 680 nm (Far red) ซึ่งคลอโรฟิลล์สามารถดูดกลืนแสงได้มากที่สุด (จรัสธร, 2557) และจะสะท้อนพลังงานออกมามากที่สุดที่ความยาวคลื่น 550 nm (สีเขียว) เมื่อพืชมีอาการผิดปกติหรือคลอโรฟิลล์ลดลงจะส่งผลให้การสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นสีน้ำเงินและสีแดงมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Chi et al. (2016) ที่ตรวจหาผลของก๊าซโอโซนต่อข้าวสาลี 4 ชนิด ด้วยเครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัล พบว่า ดัชนีพืชพรรณที่ให้ค่าความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวมากที่สุด คือ ดัชนี mND_{705} , ND_{705} และ R_{550} ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าดัชนีดังกล่าวใช้ช่วงคลื่นสีแดงไกล ช่วงคลื่นสีน้ำเงิน และช่วงคลื่นสีเขียวในการคำนวณ และสามารถตรวจจับผลกระทบจากก๊าซโอโซนต่อข้าวสาลีในพันธุ์อ่อนแอ ได้ตั้งแต่ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นจนถึงช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด ส่วนในพันธุ์ทนทานสามารถตรวจพบได้ในช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด เป็นที่น่าสังเกตว่าการสะท้อนช่วงคลื่นที่ตามองเห็นในช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น ของชุดทดลอง (หลังการรมก๊าซโอโซน 7 วัน) มีค่าการสะท้อนต่ำกว่าชุดควบคุม เนื่องจากช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นเป็นช่วงที่ข้าวสร้างใบใหม่ และใบข้าวยังไม่มีมีการตอบสนองต่อก๊าซโอโซนเท่าที่ควร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Fiscus et al. (2005) พบว่า ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบของพืช กิจกรรมการสังเคราะห์แสงในชั้นเรือนยอดของพืชที่เพิ่งสร้างใหม่จะยังไม่ได้รับผลกระทบหรือตอบสนองต่อสภาวะเครียด และเมื่อพิจารณาการสะท้อนพลังงานในช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ และช่วงการเจริญเติบโตของเมล็ด พบว่า การสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นของชุดทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นกว่าชุดควบคุม โดยเฉพาะช่วงคลื่นสีแดง เนื่องจาก ปริมาณคลอโรฟิลล์และการสังเคราะห์แสงของข้าวลดลง (Thenkabali et al., 2013)

2. ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared: 740-1350 nm) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ทั้ง 3 ชุดการทดลอง จะมีค่าการสะท้อนพลังงานสูงที่สุดในช่วงคลื่นนี้ โดยเฉพาะช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ และลดต่ำลงในช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Mosleh et al. (2015) ที่ศึกษาซีพลักษณะของการปลูกข้าว พบว่า ข้าวระยะออกดอก (Flowering stage) จะเจริญเติบโตมากที่สุด จึงทำให้สามารถเห็นลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวแต่ละพันธุ์ได้ ส่งผลทำให้ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้สะท้อนพลังงานได้มากที่สุด และค่าการสะท้อนจะลดลงในช่วงคลื่น Infrared slope (1350-1450 nm) เนื่องจากคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในใบ ลักษณะโครงสร้างภายในของใบ (Cell structure) และลักษณะของทรงพุ่ม (Canopy) สามารถสะท้อนพลังงานที่มากกระทบในช่วงคลื่นนี้ได้ดี (Shwetank et al., 2010; Leinenkugel et al., 2013; Thenkabali et al., 2013; Guan et al., 2016) จึงสามารถใช้ช่วงคลื่นนี้ดูความผิดปกติของข้าวได้ โดยใบที่มีสีเขียวจะให้ค่าการสะท้อนแสงต่ำกว่าใบที่ซีดหรือไม่มีรงควัตถุจะสะท้อน (Jensen, , 2007) ดังจะเห็นได้จากข้าวที่ได้รับผลกระทบจากก๊าซโอโซน ค่าการสะท้อนพลังงานจะสูงกว่ากรรมวิธีควบคุม และเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้น ปริมาณน้ำในใบก็จะลดลง ส่งผลทำให้ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นนี้จะลดลงตามไปด้วย (Leinenkugel et al., 2013; Guan et al., 2016) ดังจะเห็นได้จากค่าการสะท้อนแสงช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ที่สูงกว่าช่วงการเจริญเติบโตทางเมล็ด

3. ช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (Shortwave Infrared: 1350-2500 nm) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ทั้ง 3 ชุดการทดลอง ค่าการสะท้อนพลังงานจะแปรผกผันกับปริมาณน้ำทั้งหมดในใบข้าว ซึ่งอิทธิพลของน้ำในใบข้าวจะดูดกลืนพลังงานเอาไว้ในช่วงคลื่น 1400 nm, 1900 nm และ 2400 nm ความยาวคลื่นช่วงนี้เรียกว่า Water absorption bands ในขณะที่ช่วงคลื่น 1600 nm และ 2200 nm ข้าวจะสะท้อนพลังงานสูงที่สุด โดยจะผกผันกับปริมาณน้ำในใบ ยิ่งข้าวอายุมากขึ้น ปริมาณน้ำในใบจะลดลง ส่งผลทำให้ค่าการสะท้อนพลังงานสูงขึ้น ยกเว้น ช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้นและการสืบพันธุ์ ที่มีค่าการสะท้อนผิดไปจากที่กล่าว เพราะในช่วงการเก็บข้อมูล ลักษณะทรงพุ่มของข้าวยังไม่ปกคลุมผิวน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boschetti et al. (2014) ที่ศึกษาเปรียบเทียบดัชนีความแตกต่างของสเปกตรัลแบบนอร์มอลไลซ์ (Normalised difference spectral index: NDSIs) จากข้อมูล MODIS ในการตรวจวัดพื้นผิวน้ำของระบบนิเวศนาข้าวที่มีน้ำขังระดับต่างๆ พบว่า ที่ระดับน้ำขังนาข้าว 10 เซนติเมตร ให้ค่าการสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่น SWIR (1450-1700 nm และ 2000-2200 nm) มากกว่ากรณี ระดับน้ำ 5 เซนติเมตร และไม่มีน้ำขัง

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาลักษณะลายเซ็นเชิงคลื่น (spectral signature curve) ของข้าวเจ้าพันธุ์ กข43 ที่ได้รับผลกระทบจากก๊าซโอโซน ในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต พบว่า เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลแบบไฮเปอร์สเปกตรัลภาคพื้นดินสามารถแยกข้าวที่ได้รับและไม่ได้รับก๊าซโอโซน ได้ในช่วงการเจริญเติบโตทางการสืบพันธุ์ ซึ่งเป็นช่วงที่ข้าวเจริญเติบโตสูงสุด และมีความอ่อนไหวต่อก๊าซโอโซน ดังค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ และช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น แต่ทั้งนี้ยังไม่สามารถจำแนกความแตกต่างระหว่างข้าวที่ได้รับก๊าซโอโซนความเข้มข้น 40 ppb และ 80 ppb ได้ จึงจำเป็นต้องหาวิธีในการคัดเลือกช่วงคลื่นและดัชนีพืชพรรณที่เหมาะสม โดยเฉพาะดัชนีพืชพรรณที่มีความไวต่อการตอบสนองความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ เพื่อให้สามารถยืนยันผลการศึกษาในครั้งนี้ควรมีการทดลองในหลายช่วงฤดูกาลเพาะปลูก และขยายผลการศึกษาไปยังแปลงเกษตรกร รวมทั้งควรมีการศึกษาร่วมกับปัจจัยทางด้านชีวเคมีของข้าวควบคู่ไปด้วย เช่น ปริมาณคลอโรฟิลล์ การสังเคราะห์แสงของพืช และปริมาณน้ำในใบ เป็นต้น โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสเปกตรัลอ้างอิง (Endmember) ในการประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมทั้งข้อมูลแบบมัลติสเปกตรัลและไฮเปอร์สเปกตรัล หรือใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับการประมวลผลด้วยภาพถ่ายดิจิทัล (Digital image processing) ในการติดตามและเฝ้าระวังผลกระทบจากก๊าซโอโซนต่อข้าว ด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลต่อไป

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ที่ให้ทุนสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ใช้สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ศูนย์วิจัยข้าวชัยนาทที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์ข้าว และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องวัดค่าการสะท้อนแสงแบบไฮเปอร์สเปกตรัลรวมทั้งเจ้าหน้าที่ส่วนสำรวจภาคพื้นดิน

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2562. รายงานสถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียงของประเทศไทย ปี 2562. แหล่งข้อมูล: <http://air4thai.pcd.go.th/webv2/download.php>. ค้นเมื่อ 14 สิงหาคม 2563.
- จรินทร์ บุญญาภาพ. 2557. หลักการรับรู้จากระยะไกลด้านนิเวศวิทยาพืชพรรณและการอนุรักษ์. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์. กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยข้าว. 2548. การใช้แผ่นเทียบสี (Leaf Color Chart) เพื่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนในการปลูกข้าวนาชลประทาน. แหล่งข้อมูล: http://www.brrd.in.th/rkb/content/manual/E-book/Eb_015.pdf. ค้นเมื่อ 23 มกราคม 2561.
- Akhtar, N., M. Yamaguchi, H. Inada, D. Hoshino, T. Kondo, F.R. Fukami, and T. Izuta. 2010. Effects of ozone on growth, yield and leaf gas exchange rates of four Bangladeshi cultivars of rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*. 158: 2970-2976.
- ASD. 2010. FieldSpec® 3 User Manual. Field Spec Pro spectrometer; Analytical Spectral Devices: Boulder, CO, USA. Available: <http://www.geo-informatie.nl/manuals/600540-JFieldSpec3User Manual.pdf>. Accessed Mar.14, 2020.
- Boschetti M., F. Nutini, G. Manfron, P.A. Brivio, and A. Nelson. 2014. Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from MODIS for detecting surface water in flooded rice cropping systems. *PloS One*. 9: e88741.
- Chi, G., B. Huang, Y. Shi, X. Chen, Q. Li, and J. Zhu. 2016. Detecting ozone effects in four wheat cultivars using hyperspectral measurements under fully open-air field conditions. *Remote Sensing of Environment*. 184: 329-336.
- Fiscus E.L., F.L. Booker, and K.O. Burkey. 2005. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant Cell and Environment*. 28: 997-1011.
- Guan, X., C. Huang, G. Liu, X. Meng, and Q. Liu. 2016. Mapping rice cropping systems in vietnam using an NDVI-based time-series similarity measurement based on DTW distance. *Remote Sensing*. 8: 19.
- Jensen, J. R. 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd Edition. Practice Hall. USA.
- Leinenkugel, P., C. Kuenzer, N. Oppelt, and S. Dech. 2013. Characterisation of land surface phenology and land cover based on moderate resolution satellite data in cloud prone areas — A novel product for the Mekong Basin. *Remote Sensing of Environment*. 136: 180-198.
- Meroni, M., C. Panigada, M. Rossini, V. Picchi, S. Cogliati, and R. Colombo. 2009. Using optical remote sensing techniques to track the development of ozone-induced stress. *Environmental Pollution*. 157: 1413-1420.

- Mosleh, M.K., Q.K. Hassan, and E.H. Chowdhury. 2015. Application of remote sensors in mapping rice area and forecasting its production: a review. *Sensors*. 15: 769–791.
- Phothi, R., C. Umponstira, C. Sarin, W. Siriwong, and N. Nabheerong. 2016. Combining effects of ozone and carbon dioxide application on photosynthesis of Thai jasmine rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Khao Dawk Mali 105. *Australian Journal of Crop Science*. 10: 591-597.
- Sanz, J., I. González-Fernández, H. Calvete-Sogo, J.S. Lin, R. Alonso, R. Muntifering, and V. Bermejo. 2014. Ozone and nitrogen effects on yield and nutritive quality of the annual legume *Trifolium cherleri*. *Atmospheric Environment*. 94: 765-772.
- Sarkar, A., and S. Agrawal. 2009. Identification of ozone stress in Indian rice through foliar injury and differential protein profile. *Environmental Monitoring and Assessment*. 161: 205-215.
- Shwetank, K.J., and K.J. Bhatia. 2010. Review of rice crop identification and classification using hyperspectral image processing system. *International Journal of Computer Science & Communication*. 1: 253-258.
- Thenkabail, P.S., I. Mariotto, M.K., Gumma, E.M. Middleton, D.R. Landis, and F.K. Huemmrich. 2013. Selection of hyperspectral narrowbands (HNBS) and composition of hyperspectral two-band vegetation indices (HVIs) for biophysical characterization and discrimination of crop types using field reflectance and Hyperion/EO-1 data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 6: 427–439.