

# การตอบสนองด้านสรีรวิทยาและจัดกลุ่มข้าวหอมพันธุ์ไทย 4 พันธุ์ต่อภาวะเครียดจากความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์

## Physiological Responses and Clustering of Four Aromatic Rice Cultivars to NaCl Salt Stress

ธีระรัตน์ อุบลรัตน์ เกศราภรณ์ จันทร์ประเสริฐ และ วาสิณี พงษ์ประยูร\*

Teerarat U-bonrat, Katsaraporn Janprasert and Wasinee Pongprayoon\*

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

Biology Department, Faculty of Science, Burapha University

Received : 20 April 2017

Accepted : 12 June 2017

Published online : 28 June 2017

### บทคัดย่อ

ดินเค็มเป็นปัญหาที่สำคัญต่อการผลิตข้าว ซึ่งมีรายงานว่าอ่อนแอต่อความเค็ม โดยเฉพาะในระยะต้นกล้า ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ เพื่อศึกษาการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยาต่อภาวะเครียดจากความเค็มในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ สุพรรณบุรี 1 ปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 ต้นกล้าข้าวได้รับภาวะเค็ม 2, 4, 6, 8 หรือ 10 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร ( $\text{dS m}^{-1}$ ) โดยบันทึกค่าการเจริญเติบโต ปริมาณรงควัตถุ ปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ และปริมาณโพสลิ้น หลังได้รับความเครียดที่ระดับความเค็ม 8  $\text{dS m}^{-1}$  เป็นเวลา 14 วัน พบว่า น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น ความยาวใบ และปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ของข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม นอกจากนี้ ข้าว 4 พันธุ์ ถูกจัดจำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ตามข้อมูลด้านการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุ กลุ่มแรก ได้แก่ ข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ ที่ยังคงรักษา ระดับของการเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่กลุ่มที่สอง ได้แก่ ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 มีระดับการเจริญเติบโตลดลง เมื่อพิจารณาในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ที่มีการตอบสนองต่อความเค็มด้วยการสร้างสารโพสลิ้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าข้าวโรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวหอมพันธุ์ทนเค็มโดยผ่านกลไกการสะสมสารโพสลิ้นช่วยปรับค่าแรงดันออสโมติกภายใต้ภาวะเครียดจากความเค็ม

**คำสำคัญ :** ข้าวหอม การตอบสนองด้านสรีรวิทยา ภาวะเครียดจากความเค็ม

\*Corresponding author. E-mail : [wasinee@buu.ac.th](mailto:wasinee@buu.ac.th)

## Abstract

Salt affected soil is a member of abiotic stresses to play as major barrier in rice production, which has been reported as salt susceptible. The objective of this research was to investigate the physiological responses to salt stress in rice cultivars including Riceberry, Suphan Buri 1, Pathum Thani 1 and Khao Dawk Mali 105. Rice seedlings were subjected to NaCl salt stress treatment at 2, 4, 6, 8 or 10 dS m<sup>-1</sup>. Growth parameters, photosynthetic pigment contents, relative water content and free proline content were investigated. After 14 days of NaCl treatment with 8 dSm<sup>-1</sup>, the shoot fresh weight, shoot dry weight, leaf length and relative water content of Riceberry seedlings were enhanced in comparison with the control (without salt stress treatment). Moreover, four rice cultivars were classified into 2 groups based on growth parameters and photosynthetic pigment contents. For the first group, all growth parameters in Riceberry were maintained, while the second group (Suphan Buri 1, Pathum Thani 1 and Khao Dawk Mali 105 cultivars) the growth performances under salt stress conditions were declined. It was noted that only Riceberry had dramatically responded to salt stress by elevating its proline content, suggesting that the Riceberry might be a salt-tolerant rice cultivar via proline accumulation mechanism as an osmoregulation under salt stress.

**Keywords :** Aromatic rice, Physiological response, Salt stress

## บทนำ

ประชากรมากกว่าครึ่งหนึ่งของโลกบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยเฉพาะประชากรในทวีปเอเชียที่บริโภคข้าวคิดเป็น 90 เปอร์เซ็นต์ของประชากรโลก (Hoang *et al.*, 2016) และข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ข้าวมีความอ่อนแอต่อความเค็มมากที่สุดในกลุ่มของธัญพืช ข้าวหลายพันธุ์ทนเค็มได้ที่ระดับความเค็ม 3 เดซิซีเมนต์ต่อเมตร (dS m<sup>-1</sup>) เมื่อค่าระดับความเค็มเท่ากับ 3.5 dS m<sup>-1</sup> ผลผลิตข้าวลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ และถ้าระดับความเค็มที่ 7.2 dS m<sup>-1</sup> ผลผลิตข้าวลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ (Hoang *et al.*, 2016) โดยทั่วไปในดินที่มีระดับความเค็มมากกว่า 4 dS m<sup>-1</sup> จัดได้ว่าเป็นดินเค็ม (Dierickx, 2009) สำหรับในประเทศไทยมีดินเค็มครอบคลุมพื้นที่ 22 ล้านไร่ แบ่งได้เป็นสองพื้นที่ คือ ดินเค็มชายฝั่งทะเลและดินเค็มบนบกหรือดินเค็มในภาคพื้นทวีปหรือดินเค็มนอกพื้นที่ชายฝั่งทะเล โดยเฉพาะดินตามชายฝั่งทะเลที่ใช้ในการปลูกข้าวกระจายอยู่ตามลุ่มแม่น้ำและสันดอนปากแม่น้ำตลอดชายฝั่งทะเลของประเทศไทย ครอบคลุมพื้นที่ 4 ล้านไร่ (Bureau of Rice Research and Development, 2009) ที่ผ่านมานักวิจัยในประเทศไทยได้มีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโดยการคัดเลือกตามธรรมชาติตามบริเวณพื้นที่ดินเค็ม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองและใช้บริโภคภายในครัวเรือนตลอดจนมีคัดเลือกสายพันธุ์บริสุทธิ์ (pure line selection) จากพันธุ์พื้นเมืองจนได้ข้าวพันธุ์ทนเค็มเพื่อใช้แนะนำเกษตรกรสำหรับปลูกในพื้นที่ดินเค็มชายฝั่งทะเลตะวันออก ได้แก่ ข้าวตาคู ข้าวตาแห้ง ข้าวดอกมะลิ 105 ข้าวปากหม้อ 148 และข้าวหน้าร้อย ซึ่งให้ผลผลิตและคุณภาพของเมล็ดดี ในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโดยใช้เชื้อพันธุ์จากต่างประเทศมาผสมกับข้าวพื้นเมืองของไทยได้ข้าวพันธุ์ที่ทนเค็มให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์ดั้งเดิม (Bureau of Rice Research and Development, 2009) อย่างไรก็ตาม การคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนเค็มเพื่อให้ได้ผลผลิตสูงนั้น พบว่าคุณภาพการหุงต้มต่ำ ข้าวมีลักษณะแข็ง และไม่ม่กลิ่นหอม

พื้นดินทั่วโลกมากกว่า 830 ล้านเฮกตาร์เป็นพื้นที่ดินเค็มและเพิ่มมากขึ้นทุกปี (Hoang *et al.*, 2016) ความเค็มส่งผลต่อพืชทั้งในระดับเซลล์ การเติบโต และปริมาณผลผลิต (Bray, 1993) เนื่องจากพืชเกิดอาการขาดน้ำ การดึงน้ำที่มีอยู่ในดินเข้าสู่ต้นพืชต้องอาศัยความแตกต่างของศักย์ของน้ำระหว่างดินและพืชเป็นหลัก ในภาวะเค็มค่าศักย์ของน้ำในดินลดลงมากทำให้พืชดูดน้ำไปใช้ได้น้อยลงการเติบโตของพืชจึงลดลง (Nguyen *et al.*, 1997; Meloni *et al.*, 2001) มีการศึกษาผลของความเค็มต่อการเติบโตของพืชหลายชนิด เช่น ข้าวโพด (*Zea mays* L.) ข้าวฟ่าง (*Sorghum bicolor* L.) ข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L.) (Maas *et al.*, 1986) เมล่อน (*Cucumis melo* L.) (Botia *et al.*, 2005) ผักปวยเล้งนิวกินีแลนด์ (*Tetragonia tetragonioides* Pall) ผักสลัดเรดโอ๊ค (*Atriplex hortensis* L.) (Wilson *et al.*, 2000) และถั่วลันเตา (*Pisum sativum* L.) (Maas & Poss, 1989) พบว่าการขยายขนาดของใบ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต้นและรากลดลง โดยเฉพาะการศึกษาความเค็มต่อการเติบโตของข้าวในระยะที่เป็นต้นกล้า ส่งผลให้อัตราการเติบโตของเมล็ดข้าว น้ำหนักสด น้ำหนักแห้งของต้นและราก จำนวนใบ จำนวนกอ จำนวนรวง น้ำหนักเมล็ด พื้นที่ใบ ความหนาแน่นของปากใบ และปริมาณน้ำในใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Amirjani, 2010 ; Lee *et al.*, 2011) นอกจากนี้ ความเค็มมีผลต่อกระบวนการต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) พบว่าพืชที่ได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าพืชในภาวะปกติ (Parida & Das, 2005; Chaves *et al.*, 2009) และในใบพืชมีปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงเมื่อได้รับภาวะเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) พืชมีกลไกในการตอบสนองต่อภาวะเครียดจากความเค็ม เพื่อให้คงรักษาสภาพและหน้าที่ของระบบต่างๆ โดยการสะสมสารออสโมไลต์ (osmolytes) เพื่อปรับค่าศักย์ของน้ำภายในเซลล์ ทำให้ยังคงสามารถดูดน้ำมาใช้ในการดำรงชีวิตได้ (Taiz & Zeiger, 2006) ออสโมไลต์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กไม่รบกวนปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเซลล์ช่วยรักษาสภาพโปรตีนและโครงสร้างของเซลล์และไม่เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์พืช เช่น ซอร์บิทอล (sorbitol) (Ahmad *et al.*, 1979) แมนนิทอล (mannitol) (Tarczynski *et al.*, 1993) และกรดอะมิโน เช่น โพรลีน (proline) (Greenway & Munns, 1980; Lutts *et al.*, 1996a; Iyer & Caplan, 1998; Lutts *et al.*, 1999), ไกลซีนบีเทน (glycine betaine) (Sakamoto & Murata, 2002) และพูเทรสซีน (putrescine) (Chen & Kao, 1993) การสะสมโพรลีนได้รับการยอมรับว่ามีความสำคัญในการปรับตัวของพืชเมื่อได้รับความเครียดที่เกิดจากความเค็มและแล้ง (Strizhov *et al.*, 1997) โดยการปรับค่าแรงดันออสโมติก (osmotic adjustment) และปริมาณไอออน (Lutts *et al.*, 1996b) พบข้าวพันธุ์ที่ไม่ทนเค็มมีการสะสมโพรลีนสูงกว่าข้าวพันธุ์ทนเค็มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Lutts *et al.*, 1996a) และเมื่อข้าวได้รับความเค็มส่งผลให้มีการสะสมโพรลีนเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของเกลือที่เพิ่มสูงขึ้น (Pongprayoon *et al.*, 2008)

ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้มีเป้าหมายในการศึกษาทางด้านสรีรวิทยาของข้าวหอมที่ได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ โดยวัดข้อมูลการเจริญเติบโต ปริมาณของรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ ปริมาณการสร้างสารเพื่อรักษาสมดุลของไอออน เช่น โพรลีน ตลอดจนการจัดกลุ่มข้าวเมื่อได้รับภาวะความเค็ม ซึ่งผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีความสามารถในการทนต่อภาวะเครียดที่เกิดจากความเค็มและเป็นแนวทางในการคัดเลือกข้าวหอมไทยพันธุ์อื่นที่มีศักยภาพในการทนเค็ม ตลอดจนส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกในพื้นที่กำลังประสบปัญหาจากภาวะความเค็มต่อไป

## วิธีดำเนินการวิจัย

### พืชที่ใช้ทดลองและการเพาะเลี้ยง

เมล็ดข้าว (*Oryza sativa* L.) จำนวน 4 พันธุ์ ได้แก่ ไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry), สุพรรณบุรี 1 (Suphan Buri 1) ปทุมธานี 1 (Pathum Thani 1) และ ขาวดอกมะลิ 105 (Khao Dawk Mali 105) แช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำไปหว่านบนทราย เพาะเลี้ยงเป็นเวลา 14 วัน โดยเพาะเลี้ยงในโรงเรือนที่มีความเข้มแสงโดยเฉลี่ยเท่ากับ  $23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  และอุณหภูมิโดยเฉลี่ย  $37^\circ\text{C}$  คัดเลือกต้นที่มีขนาดเท่ากัน เพื่อย้ายปลูกลงในขวดแก้วที่มีสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 (pH 7.0) (Vajrabhaya & Vajrabhaya, 1991) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ควบคุมระดับของสารละลายธาตุอาหาร โดยการเติมน้ำให้ระดับสารละลายเท่ากับตอนเริ่มต้นการทดลองทุกวัน และเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารทุกสัปดาห์ เมื่อต้นกล้าข้าวอายุ 30 วัน ย้ายลงในขวดแก้วที่มีชุดการทดลองและวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical conductivity; EC) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชุดการทดลองและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย (Electrical conductivity; EC)

Treatments	EC (dS m <sup>-1</sup> )
ชุดการทดลองที่ 1 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 ที่ไม่มีเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0 มิลลิโมลาร์ เป็นชุดควบคุม	2
ชุดการทดลองที่ 2 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 ร่วมกับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 17 มิลลิโมลาร์	4
ชุดการทดลองที่ 3 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 ร่วมกับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 34 มิลลิโมลาร์	6
ชุดการทดลองที่ 4 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 ร่วมกับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 51 มิลลิโมลาร์	8
ชุดการทดลองที่ 5 ต้นข้าวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารสูตรดัดแปลง WP No.2 ร่วมกับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 68 มิลลิโมลาร์	10

การวางแผนการทดลอง การเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) เก็บตัวอย่างข้าวจำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 4 ต้น เพื่อศึกษาผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักแห้งราก (root dry weight; RDW) น้ำหนักสดราก (root fresh weight; RFW) ความยาวใบ (leaf length) ความยาวราก (root length) ความสูงต้น (shoot height) น้ำหนักสดต้น (shoot fresh weight; SFW) น้ำหนักแห้งต้น (shoot dry weight; SDW) ความกว้างใบ (leaf width) โดยวัดจากใบแท้ที่อายุน้อยที่สุดและเจริญเต็มที่ จำนวนใบต่อต้น (leaf/plant) และปริมาณรงควัตถุ เมื่อได้รับเกลือที่มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8 หรือ 10 dS m<sup>-1</sup> เป็นเวลา 14 วัน และวิเคราะห์ปริมาณโพสลิ้น หลังจากได้รับเกลือความเข้มข้น 4 dS m<sup>-1</sup> เป็นเวลา 21 วัน โดยแสดงข้อมูลการเจริญเติบโต ปริมาณรงควัตถุ และปริมาณโพสลิ้น เป็นเปอร์เซ็นต์ที่เปลี่ยนแปลงเปรียบเทียบกับวันที่เริ่มต้นในการเก็บผลทดลอง (วันที่ 0) ของข้าวแต่ละพันธุ์ โดยใช้สูตร ดังนี้

$$\text{ค่าที่เปลี่ยนแปลงไป (เปอร์เซ็นต์)} = \left[ \frac{\text{ค่าที่ได้จากการเก็บผลการทดลอง}}{\text{ค่าที่ได้จากการเก็บผลการทดลองในวันเริ่มต้น}} \right] \times 100 \quad (1)$$

เนื่องจากข้าวแต่ละพันธุ์มีการเจริญเติบโตในวันเริ่มต้นการทดลองที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าที่คำนวณได้เท่ากับ 100 หมายความว่า มีค่าเท่ากับวันที่เริ่มต้นการทดลอง และค่าที่คำนวณได้มากกว่าหรือน้อยกว่า 100 หมายความว่า มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง จากวันที่เริ่มต้นการทดลอง

การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ศึกษาในข้าวแต่ละพันธุ์ที่ได้ โดยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ( $p < 0.05$ )

*การหาค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (relative water content)*

ค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (relative water content) คือการตรวจวัดสถานะของน้ำในใบข้าวคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ (โดยน้ำหนักที่ได้จากเครื่องชั่งสารทศนิยม 4 ตำแหน่งของหน่วยกรัม) เปรียบเทียบกับใบที่อิมด้วยน้ำ ตามวิธีของ Schonfeld *et al.* (1988) โดยใช้สูตร ดังนี้

$$RWC \text{ (เปอร์เซ็นต์)} = [(FW-DW) / (TW-DW)] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ FW คือ น้ำหนักสดของใบที่ต้องการวัด

DW คือ น้ำหนักแห้งของใบ

TW คือ น้ำหนักของใบเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ

*การหาปริมาณของคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ ด้วยวิธีของ Lichtenthaler (1987) และ Shabala et al. (1998)*

ซึ่งใบข้าวน้ำหนัก 100 มิลลิกรัม ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ในหลอดทดลอง เติมนอะซิโตน จำนวน 5 มิลลิลิตร หุ้มด้วยกระดาษฟอยด์ เก็บไว้ในตู้เย็น 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง กรองสารละลายที่สกัดได้ด้วยกระดาษกรองวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ และคลอโรฟิลล์ บี ที่ความยาวคลื่น 662 และ 644 นาโนเมตร และปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้อะซิโตนความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์ เป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) และหาปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ ดังสมการ

$$[\text{คลอโรฟิลล์ เอ}] = 9.784 D_{662} - 0.99 D_{644} \quad (3)$$

$$[\text{คลอโรฟิลล์ บี}] = 21.42 D_{664} - 4.65 D_{662} \quad (4)$$

$$[\text{แคโรทีนอยด์}] = (1000 D_{470} - 1.90[\text{คลอโรฟิลล์ เอ}] - 63.14[\text{คลอโรฟิลล์ บี}]) / 214 \quad (5)$$

เมื่อ  $D_i$  คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น  $i$

*การวิเคราะห์หาปริมาณโพรลีน (proline content) ด้วยวิธีของ Bates et al. (1973)*

ซึ่งใบข้าว น้ำหนัก 500 มิลลิกรัม บดให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลว ผสมกับสารละลายซัลโฟซาลิซิลิก ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1 มิลลิลิตร กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 นำส่วนใสที่ได้ ปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายผสมระหว่างนินไฮดริน (ninhydrin) และสารละลายผสมระหว่างกรดอะซิติกเข้มข้นกับกรดฟอสฟอริก (ninhydrin 1.25 มิลลิกรัมในกรดอะซิติก 30 มิลลิลิตร และ  $H_3PO_4$  ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร) ในปริมาตรที่เท่ากัน ต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมงและหยุดปฏิกิริยาในน้ำแข็ง เติมนิโกลีน ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนเกิดการแยกชั้น นำสารในชั้นนิโกลีน มาวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่ 520 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) โดยใช้นิโกลีนเป็นตัวเปรียบเทียบ (blank) เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน (standard curve) ของโพรลีน

การจัดจำแนกกลุ่มข้าวด้วยการใช้ค่าทางสรีรวิทยาเมื่อได้รับความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์

แผนภาพความร้อน (heat map) ได้จากการวิเคราะห์ hierarchical clustering analysis ด้วยโปรแกรม MultiExperiment Viewer (MEV) (Saeed *et al.*, 2003; Maksup *et al.*, 2014; Kurotani *et al.*, 2015) โดยการเปรียบเทียบข้าวแต่ละพันธุ์ที่ได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  กับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับเกลือ ( $2 \text{ dS m}^{-1}$ ) ที่ระยะเวลา 14 วัน โดยใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ที่เปลี่ยนแปลงไป (เปอร์เซ็นต์) มาจัดจำแนก ได้แก่ น้ำหนักแห้งราก (RDW) น้ำหนักสดราก (RFW) ความยาวใบ (leaf length) ความยาวราก (root length) ความสูงต้น (shoot height) น้ำหนักสดต้น (SFW) น้ำหนักแห้งต้น (SDW) ความกว้างใบ (leaf width) จำนวนใบต่อต้น (leaf/plant) ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (Chl a) คลอโรฟิลล์ บี (Chl b) และแคโรทีนอยด์ (carotenoid)

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ผลของความเค็มต่อการเติบโตของข้าวแต่ละสายพันธุ์

จากการทดลองพบว่าน้ำหนักสดต้นของข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  เป็นเวลา 14 วัน มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสดต้น 2.3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ ในขณะที่ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีน้ำหนักสดต้นลดลงเป็น 2.0 เท่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และไม่พบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสดต้นในข้าวปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 (ภาพที่ 1A) ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ มีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้นมากกว่าชุดควบคุม 1.8 เท่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อได้รับเกลือความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  ในขณะที่ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 มีน้ำหนักแห้งต้นลดลงที่ 1.8 และ 1.3 เท่า ตามลำดับ เมื่อได้รับเกลือตั้งแต่ความเข้มข้น  $6 \text{ dS m}^{-1}$  ส่วนข้าวปทุมธานี 1 มีการลดลงของน้ำหนักแห้งต้นประมาณ 1.3-2.0 เท่า เมื่อได้รับเกลือที่ความเข้มข้น  $4 \text{ dS m}^{-1}$  ถึง  $8 \text{ dS m}^{-1}$  (ภาพที่ 1B) มีการเพิ่มขึ้นของความยาวใบ 1.3 เท่า ในข้าวไรซ์เบอร์รี่ ที่ได้รับเกลือความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับเกลือ ซึ่งผลตรงกันข้ามกับข้าวข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีความยาวใบน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความยาวใบในข้าวปทุมธานี 1 (ภาพที่ 1C) นอกจากนี้ ข้าวปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (relative water content) เมื่อได้รับเกลือทุกระดับความเข้มข้นเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ แต่ในข้าวไรซ์เบอร์รี่ มีการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (relative water content) เป็น 2.0 เท่า เมื่อได้รับเกลือที่ความเข้มข้น 6, 8 หรือ  $10 \text{ dS m}^{-1}$  เปรียบเทียบกับชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งผลตรงกันข้ามกับข้าวสุพรรณบุรี 1 ที่มีค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (relative water content) ลดลงที่ 1.6 เท่า อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 1D) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ สามารถเจริญเติบโตได้แม้ได้รับเกลือความเข้มข้นสูงที่  $8 \text{ dS m}^{-1}$  โดยมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น ความยาวใบและค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์

ผลการจัดจำแนกกลุ่มข้าวด้วยการใช้ข้อมูลทางสรีรวิทยาเมื่อได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์

แผนภาพความร้อน (heat map) ที่ได้จากการวิเคราะห์ hierarchical clustering analysis ด้วยโปรแกรม MEV โดยการเปรียบเทียบข้าวที่ได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่ระดับความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  กับภาวะที่ไม่ได้รับเกลือ ( $2 \text{ dS m}^{-1}$ ) ที่ระยะเวลา 14 วัน พบว่า ข้าวจำนวน 4 พันธุ์ ถูกจัดจำแนกออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวกลุ่ม I ข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ ที่มีระดับการแสดงออกของทุกข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุสูง ยกเว้นน้ำหนักแห้งราก จัดได้ว่าเป็นข้าวที่ทนเค็มได้ดีที่สุด และข้าวกลุ่ม II ได้แก่ ข้าวพันธุ์ปทุมธานี 1 สุพรรณบุรี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 ที่มีระดับการ

แสดงออกของข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุทั้งสูงและต่ำ จัดได้ว่าเป็นข้าวที่ไม่ทนเค็ม โดยเฉพาะข้าวสุพรรณบุรี 1 ที่มีการแสดงออกต่ำ (ภาพที่ 2) โดยที่ระดับความเค็ม  $8 \text{ dS m}^{-1}$  จัดอยู่ในภาวะเค็มมาก มีเฉพาะพืชทนเค็มเท่านั้นที่สามารถเจริญเติบโตได้ (Dierickx, 2009) ซึ่งที่ความเค็มระดับนี้ ระยะเวลา 18 วัน ข้าวพันธุ์พ็อคคาลี (Pokkali) ซึ่งเป็นพันธุ์ตรวจมาตรฐานทนเค็ม มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด ( $A_{\text{max}}$ ) และมีค่าคะแนนความเสียหายของต้นข้าวจากเกลือต่ำที่สุด (Chutimanukul *et al.*, 2013) มีการใช้ค่า chlorophyll degradation เพื่อจัดกลุ่มข้าวหอมไทยจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ หอมจันทร์ ขาวดอกมะลิ 105 และปทุมธานี 1 พบว่า ข้าวพันธุ์หอมจันทร์ เป็นพันธุ์ที่ทนเค็ม ในขณะที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และปทุมธานี 1 เป็นข้าวพันธุ์ที่ไม่ทนเค็ม เมื่อได้รับเกลือที่ความเข้มข้น 427 มิลลิโมลาร์ (ภาวะเค็มจัดมาก) (Cha-um *et al.*, 2007) นอกจากนี้ การศึกษาภาวะเค็มในข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ พบว่ามีการสร้างสารฟีนอลิกและแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นหลังจากที่ได้รับเกลือความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์ เปรียบเทียบกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ที่ไม่ทนเค็ม แต่มีการสร้างสารนี้จำนวนมาก เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพืชที่ไม่ทนเค็มเมื่อได้รับภาวะเครียดจากความเค็มโดยทำงานผ่านระบบ antioxidant (Daiponmak *et al.*, 2010)

ทั้งนี้ ภายใต้ภาวะเค็มจากเกลือส่งผลให้ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 มีการแสดงออกของข้อมูลการเจริญเติบโตต่ำ โดยเฉพาะน้ำหนักสด น้ำหนักแห้งต้น ความยาวใบ และค่าปริมาณน้ำในใบสัมพันธ์ (ภาพที่ 1) ซึ่งตรงข้ามกับข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ มีการแสดงออกของข้อมูลการเจริญเติบโตสูง เมื่อได้รับความเค็มที่ความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  ระยะเวลา 14 วัน จัดจำแนกข้าวได้เป็น 2 กลุ่ม โดยไรซ์เบอร์รี่เป็นข้าวพันธุ์ที่ทนเค็ม และข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่ไม่ทนเค็ม (ภาพที่ 2) ซึ่งภาวะเค็มมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Takemura *et al.*, 2000) โดยที่พืชมีการตอบสนองต่อความเค็มโดยลดการขยายขนาดของใบรวมทั้งการลดลงของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต้น โดยที่ต้นข้าวระยะต้นกล้า (seedling) มีน้ำหนักสดต้นลดลงมากเมื่อให้เกลือโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 171 มิลลิโมลาร์ (Sultana *et al.*, 1999) นอกจากนี้ การจำกัดพื้นที่ใบไม่ว่าจะเป็นความยาวหรือความกว้างใบ เป็นกลไกแรกที่พืชตอบสนองเมื่อพืชอยู่ภายใต้ความเครียดจากแรงดันออสโมติก (osmotic stress) เมื่อปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อพืชลดลง เซลล์จะหดตัวและผนังเซลล์คลายตัว ทำให้ปริมาตรของเซลล์ลดลงและเซลล์สูญเสียความเต่ง เมื่อเซลล์สูญเสียน้ำมากขึ้นและเซลล์หดตัวมากขึ้น สารละลายในเซลล์จะเข้มข้นขึ้น เยื่อหุ้มเซลล์จะหนาแน่นขึ้นและแน่นขึ้นเนื่องจากเซลล์มีพื้นที่ผิวลดลงกว่าเดิม การขยายของเซลล์เป็นกระบวนการที่ใช้ความเต่งเป็นแรงผลักดัน จึงเป็นกระบวนการที่ไวมากที่สุด

ความเค็มมีผลต่อกระบวนการต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) จากแผนภาพความร้อน (heat map) ที่ได้จากการวิเคราะห์ hierarchical clustering analysis ในข้าวปทุมธานี 1 และสุพรรณบุรี 1 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี และแคโรทีนอยด์ต่ำ เมื่อได้เกลือที่ความเข้มข้น  $8 \text{ dS m}^{-1}$  (ภาพที่ 2) ทั้งนี้พืชที่อยู่ในภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ มีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่ำกว่าพืชในภาวะปกติ เนื่องจากเกิด oxidative stress (Parida & Das, 2005; Chaves, 2009) ทำให้ใบพืชมีปริมาณของคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์ลดลงเมื่อได้รับความเค็ม (Kennedy & De Fillippis, 1999) ผลกระทบของความเค็มเห็นได้จากพืชที่มีลักษณะอ่อนแอต่อภาวะเค็ม (glycophyte หรือ non-halophytes) เช่น ข้าว (*O. sativa* L.) แถนตะวัน (*Helianthus tuberosus*) และข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) พบว่า พืชมีอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะปกติ (Zheng *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2012) พืชมีกลไกลดการสูญเสียน้ำโดยการควบคุมการเปิดและปิดของปากใบ เมื่อต้นพืชขาดน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงทางเมตาบอลิซึมที่ทำให้ปากใบปิด โดยการลดลงของสารที่เป็นตัวถูกละลายในเซลล์คุมทำให้เซลล์สูญเสียน้ำและความเต่งลดลง ปากใบจึงปิด จากรายงานของ Amirjani (2010) ศึกษาในข้าวพันธุ์ Tarom Azmoon เมื่อได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์ ตั้งแต่ 0 ถึง 171 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ความเค็มส่งผลให้

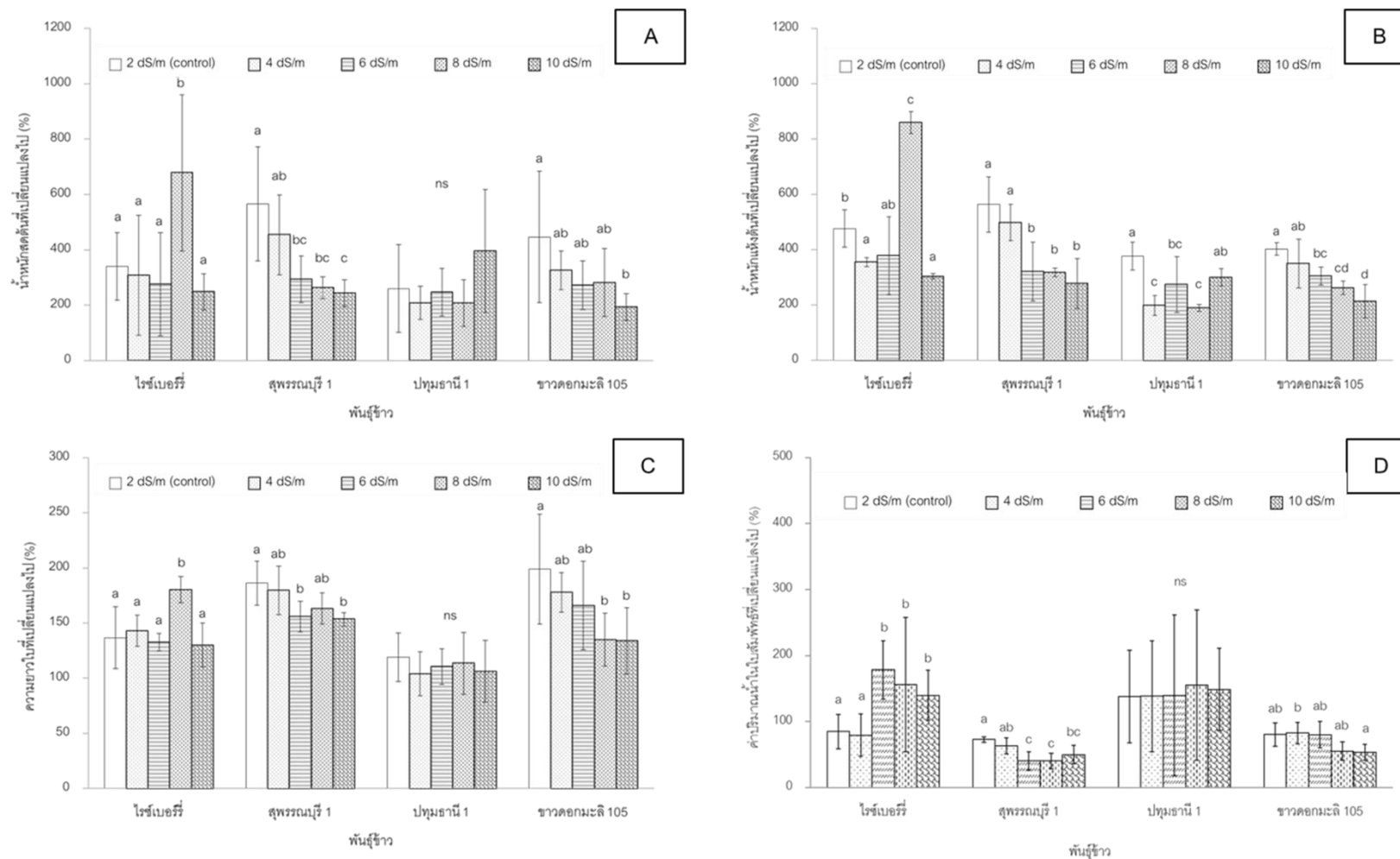
ข้าวพันธุ์นี้มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งต้นลดลง เนื่องจากการปิดของปากใบ ทำให้พืชได้รับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และภาวะเค็มยังส่งผลต่อปริมาณน้ำในใบ ค่าแรงดันออสโมติก ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงอีกด้วย นอกจากนี้ การจัดจำแนกกลุ่มข้าวด้วยการใช้ข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุเมื่อได้รับความเค็ม ด้วยการทำ hierarchical clustering analysis สามารถนำมาจัดจำแนกกลุ่มข้าวตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและชีวเคมีภายใต้ภาวะความเค็มได้ ตัวอย่างเช่น มีการใช้ FactoMineR จากโปรแกรม R package (Factor analysis and data mining) เพื่อจัดจำแนกข้าว 12 พันธุ์ ออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ทนเค็มมาก (salt-tolerance) ปานกลาง (moderately tolerance) อ่อนแอ (salt-sensitive rice) และอ่อนแอต่อภาวะเค็มมาก (highly salt-sensitive rice) (Chunthaburee *et al.*, 2016) มีการใช้โปรแกรม MEV เพื่อจัดทำแผนภาพความร้อน (heat map) ของยีนที่มีการแสดงออกเมื่อได้รับภาวะเครียดจากความเค็ม ความร้อน การเปลี่ยนแปลงจากแรงดันออสโมติกและนำมาจัดจำแนกกลุ่มข้าว ได้เป็น 4 กลุ่มตามระดับความทน (Kurotani *et al.*, 2015) และมีการนำโปรแกรม MEV เพื่อมาจัดจำแนกกลุ่มโปรตีนที่มีการแสดงออกเพิ่มมากขึ้นในข้าว 3 พันธุ์ หลังจากที่ได้รับภาวะเครียดเป็นเวลา 0, 48 และ 96 ชั่วโมง (Maksup *et al.*, 2014)

#### ผลของความเค็มต่อการสะสมโพสลินในข้าว

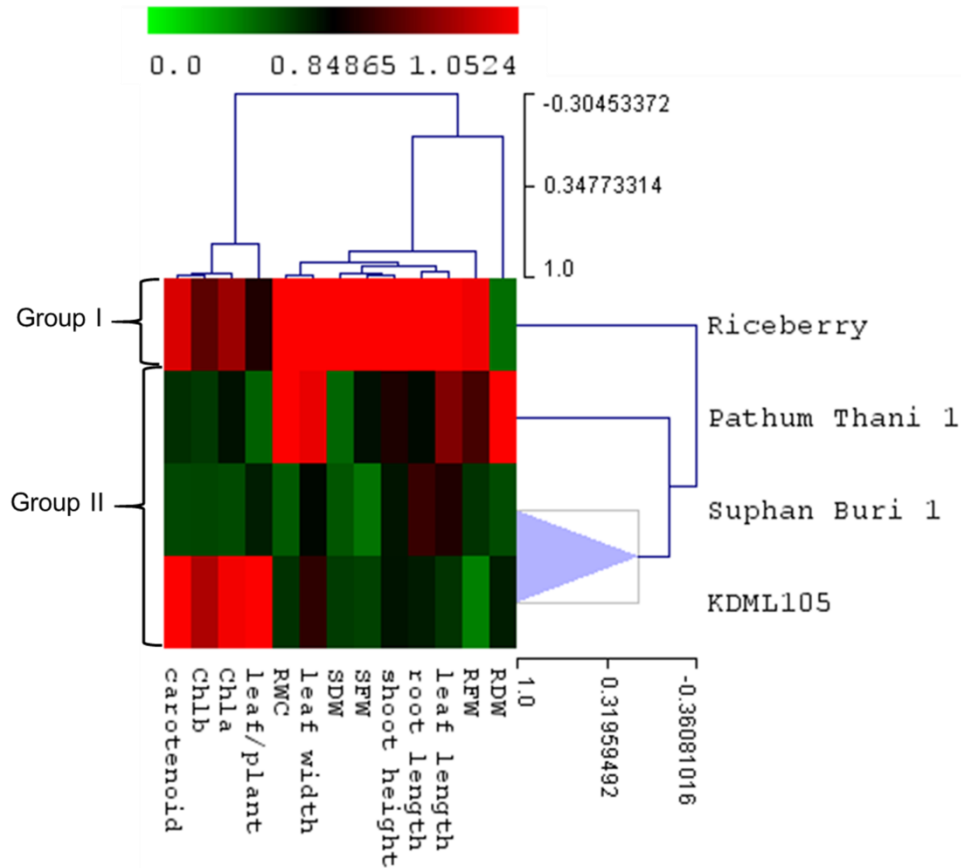
เพื่อศึกษาการตอบสนองของข้าวต่อการสะสมโพสลินโดยเก็บผลทดลองในวันที่ 21 หลังจากที่ได้รับเกลือความเข้มข้น  $4 \text{ dSm}^{-1}$  พบว่า ข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ที่ได้รับเกลือโซเดียมคลอไรด์มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพสลิน 5 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีเกลือ แต่ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโพสลินในข้าวพันธุ์อื่นๆ (ภาพที่ 3) ทั้งนี้ พืชหลายชนิดมีความสามารถในการสะสมตัวถูกละลายเพื่อปรับค่าศักย์ของน้ำในพืชให้ต่ำลงโดยไม่ทำให้ความเต่งของเซลล์ลดลง ซึ่งวิธีการนี้ เรียกว่า การปรับศักย์ของน้ำโดยการสะสมตัวถูกละลาย (osmotic adjustment) การสะสมโพสลินเป็นกระบวนการที่ได้รับการยอมรับว่ามีความสำคัญในการปรับตัวของพืชเมื่อได้รับความเครียดที่เกิดจากความเค็มและแล้ง (Strizhov *et al.*, 1997) จากผลการทดลอง ข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ มีปริมาณโพสลินเพิ่มสูงขึ้น เป็นไปได้ว่าการสร้างหรือสะสมโพสลินที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการทนต่อภาวะเค็ม โดยเฉพาะข้าวที่ได้รับความเค็มเป็นช่วงระยะเวลา ยาวนาน การสะสมโพสลินในปริมาณมากส่งผลให้ข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ทนต่อภาวะเค็มได้ดีกว่าข้าวพันธุ์อื่นที่ไม่มีการสร้างหรือสะสมโพสลิน ทั้งนี้การสร้างโพสลินขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นและระยะเวลาที่พืชได้รับความเค็มจากเกลือ รวมทั้งชนิดและสายพันธุ์พืช (Pongprayoon *et al.*, 2008) จากผลการทดลอง ปริมาณโพสลินในข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่ที่มากเพียงพอสามารถช่วยปรับค่าศักย์ของน้ำโดยไม่ทำให้ความเต่งของเซลล์ลดลง เห็นได้จากน้ำหนักสดต้น ความยาวใบและค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น แม้ได้รับเกลือความเข้มข้นสูงที่  $8 \text{ dS m}^{-1}$  (ภาพที่ 1A, C และ D) มีรายงานว่าข้าวพันธุ์ทนเค็มมีการสะสมโพสลินสูงขึ้นสัมพันธ์เชิงบวกกับการเพิ่มขึ้นของค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (Chutipaijit *et al.*, 2009) การเพิ่มขึ้นของปริมาณโพสลินช่วยรักษาปริมาณรงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและน้ำหนักแห้งต้น เห็นได้จากผลการทดลอง พบว่า ข้าวพันธุ์โรซ์เบอร์รี่มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี แคโรทีนอยด์ (ภาพที่ 2) และน้ำหนักแห้งต้น (ภาพที่ 1B) ซึ่งมีรายงานว่าปริมาณโพสลินที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณรงควัตถุในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ การเปิดปากใบและอัตราการคายน้ำ โดยที่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งในต้นพืช (Gashaw *et al.*, 2014) และพบว่าทำให้โพสลินจากภายนอก ส่งผลให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี น้ำหนักแห้งต้นและค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ของต้น *Vicia faba* L. (Gadallah, 1999) นอกจากนี้ เมื่อข้าวได้รับความเค็มส่งผลให้มีการสะสมโพสลินเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเข้มข้นของเกลือที่สูงขึ้น จัดแบ่งข้าวหอมพันธุ์ไทยได้เป็น 3 กลุ่มตามระดับการ



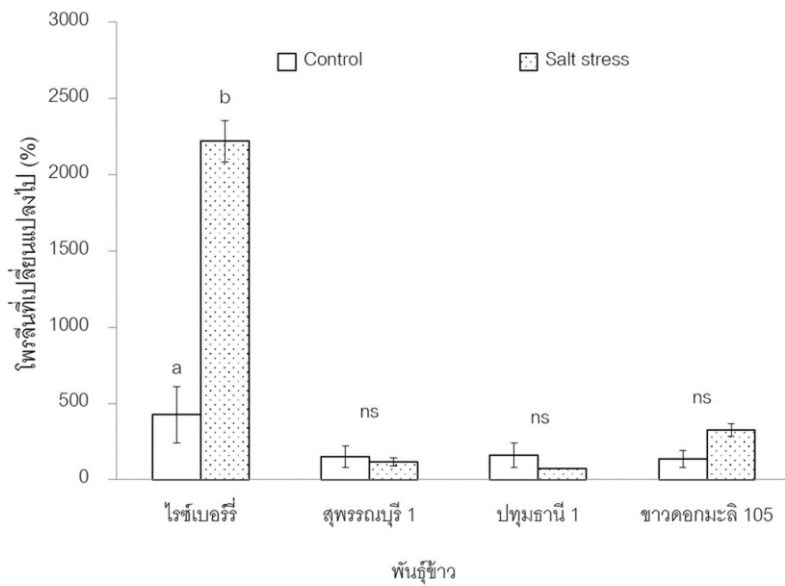
สะสมของปริมาณโพรลิน ได้แก่ กลุ่มที่มีปริมาณโพรลินสูง ปานกลางและต่ำ และพบความสัมพันธ์ระหว่างใบที่มีสีเขียว และปริมาณโพรลินที่สะสม โดยในกลุ่มที่มีการสะสมโพรลินในระดับสูงและปานกลางมีเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใบเขียวสูงกว่าข้าว กลุ่มที่มีการสะสมโพรลินต่ำ (Pongprayoon *et al.*, 2008)



**ภาพที่ 1** น้ำหนักสดต้น (A) และน้ำหนักแห้งต้น (B) ความยาวใบ (C) และค่าปริมาณน้ำในใบสัมพัทธ์ (D) ที่เปลี่ยนแปลงไปในข้าว 4 พันธุ์ เป็นเวลา 14 วัน, ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกัน ค่าที่แสดงอยู่ในรูป mean  $\pm$  standard deviation (SD)



ภาพที่ 2 แผนภาพความร้อน (heat map) ที่ได้จากการวิเคราะห์ Hierarchical clustering analysis ในข้าว 4 พันธุ์ ข้าว กลุ่ม I และ II ที่มีระดับการแสดงออก จาก 0 ถึง 1.0524 แสดงโดยใช้สีเขียวจนถึงสีแดงทางด้านบนของภาพ



ภาพที่ 3 ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่เปลี่ยนแปลงไป (เปอร์เซ็นต์) ในข้าว 4 พันธุ์ เมื่อไม่ได้รับเกลือ (control) หรือได้รับเกลือ โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 dSm<sup>-1</sup> (salt stress) เป็นเวลา 21 วัน, ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกัน

### สรุปผลการวิจัย

ข้าวหอมพันธุ์โรสเบอร์รี่ มีการตอบสนองทางด้านการเจริญเติบโตเพิ่มสูงขึ้นทั้งน้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้น ความยาวใบ และค่าปริมาณน้ำในใบสัมพันธ์ที่ 2.3, 1.8, 1.3 และ 2.0 เท่า ตามลำดับ เมื่อได้รับภาวะเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง 8 dS m<sup>-1</sup> เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้รับเกลือ เป็นเวลา 14 วัน นอกจากนี้ ข้อมูลด้านสรีรวิทยาถูกนำมาใช้เพื่อจัดจำแนกข้าวหอมทั้ง 4 พันธุ์ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม I ข้าวพันธุ์โรสเบอร์รี่ จัดอยู่ในกลุ่มข้าวทนเค็ม มีการแสดงออกของข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุสูง กลุ่ม II ข้าวพันธุ์สุพรรณบุรี 1 ปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 จัดอยู่ในกลุ่มข้าวที่ไม่ทนเค็ม โดยมีการแสดงออกของข้อมูลการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุสูงต่ำ โดยเฉพาะในข้าวสุพรรณบุรี 1 และมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณโพสลิโนในข้าวพันธุ์โรสเบอร์รี่เป็น 5 เท่า เมื่อได้รับความเค็มจากเกลือ ซึ่งให้เห็นว่า ข้าวโรสเบอร์รี่เป็นข้าวหอมพันธุ์ทนเค็มโดยผ่านกลไกการสะสมสารโพสลิโน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทเงินรายได้ เพื่อวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปีงบประมาณ 2558 และประจำปีงบประมาณ 2560 และขอขอบพระคุณ ดร. สุริยันตร์ ฉะอุ่ม ในการแก้ไขเพิ่มเติมบทความวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, I., Larher, F., & Stewart G.R. (1979). Sorbitol, a compatible osmotic solute in *Plantago maritima*. *New Phytologist*, 82, 671-678.
- Amirjani, M.R. (2010). Effect of NaCl on some physiological parameters of rice. *European Journal of Biomedical and Pharmaceutical Sciences*, 3(1), 6-16.
- Bates, L.S., Waldren, R.P., & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207.
- Botia, P., Navarro, J.M., & Cerda A, V.M. (2005). Yield and fruit quality of two melon cultivars irrigated with saline water at different stages of development. *European Journal of Agronomy*, 23, 243-253.
- Bray, E.A. (1993). Molecular responses to water deficit. *Plant Physiology*, 103, 1035-1040. Bureau of Rice Research and Development, Rice Department. (2009). Research salt-tolerant rice in the Central Thailand. Retrieved April 17, 2017, from <http://www.brrd.in.th/library/document/E-book/brrd5201011c1.pdf>, (in Thai).
- Chaves, M.M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103, 551-560.
- Cha-um, S., Vejchasarn, P., & Kirdmanee, C. (2007). An effective defensive response in Thai aromatic rice varieties (*Oryza sativa* L. spp. *indica*) to salinity. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 10(4), 257-264.

- Chen, C.T., & Kao, C.H. (1993). Osmotic stress and water stress have opposite effects on putrescence and proline production in excise rice leaves. *Plant Growth Regulation*, 13, 197-202.
- Chunthaburee, S., Dongsansuk, A., Sanitchon, J., Pattanagul, W., & Theerakulpisut, P. (2016). Physiological and biochemical parameters for evaluation and clustering of rice cultivars differing in salt tolerance at seedling stage. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23, 467-477.
- Chutimanukul, P., Chaidee, A., Buaboocha, T., Siangliw, M., Toojinda, T., Chadchawan, S., & Kositsup, B. (2013). Effect of salt stress on photosynthesis and growth in salt-tolerant rice lines obtained from CSSL population. *Thai Journal of Genetics*, S(1), 276-279, (in Thai).
- Chutippajit, S., Chu-um, S., & Sompornpailin, K. (2009). Differential accumulations of proline and flavonoids in indica rice varieties against salinity. *Pakistan Journal of Botany*, 41(5), 2497-2506.
- Daiponmak, W., Theerakulpisut, P., Thanonkao, P., Vanavichit, A., & Prathepha, P. (2010). Changes of anthocyanin cyanidin-3-glucoside content and antioxidant activity in Thai rice varieties under salinity stress. *ScienceAsia*, 36, 286-291.
- Dierickx, W. R. (2009). The salinity and alkalinity status of arid and semi-arid lands. In Willy H. Verheye (Ed.), *Encyclopedia of Land Use, Land Cover and Soil Sciences - Volume V: Dry Lands and Desertification* (pp. 163-189). United Kingdom: Eoless Publisher.
- Gadallah, M. A. A. (1999). Effects of proline and glycinebetaines on *Vicia faba* responses to salt stress. *Biologia Plantarum*, 42(2), 249-257.
- Gashaw, A., Theerawitaya, C., Samphumphuang, T., Cha-um, S., & Supaibulwatana, K. (2014). CPPU elevates photosynthetic abilities, growth performances and yield traits in salt stressed rice (*Oryza sativa* L. spp. *indica*) via free proline and sugar accumulation. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 108, 27-33.
- Greenway, H., & Munns, R. (1980). Mechanisms of salt tolerance in non-halophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 31, 149-190.
- Hoang, T.M.L., Tran, T. N., Nguyen, T.K.T., Williams, B., & Wurm, P. (2016). Improvement of salinity stress tolerance in rice: Challenges and opportunities. *Agronomy*, 6(4), 54; doi:10.3390/agronomy6040054.
- Huang, Z., Long, X., Wang, L., Kang, J., Zhang, Z., Zed, R., & Liu, Z. (2012). Growth, photosynthesis and H<sup>+</sup>-ATPase activity in two *Jerusalem artichoke* varieties under NaCl induced stress. *Process Biochemistry*, 47, 591-596.
- Iyer, S., & Caplan, A. (1998). Products of proline catabolism can induce osmotically regulated genes in rice. *Plant Physiology*, 116, 203-211.
- Kennedy, B.F., & Fillippis, D.L. (1999). Physiological and oxidative response to NaCl of the salt tolerant *Grevillea ilicifolia* and the salt sensitive *Grevillea arenaria*. *Journal of Plant Physiology*, 155, 746-754.

- Kurotani, K., Yamanaka, K., Toda, Y., Ogawa, D., Tanaka, M., Kozawa, H., & Takeda, S. (2015). Stress tolerance profiling of a collection of extant salt-tolerant rice varieties and transgenic plants overexpressing abiotic stress tolerance genes. *Plant Cell Physiology*, 56(10), 1867-1876.
- Lee, D.G., Park, K.W., An, Y.J., Sohn, Y.G., Ha, J.K., Kim, H.Y., Bae, D.W., Lee, K.H., Kang, N.J., Lee, B.H., Kang, K.Y., & Lee, J.J. (2011). Proteomics analysis of salt-induced leaf proteins in two rice germplasms with different salt sensitivity. *Canadian Journal of Plant Science*, 91, 337-349.
- Li, X., Bua, N., Li, Y., Maa, L., Xin, S., & Zhang, L. (2012). Growth, photosynthesis and antioxidant responses of endophyte infected and non-infected rice under lead stress conditions. *Journal of Hazardous Materials*, 213, 55-61.
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382.
- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1996a). Effect of salt stress on growth, mineral nutrition and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Plant Growth Regulation*, 19, 207-218.
- Lutts, S., Kinet, J.M., & Bouharmont, J. (1996b). NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 78, 389-398.
- Lutts, S., Majerus, V., & Kinet, J.M. (1999). NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Physiologia Plantarum*, 105, 1399-3054.
- Maas, E.V., Poss, J.A., & Hoffman, G.J. (1986). Salinity sensitivity of sorghum at three growth stages. *Irrigation Science*, 7, 1-11.
- Maas, E.V., & Poss, J.A. (1989). Salt sensitivity of cowpea at various growth stages. *Irrigation Science*, 10, 313-320.
- Maksup, S., Roytrakul, S., & Supaibulwatana, K. (2014). Physiological and comparative proteomic analyses of Thai jasmine rice and two check cultivars in response to drought stress. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 43-55.
- Meloni, D.A., Oliva, M.A., Ruiz, H.A., & Martinez, C.A. (2001). Contribution of proline and inorganic solutes to osmotic adjustment in cotton under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 24, 599 - 612.
- Nguyen, H.T., Babu, R.C., & Blum, A. (1997). Breeding for drought resistance in rice: Physiology and molecular genetics considerations. *Crop Science*, 37, 1426-1443.
- Parida, A.K., & Das, A.B. (2005). Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60, 324-349.
- Pongprayoon, W., Chu-um, S., Pichakum, A. & Kirdmanee, C. (2008). Proline profiles in aromatic cultivars photoautotrophically grown in responses to salt stress. *International Journal of Botany*, 4 (3), 276-282.
- Saeed, A.I., Sharov, V., White, J., Li, J., Liang, W., Bhagabati, N., Braisted, J., Klapa, M., Currier, T.,

- Thiagarajan, M., Sturn, A., Snuffin, M., Rezantsev, A., Popov, D., Ryltsov, A., Kostukovich, E., Borisovsky, I., Liu, Z., Vinsavich, A., Trush, V., & Quackenbush, J. (2003). TM4: a free, open-source system for microarray data management and analysis. *Biotechniques*, *34*, 374-378.
- Sakamoto, A., & Murata, N. (2002). The role of glycine betaine in the protection of plants from stress: clues from transgenic plants. *Plant, Cell & Environment*, *25*, 163-171.
- Schonfeld, M.A., Johnson, R.C., Carwer, B.F., & Mornhinweg, D.W. (1988). Water relations in winter wheat as drought resistance indicators. *Crop Science*, *28*, 526-531.
- Shabala, S.N., Shabala, S.I., Martynenko, A.I., Babourina, O., & Newman, I.A. (1998). Salinity effect on bioelectric activity, growth, Na<sup>+</sup> accumulation and chlorophyll fluorescence of maize leaves: a comparative survey and prospects for screening. *Australian Journal of Plant Physiology*, *25*, 609-616.
- Strizhov, N., Ábrahám, E., Ökrész, L., Blickling, S., Zilberstein, A., Schell, J., Koncz, C., & Szabados, L. (1997). Differential expression of two *P5CS* genes controlling proline accumulation during salt-stress requires ABA and is regulated by *ABA1*, *ABI1* and *AXR2* in *Arabidopsis*. *The Plant Journal*, *12*, 557-569.
- Sultana, N., Ikeda T., and Itoh, R. (1999). Effect of NaCl salinity on photosynthesis and dry matter accumulation in developing rice grains. *Environmental and Experimental Botany*, *42*, 211-220.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology* (4<sup>th</sup> ed.). Massachusetts: Sinaure Associate.
- Takemura, T., Hanagata, N., Sugihara, K., Baba, S., Karube, I., & Dubinsky, Z. (2000). Physiological and biochemical responses to salt stress in the mangrove, *Bruguiera gymnorhiza*. *Aquatic Botany*, *68*, 15-28.
- Tarczynski, M.C., Jensen, R.G., & Bohnert, H.J. (1993). Stress protection of transgenic tobacco by production of the osmolyte mannitol. *Science*, *259*, 508-510.
- Vajrabhaya, M., & Vajrabhaya, T. (1991). Somaclonal variation of salt tolerance in rice. In Y.P.S Bajaj (Ed), *Biotechnology in Agriculture and Forestry 14* (pp. 368-382). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wilson, C., Lesch, S.M., & Grieve, C.M. (2000). Growth stage modulates salinity tolerance of New Zealand spinach (*Tetragonia tetragonioides*, Pall) and Red Orach (*Atriplex hortensis* L.). *Annals of Botany*, *85*, 501-509.
- Zheng, C., Jiang, D., Liu, F., Dai, T., Jing, Q., & Cao, W. (2009). Effects of salt and water logging stresses and their combination on leaf photosynthesis, chloroplast ATP synthesis, and antioxidant capacity in wheat. *Plant Science*, *176*, 575-582.