

## ผลกระทบของการขาดน้ำในระยะสืบพันธุ์ต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบข้าวพันธุ์ไทย

### Effect of water deficit at reproductive stage on leaf gas exchange in Thai rice varieties

สุรีพร นันท์ดี<sup>1,2</sup>, โจนาลิซา แอล เซียงหลิว<sup>5</sup>, อนูรูกซ์ อรัญญาศ<sup>3</sup>, อภิชาติ วรณวิจิตร<sup>3,4</sup> และ คัทลียา ฉัตรเที่ยง<sup>1,2,3,4\*</sup>

Sureeporn Nandee<sup>1,2</sup>, Jonaliza L. Siangliw<sup>5</sup>, Anuruck Arunyanark<sup>3</sup>, Apichart Vanavichit<sup>3,4</sup> and Cattleya Chutteang<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup> ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

<sup>2</sup> Center for Agricultural Biotechnology, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

<sup>3</sup> ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กรุงเทพฯ 10900

<sup>4</sup> Center of Excellence on Agricultural Biotechnology: (AG-BIO/MHESI), Bangkok 10900, Thailand

<sup>5</sup> ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตรกำแพงแสน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

<sup>3</sup> Agronomy Department, Faculty of Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

<sup>4</sup> ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

<sup>4</sup> Rice Science Center, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

<sup>5</sup> ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ 113 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย จ.ปทุมธานี 12120

<sup>5</sup> National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani 12120, Thailand

**บทคัดย่อ:** การขาดน้ำส่งผลกระทบต่อสรีรวิทยาและผลผลิตข้าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาผลของการขาดน้ำต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ มวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าวที่ระยะสืบพันธุ์ 2) ประเมินความทนทานต่อการขาดน้ำของข้าวไทย และหา ลักษณะทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการทนแล้งของข้าว วางแผนการทดลองแบบ Split plot in a randomized complete block design กำหนดให้ main-plot คือ การให้น้ำแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ สภาพปกติ, ขาดน้ำปานกลาง และขาดน้ำรุนแรง และ sub plot คือ ข้าว 6 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ105, เจ้าหอมนิล, ไรซ์เบอร์รี่, สีนเหล็ก, IR20 และ DH212 เก็บข้อมูลสถานะของน้ำในดินและน้ำในต้นพืช วัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ น้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิต พบว่าสภาพที่ขาดน้ำทำให้ความชื้นดินและสถานะของน้ำในพืชลดลง ปากใบ ( $g_s$ ) ปิดแคบ ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสงสองในสภาพมีแสง (ΦPSII) และอัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ลดลง ในขณะที่ความเข้มข้น  $CO_2$  ในช่องว่างระหว่างเซลล์ใบ ( $C_i$ ) และอุณหภูมิใบ (Tleaf) สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ ( $P_n$ ) และอัตราการคายน้ำ (E) มีค่าลดลง การขาดน้ำยังทำให้น้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตลดลงในข้าวทุกพันธุ์ โดยเจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่สามารถทนทานต่อการขาดน้ำได้ดีทั้งในสภาพขาดน้ำปานกลางและรุนแรง พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 และสินเหล็กค่อนข้างอ่อนแอต่อการขาดน้ำ และพบว่าผลผลิตแปรผันตามค่า  $P_n$  E และ  $g_s$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์เท่ากับ  $0.82^{**}$ ,  $0.83^{**}$  และ  $0.84^{**}$  ตามลำดับ ชี้ให้เห็นว่าพารามิเตอร์นี้สามารถใช้เป็นดัชนีประเมินความทนแล้งของข้าวได้

**คำสำคัญ:** การขาดน้ำ; อัตราการแลกเปลี่ยนแก๊ส; พลังงานศักย์ของน้ำในใบ; มวลชีวภาพ; ผลผลิต

**ABSTRACT:** Water deficit affects physiological responses and yield of rice. The objectives of this study were 1) to investigate effects of water deficit on leaf gas exchange, biomass, and yield at reproductive stage, and 2) to evaluate drought tolerance among rice varieties and investigate the physiological traits related to a rice tolerance. The experimental design was a split plot in a randomized complete block design. The main plot consisted of three water conditions: control (CT), moderate water deficit (MWD), and severe water deficit (SWD). The sub plots were six

\* Corresponding author: agrcyc@ku.ac.th

Received: date; January 11, 2023 Accepted: date; May 19, 2023 Published: date;

varieties of rice: KDML105, JHN, Riceberry, Sinlek, IR20, and DH212. The soil moisture and leaf water potentials were measured. Leaf gas exchange, biomass, and yield of rice were collected. The results showed that the water deficit reduced soil moisture and water status in plants. The stomata conductance ( $g_s$ ), light-adapted quantum efficiency of PSII ( $\Phi_{PSII}$ ) and electron transport rate (ETR) were reduced while the intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and leaf temperature ( $T_{leaf}$ ) were increase under water deficit resulting in high reduction in net photosynthetic rate ( $P_n$ ), and transpiration rate (E). Moreover, the water deficit also decreased biomass and yield in all rice varieties. As a result, JHN and Riceberry were high tolerance to water deficit, KDML105 and Sinlek were quite susceptible to water deficit. In addition, the yield significantly correlated with  $P_n$ , E, and  $g_s$  which had high positive correlation as 0.82\*\*, 0.83\*\*, and 0.84\*\* respectively. It suggests that those parameters can be used as an index to evaluate the drought tolerance of rice.

**Keywords:** water deficit; leaf gas exchange; leaf water potentials; biomass; yield

## บทนำ

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในประเทศไทย นิยมเพาะปลูกในทุกภูมิภาคของประเทศโดยมีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวทั้งหมดประมาณ 63.01 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) โดยพันธุ์ข้าวที่ได้รับความนิยมปลูกมากที่สุด ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ105 (Khoa Dawk Mali 105, KDML105) จากข้อมูลปีเพาะปลูก 2564/65 มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 23.29 ล้านไร่ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565) เนื่องจากมีคุณภาพการหุงต้มดี เมล็ดอ่อนนุ่ม และมีกลิ่นหอม (กรมการข้าว, 2559) ในขณะที่ข้าวเจ้าหอมนิล (Jao Hom Nin, JHN) เป็นพันธุ์ข้าวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี ข้าวทั้งสองพันธุ์จึงเป็นแหล่งพันธุกรรมที่ดีสำหรับการปรับปรุงพันธุ์ โดยนักปรับปรุงพันธุ์ข้าวได้ทำการผสมข้าวข้ามสายพันธุ์ระหว่างขาวดอกมะลิ105 และเจ้าหอมนิล และคัดเลือกจนได้ข้าวพันธุ์ใหม่ คือ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) มีพื้นที่ปลูกประมาณ 2,852.75 ไร่ ในปีเพาะปลูก 2564/65 (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2565) เป็นข้าวที่อุดมไปด้วยสารต้านอนุมูลอิสระและมีประโยชน์ต่อร่างกาย และยังคัดเลือกได้ข้าวพันธุ์สินเหล็ก (Sinlek) เป็นข้าวที่มีธาตุเหล็กสูง มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำเหมาะสำหรับกลุ่มผู้ป่วยโรคเบาหวาน (ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว, 2560) พันธุ์ข้าวที่กล่าวมานี้กำลังเป็นข้าวที่ได้รับความนิยมของตลาดโดยเฉพาะในกลุ่มผู้ที่รักสุขภาพ

สภาวะความแห้งแล้งเป็นปัญหาที่สำคัญของการผลิตข้าวทั่วโลก รวมถึงการเพาะปลูกข้าวในประเทศไทย (Foley et al., 2011) น้ำเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการสร้างผลผลิตทางการเกษตร (Wang et al., 2012) โดยเฉพาะในการปลูกข้าว เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่ต้องการน้ำในปริมาณมากอยู่ตลอดช่วงอายุการเจริญเติบโต ในขณะที่พื้นที่เพาะปลูกข้าวส่วนใหญ่ของประเทศไทย อยู่นอกพื้นที่เขตชลประทานจำเป็นต้องอาศัยน้ำฝนในการเพาะปลูก (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2565) รวมถึงจากปัญหาความแปรปรวนของสภาพอากาศที่ทวีความรุนแรงมากขึ้น ยิ่งทำให้พื้นที่ปลูกข้าวประสบปัญหาภัยแล้งเพิ่มขึ้น ซึ่งการขาดน้ำส่งผลกระทบต่อผลผลิต การสะสมของน้ำหนักมวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าว (Farooq et al., 2010)

การสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่สำคัญในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี โดยที่คลอโรฟิลล์ทำหน้าที่ดูดซับแสงจากดวงอาทิตย์เปลี่ยน  $CO_2$  และน้ำให้เป็นกลูโคส, น้ำ และออกซิเจน (Taiz and Zeiger, 2002) โดยทั่วไปการศึกษาระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง สามารถประเมินได้จากการอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบพืช โดยเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊ส สามารถประเมินได้ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบ  $CO_2$  และน้ำในอากาศที่ไหลผ่านใบพืช (LI-COR, 2002) แล้วได้ข้อมูลออกมาหลายลักษณะ ได้แก่ อัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิ (Net photosynthetic rate,  $P_n$ ) อัตราการคายน้ำ (Transpiration rate, E) ค่าน้ำไหลปากใบ (Stomatal conductance,  $g_s$ ) ค่าความเข้มข้น  $CO_2$  ในช่องว่างใบ (Intercellular  $CO_2$  concentration,  $C_i$ ) ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสงสองในสภาพมีแสง (Quantum efficiency of PSII electron transport in illuminate,  $\Phi_{PSII}$ ) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (Electron transport rate, ETR) และอุณหภูมิใบ (Leaf temperature,  $T_{leaf}$ ) เป็นต้น (LI-COR, 2002) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้สามารถสะท้อนการดำเนินกิจกรรมที่เปลี่ยนแปลงของพืชรวมทั้งในข้าวด้วย เมื่อข้าวเกิดความเครียดจากการขาดน้ำที่ระยะสืบพันธุ์ ข้าวจะปิดปากใบหรือลดขนาดของปากใบลงเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ ทำให้ใบจำกัดการเข้าของ  $CO_2$  ลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมี ทำให้อัตราการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง (Centritto et al., 2009) นอกจากนี้ การขาดน้ำยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุ ลดกิจกรรมของเอนไซม์ Rubisco ใน

กระบวนการ Calvin cycle ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงและผลผลิตพืชลดลง (Anjum et al., 2011; Chaum et al., 2010) นอกจากการขาดน้ำจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและลักษณะทางสรีรวิทยาแล้ว ยังส่งผลต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของข้าวด้วย (Pandey and Shukla, 2015) อย่างไรก็ตาม การตอบสนองของพืชต่อสภาวะขาดน้ำมีความซับซ้อน และมีการตอบสนองที่หลากหลายขึ้นอยู่กับระดับของการขาดน้ำ ระยะเวลาที่ขาดน้ำ ระยะการเจริญเติบโตของพืช และพันธุกรรมของพืช

ปริญญช และคณะ (2558) รายงานการศึกษาข้าวพันธุ์ KDML105 ที่ได้รับการแทนที่บางส่วนจากโครโมโซมของข้าวทนแล้งพันธุ์ DH212 พบว่าการขาดน้ำทำให้ค่าพลังงานศักย์ของน้ำในใบข้าวมีค่าลดลง โดยข้าวพันธุ์ที่สามารถทนแล้งได้จะมีค่าพลังงานศักย์ของน้ำในใบลดลงน้อยกว่าพันธุ์ข้าวที่อ่อนแอต่อสภาพขาดน้ำ เนื่องจากสามารถรักษาตุลการใช้น้ำได้ดี ทำให้สามารถดำเนินกิจกรรมต่างๆ ได้ วัฒน และคณะ (2563) พบว่าระยะเวลาและระดับความรุนแรงของการขาดน้ำในข้าวพันธุ์ KDML105 ที่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นจะชักนำให้ปากใบปิดแคบลงและทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ ( $P_n$ ) ลดลง ข้าวเจ้าหอมนิลมีการศึกษาในข้าวเจ้าหอมนิลพันธุ์กลายที่มีความแตกต่างของลักษณะปากใบ พบว่าปากใบที่มีความหนาแน่นต่ำและขนาดเล็กสามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพขาดน้ำได้ดี และประสิทธิภาพการใช้น้ำสูง (Pitaloka et al., 2022) สำหรับข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่มีการศึกษาในสภาพขาดน้ำโดย Rungrat and Poothab (2019) รายงานว่าการขาดน้ำทำให้การเจริญเติบโตของข้าวช้าลง ผลผลิตข้าวเฉลี่ยลดลง แต่มีการสะสมปริมาณแอนโทไซยานินในเมล็ดเพิ่มขึ้น สำหรับข้าวพันธุ์สินเหล็ก มีรายงานว่าเป็นพันธุ์ที่อ่อนแอต่อสภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูง (Malumpong et al., 2019) อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาผลกระทบของการขาดน้ำต่อข้าวทั้ง 4 พันธุ์ในการทดลองเดียวกัน โดยเฉพาะการตอบสนองเกี่ยวกับกระบวนการสังเคราะห์แสงในใบ นอกจากจะทำให้เข้าใจกลไกการตอบสนองของข้าวแต่ละพันธุ์แล้ว อาจเชื่อมโยงถึงพันธุกรรมของข้าวที่มาจากฐานเดียวกันได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการขาดน้ำต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ น้ำหนักมวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าว ประเมินความทนทานต่อการขาดน้ำและหาลักษณะทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการทนแล้งของข้าว เพื่อใช้เป็นดัชนีประเมินความทนแล้งสำหรับประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกพันธุ์ข้าวทนแล้งต่อไป

## วิธีการศึกษา

### แผนการทดลองและการจำลองสภาพความเครียดจากการขาดน้ำ

ทดสอบพันธุ์ข้าวด้วยสภาพการปลูกในกระถางที่โรงเรียน KU plant phenomics ของศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ในช่วงเดือนสิงหาคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2563 วางแผนการทดลองแบบ Split plot in randomized complete block design (RCBD) จำนวน 8 ซ้ำ หรือ 8 กระถาง หรือ 8 ต้นต่อหน่วยทดลอง โดยทำการสุ่มทรีทเมนต์ของปัจจัยหลัก (Main plot) หลังจากนั้นจึงทำการสุ่มทรีทเมนต์ของปัจจัยรอง (Sub plot) โดยการสุ่มจะกระทำลงใน Main plot ซึ่งในการทดลองได้กำหนดปัจจัยหลัก คือ การจัดการให้น้ำ 3 แบบ คือ 1) สภาพปกติหรือชั่งน้ำ (Control, CT) โดยชั่งน้ำสูงท่วมผิวดินประมาณ 1 นิ้วหรือดินอิ่มตัวด้วยน้ำตลอดการทดลอง 2) สภาพขาดน้ำปานกลาง (Moderate water deficit, MWD) โดยการควบคุมการให้น้ำที่ 50% ของอัตราการคายระเหย (evaporation rate; คำนวณจากการชั่งน้ำหนักกระถางข้าวในดินอิ่มตัวด้วยน้ำลบด้วยน้ำหนักกระถางข้าวในวันต่อมาก่อนรดน้ำ) นาน 10 วัน และเติมน้ำเพื่อประเมินการฟื้นตัว และ 3) สภาพขาดน้ำรุนแรง (Severe water deficit, SWD) คืองดการให้น้ำแก่พืชอย่างต่อเนื่อง (Withhold water) นาน 4 วันและเติมน้ำเพื่อประเมินการฟื้นตัว ส่วนปัจจัยรอง คือ พันธุ์ข้าว 6 พันธุ์ ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Khoa Dawk Mali 105, KDML105), เจ้าหอมนิล (Jao Hom Nin, JHN), ไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry), สินเหล็ก (Sinlek) ปลูกร่วมกับข้าวพันธุ์ตรวจสอบ IR20 ซึ่งเป็นพันธุ์อ่อนแอต่อความแห้งแล้ง และข้าวพันธุ์ DH212 ซึ่งเป็นพันธุ์ทนทานต่อความแห้งแล้ง

การเพาะกล้าข้าวทั้ง 6 พันธุ์ เพาะกล้าแบบเลื่อนเวลาเพื่อให้ข้าวตั้งท้อง (Booting stage) ในช่วงเวลาเดียวกันในขณะทำการทดลองการขาดน้ำ โดยเพาะเมล็ดข้าวพันธุ์ DH212 และไรซ์เบอร์รี่ก่อน เนื่องจากมีอายุวันออกดอกที่นานที่สุด หลังจากนั้น 7 วันจึงเพาะเมล็ดข้าวพันธุ์สินเหล็กและอีก 7 วันจึงเพาะข้าว KDML105 IR20 และ เจ้าหอมนิล ตามลำดับ การเพาะกล้าทำโดยนำเมล็ดไปแช่น้ำ เมื่อเมล็ดเริ่มงอกจึงย้ายเมล็ดลงปลูกในถาดหลุม และเมื่อต้นกล้ามีอายุ 15-20 วัน ย้ายปลูกลงในกระถางพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมมีรูขนาด 7 x 7 นิ้ว สูง 20 ซม. บรรจุดินร่วนหนัก 4 กก.ของดินแห้งต่อกระถาง ดินประกอบด้วยอนุภาคขนาดทราย 37.65% อนุภาคขนาด

ทรายแป่ง 35.97% และ อนุภาคขนาดดินเหนียว 26.38% มีค่าความจุสนาม 32.38% โดยน้ำหนัก จุดเยี่ยวถาวร 13.05% โดยน้ำหนัก ดุแลใส่ปุ๋ยสูตร 20-8-20 อัตรา 1.15 กรัม/กระถาง ที่ระยะแตกกอและระยะตั้งท้อง ปลูกแบบขังน้ำในสภาพธรรมชาติ จนกระทั่งข้าวเริ่มเข้าสู่ระยะตั้งท้อง แล้วจึงย้ายข้าวเข้าโรงเรือน KU plant phenomics เพื่อเริ่มต้นการจำลองสภาพขาดน้ำโดยเทน้ำออกจากกระถาง แล้วนำกระถางปลูกข้าวใส่ลงในกระถางกลมไม่มีรูขนาดใหญ่ 11.5 x 11.5 นิ้ว สูง 23 ซม. เพื่อให้กักเก็บน้ำไว้ในกระถางได้ แล้วจึงเริ่มการควบคุมการให้น้ำ เก็บข้อมูลและบันทึกผลการทดลองของสภาพปกติและสภาพขาดน้ำปานกลาง ในวันที่ 1, 3, 5, 8, 10 วันหลังควบคุมการให้น้ำและประเมินการฟื้นตัวที่ 10 วันหลังการเติมน้ำ สำหรับในสภาพขาดน้ำรุนแรงเก็บข้อมูลในวันที่ 1 และ 3 วันหลังการให้น้ำ แล้วจึงเติมน้ำกลับเข้าสู่กระถางในวันที่ 4 หลังการงดน้ำและประเมินการฟื้นตัวที่ 10 วันหลังการเติมน้ำ

**การเก็บข้อมูลความชื้นดิน (Soil moisture) และค่าพลังงานศักย์ของน้ำในใบพืช (Leaf water potentials,  $\Psi_t$ )**

เก็บข้อมูลความชื้นดิน (Soil moisture) ด้วยเครื่อง Soil moisture meter แบบ Portable (รุ่น TDR150, Spectrum Technologies Inc, ประเทศสหรัฐอเมริกา) เพื่อวัดค่าความชื้นดินที่เปลี่ยนแปลง โดยทำการปักหัววัด (sensor) ลงไปในดินระหว่างขอบกระถางและต้นพืชลึกประมาณ 12 ซม. วัดค่าความชื้นดินจากทุกกระถางทั้ง 3 สภาพน้ำ เก็บข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันคือ 14.00 น. ทุกวันตั้งแต่วันเริ่มงดน้ำจนจบการทดลอง เก็บข้อมูลพลังงานศักย์ของน้ำในใบ (Leaf water potentials,  $\Psi_t$ ) โดยตรวจวัดในใบธงที่พัฒนาเต็มที่หรือใบรองใบธง ด้วยเครื่องวัดความดัน (Pressure Chamber, บริษัท Soil Moisture Equipment, ประเทศสหรัฐอเมริกา) ทำตามวิธีการของ Boyer (1995) วัดค่า  $\Psi_t$  จากทั้ง 3 ระดับการให้น้ำในทุกกระถางในช่วงเช้ามืด (predawn)

**การเก็บข้อมูลอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในระดับใบ**

วัดอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในระดับใบ ด้วยเครื่องวัดอัตราสังเคราะห์แสงระบบเปิด (รุ่น LI6400 บริษัท LICOR ประเทศสหรัฐอเมริกา) เป็นเครื่องมืออุปกรณ์เสริมให้แสง และวัดค่าฟลูออเรสเซนซ์ (Leaf chamber fluorometer) ตั้งค่าสภาพควบคุมโดยปรับอุณหภูมิของกล่องบรรจุใบให้คงที่ที่ 28 °C ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 70-75% โดยกำหนดความเข้มแสงที่ 1,500  $\mu\text{molPPF}/\text{m}^2/\text{s}$  และกำหนดความเข้มของ  $\text{CO}_2$  ที่ผ่านใบ 400  $\mu\text{molCO}_2/\text{mol}$  (ศรีสังวาลย์ และ สุนทรี, 2554) สภาพนี้เป็นสภาพที่เหมาะสมต่อข้าว ทำให้ข้าวเปิดปากใบอย่างเต็มที่ หลังจากนั้นรองจนใบพืชปรับตัวและค่า C.V. ต่ำกว่า 0.05 จึงทำการบันทึกค่าซึ่งเครื่องจะอ่านและบันทึกค่าอัตโนมัติ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในระดับใบ ได้แก่ อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ, อัตราคายน้ำ, ค่าน้ำไหลปากใบ, ค่าความเข้มข้น  $\text{CO}_2$  ในช่องว่างใบ, ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสงสองในสภาพมีแสง, อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน, อุณหภูมิใบ และนำค่ามาหาสัดส่วนของอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิต่ออัตราการคายน้ำ ( $P_n/E$ ) เพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพการใช้น้ำ (Water use efficiency, WUE) วัดค่าบนใบธงที่พัฒนาเต็มที่หรือใบรองใบธงจากทั้ง 3 ระดับการให้น้ำ เก็บข้อมูลจำนวน 4 ต้นต่อพันธุ์ต่อทรีทเมนต์ ในเวลา 8.00 ถึง 13.00 น.

**น้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตข้าว**

เก็บข้อมูลน้ำหนักมวลชีวภาพ และผลผลิตข้าวหลังจากที่ข้าวออกดอกแล้วประมาณ 25-30 วันซึ่งเป็นระยะสุกแก่พร้อมเก็บเกี่ยวของข้าว จำนวน 4 ต้นต่อพันธุ์ต่อทรีทเมนต์ โดยตัดต้นส่วนเหนือดินเริ่มตั้งแต่ช่วงลำต้นที่ติดชิดกับดินในกระถางแล้วแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของลำต้นและใบ โดยนำลำต้นและใบใส่ในถุงกระดาษแล้วอบในตู้อบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 70-75 °C เป็นเวลา 3 วัน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้งต้นและใบ ส่วนที่สองเป็นส่วนของรวงข้าว อบที่อุณหภูมิ 40-45 °C เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักแห้งรวง แล้วนำน้ำหนักแห้งของทั้งสองส่วนมารวมกัน บันทึกข้อมูลเป็นน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินหรือน้ำหนักมวลชีวภาพ หลังจากนั้น ทำการแยกเฉพาะเมล็ดดีออกจากรวงแล้วนำมาชั่งน้ำหนักเมล็ดดีต่อกอ บันทึกข้อมูลเป็นผลผลิตข้าว (กรัมต่อกอ)

**การวิเคราะห์ทางสถิติ**

วิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะที่ศึกษาด้วยแผนการทดลองแบบ Split plot in RCBD จากนั้นแยกวิเคราะห์ความแปรปรวนในแต่ละระดับการให้น้ำ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Fisher’s Least-Significant Difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากนั้น คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง ค่าดัชนีความทนแล้ง Drought tolerance index (DTI) = (ค่าของลักษณะพืชในสภาวะความเครียด / ค่าของลักษณะพืชในสภาวะปกติ)  $\times$  100 (Jain et al., 2017) ของข้อมูลอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊ส น้ำหนักมวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าว และหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตกับข้อมูลอัตราการ

แลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าว (n=18) และค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่า DTI ของน้ำหนักมวลชีวภาพ และผลผลิตข้าวกับข้อมูลอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าว (n=12)

## ผลการศึกษาและวิจารณ์

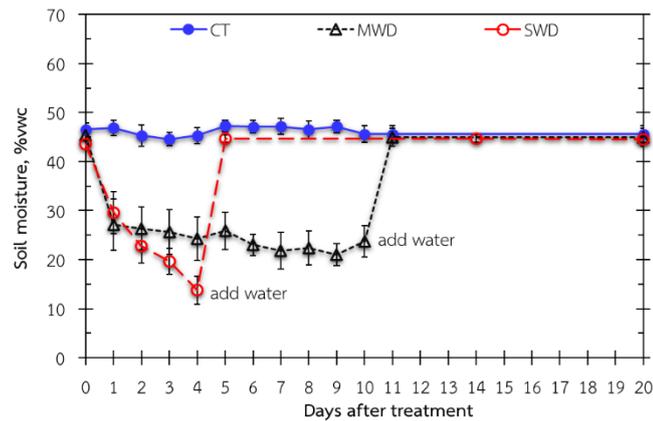
### ความชื้นดินและสถานะของน้ำในพืช

จากข้อมูลความชื้นดิน พบว่า ในสภาพปกติหรือช่วงน้ำซึ่งเป็นสภาพที่ใช้ปลูกข้าวนาสวนมีค่าเฉลี่ยความชื้นดินสูงและค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองอยู่ในช่วง 44.6–47.3% สูงกว่าค่าที่ระดับความจุสนามของดินที่ใช้ในการทดลองนี้ สำหรับสภาพขาดน้ำปานกลาง ค่าความชื้นดินลดลงไปครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพปกติมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 21.0–27.1% ในขณะที่สภาพขาดน้ำรุนแรง ค่าเฉลี่ยความชื้นดินลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเฉลี่ยเพียง 13.8% ในวันที่ 4 หลังการงดน้ำ (Figure 1) ซึ่งถือว่าเป็นสภาพดินที่แห้งมากใกล้เคียงกับค่าที่ระดับจุดเหี่ยวถาวร โดยความชื้นดินที่ระดับนี้ไม่เพียงพอให้รากพืชดูดน้ำไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ภายในต้นพืช หลังจากเติมน้ำกลับเข้าไปในกระถางอีกครั้งเพื่อประเมินการฟื้นตัวของข้าว ส่งผลให้ค่าความชื้นดินทั้งในสภาพขาดน้ำปานกลาง และขาดน้ำรุนแรงกลับมาใกล้เคียงกับสภาพปกติอีกครั้งหลังเติมน้ำกลับเข้าไป 1 วัน

สภาพขาดน้ำส่งผลกระทบต่อสถานะของน้ำในพืช พบว่า พลังงานศักย์ของน้ำในใบข้าวในช่วงเข้ามีด (Leaf water potentials,  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$ ) ในวันที่ 1, 3, 8 และ 10 วันหลังการควบคุมการให้น้ำ มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างระดับการให้น้ำ โดยทั้งในสภาพขาดน้ำปานกลางและรุนแรงส่งผลให้ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ลดลงเมื่อเทียบกับในสภาพปกติ ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ในสภาพให้น้ำปกติมีค่าสูงตลอดการทดลองโดยมีค่าอยู่ในช่วง -72 ถึง -110 kPa รองลงมาเป็นสภาพขาดน้ำปานกลางมีค่าอยู่ในช่วง -244 ถึง -1,370 kPa และในสภาพขาดน้ำรุนแรงมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในช่วง -1,286 ถึง -3,553 kPa ในสภาพขาดน้ำรุนแรงมีค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ต่ำที่สุดในวันที่ 3 หลังการงดน้ำ มีค่าเพียง -3,553 kPa ทำให้ในวันที่ 4 หลังงดน้ำไปข้าวบางพันธุ์แห้งมากไม่สามารถวัดค่าได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือ ข้อมูลในวันที่ 5, 8 และ 10 วันหลังงดน้ำเป็นการวัดในสภาพขาดน้ำปานกลางและสภาพปกติพบว่าค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  มีความแตกต่างระหว่างทริทเมนต์ และพันธุ์ข้าวหลังควบคุมน้ำ 10 วัน จากนั้นเมื่อมีการให้น้ำในระดับปกติแก่ต้นข้าวที่ขาดน้ำอีกครั้งเป็นเวลา 10 วัน เพื่อประเมินการฟื้นตัวของต้นข้าว พบว่าต้นข้าวที่เคยขาดน้ำทั้งระดับปานกลางและรุนแรง สามารถกลับมาฟื้นตัวได้ดีทำให้ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  กลับมาสูงเทียบเท่าต้นข้าวในสภาพให้น้ำปกติ (Table 1)

การกำหนดระดับการให้น้ำที่แตกต่างกันสามารถทำให้ดินมีความชื้นแตกต่างกัน สอดคล้องสถานะของน้ำในพืชที่ลดลงเมื่อความชื้นในดินลดลง ซึ่งให้เห็นว่าการให้น้ำที่ระดับขาดน้ำปานกลางและรุนแรงสามารถสร้างความเครียดจากการขาดน้ำให้แก่ต้นข้าว ค่าพลังงานศักย์ของน้ำในใบพืชในช่วงเข้ามีด ( $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$ ) เป็นค่าที่บอกถึงดุลของน้ำในใบข้าวหลังจากผ่านการสูญเสียน้ำในรอบวัน และการดึงน้ำในดินขึ้นมาชดเชยส่วนที่เสียไปในช่วงกลางวัน สะท้อนว่าขณะนั้นพืชมีอัตราการดูดน้ำเข้าทันกับอัตราการคายน้ำหรือไม่ (สุนทรและคณะ, 2544) ซึ่งการขาดน้ำทั้งระดับปานกลางและรุนแรงในการทดลองนี้ส่งผลต่อค่า  $\Psi_t$  ในใบข้าว โดยในสภาพขาดน้ำปานกลางส่งผลทำให้ค่า  $\Psi_t$  ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่สภาพขาดน้ำรุนแรงมีค่าลดลงมาก (ค่าติดลบมาก) โดยค่าที่ติดลบมากนั้นบ่งบอกถึงสถานะของน้ำในพืชว่า ในขณะที่พืชเสียน้ำมากกว่าที่ได้รับน้ำเข้ามาทดแทน สอดคล้องกันกับการศึกษาของ ปรียานุช และคณะ (2558) ที่ศึกษาผลของการขาดน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในใบข้าวพันธุ์ CSSL17, CSSL18, CSSL19 และ CSSL20 เปรียบเทียบกับพันธุ์พ่อแม่จำนวน 2 สายพันธุ์ (KDML105 และ DH212) รายงานว่า ข้าวในกลุ่มควบคุมมีค่าอยู่ระหว่าง -1.44 ถึง -2.10 MPa หรือ -1,440 ถึง -2,100 kPa และในกลุ่มที่ได้รับสภาพขาดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง -1.83 ถึง -2.96 MPa หรือ -1,830 ถึง -2,960 kPa จะเห็นว่าข้าวในสภาพขาดน้ำมีค่าลดลง ในขณะที่ค่า  $\Psi_t$  ในสภาพขาดน้ำรุนแรงมีค่าลดลงสูงมากถึง -3,553 kPa นั้นสะท้อนให้เห็นว่าข้าวในการทดลองนี้ไม่สามารถรักษาสถานะของน้ำในใบได้แล้ว เนื่องจากได้รับสภาวะขาดน้ำรุนแรง นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่าการขาดน้ำส่งผลให้พลังงานศักย์รวมของน้ำในใบ และปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในใบลดลงในพืชอื่น ๆ ด้วย เช่น ถั่วเหลือง, กาแฟโรบัสต้า และอ้อย (Ohashi et.al., 2009; Roonprapant et.al., 2021; Dhansu et.al., 2021) เมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของพันธุ์ข้าวต่อสถานะของน้ำในใบพบว่า ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติ แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำปานกลางหรือควบคุมการให้น้ำนาน 10 วัน โดยข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่, เจ้าหอมนิล และ DH212 มีค่า

$\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  สูงสุดตามลำดับ ส่วนพันธุ์ IR20 มีค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ต่ำที่สุด เช่นเดียวกับในสภาพขาดน้ำรุนแรงในวันที่ 1 ที่ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ของพันธุ์ IR20 มีค่าต่ำที่สุดและเมื่อรดน้ำนานต่อเนื่อง 3 วัน ค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  ยิ่งลดลงต่ำมากในข้าวทุกพันธุ์โดยแยกกลุ่มได้เพียง 2 กลุ่ม คือ ไรซ์เบอร์รี่ และเจ้าหอมนิลมีค่าสูง ส่วน KDML105 มีค่าต่ำที่สุด หลังจากให้น้ำแก่ต้นข้าวอีกครั้งพบว่าค่า  $\Psi_{t_{\text{Predawn}}}$  มีค่าสูงขึ้นและไม่แตกต่างกับในสภาพให้น้ำปกติ จากการทดลองจะเห็นได้ชัดว่า ข้าวเจ้าหอมนิล, ไรซ์เบอร์รี่ และ DH212 มีความเครียดหรือรักษาระดับน้ำภายในต้นได้ดีกว่าข้าวพันธุ์ IR20 ที่เป็นพันธุ์ที่อ่อนแอต่อการขาดน้ำ ซึ่งเจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่มีความสามารถในการทนแล้งเทียบเท่ากับ DH212 ที่เป็นพันธุ์ทนแล้ง และไรซ์เบอร์รี่น่าจะได้รับความสามารถในการทนแล้งมาจากเจ้าหอมนิล



**Figure 1** Average percentage of soil moisture under control (CT), moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) during 0 to 20 days after treatment. The error bars represent  $\pm$  SE

**Table 1** Leaf water potential at predawn under control (CT), moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at 1 to 10 days after treatment of six rice varieties

Treatment	Leaf water potential at predawn					
	1 DAT	3 DAT	5 DAT	8 DAT	10 DAT	10 DAR
<b>Water regime</b>						
CT	-72.2 A	-72.9 A	-104	-110 A	-100 A	-87.5
MWD	-355 B	-1,370 B	-244	-1,165 B	-498 B	-91.7
SWD	-1,286 C	-3,553 C	NA	NA	NA	-87.5
F-test	**	**	ns	**	*	ns
<b>Varieties</b>						
KDML105	-1,246 d	-2,071 b	-131	-831	-369 ab	-83.3
JHN	-571 bc	-1,471 a	-150	-681	-175 a	-91.7
Riceberry	-206 a	-1,300 a	-131	-456	-150 a	-87.5
Sinlek	-319 ab	-1,747 ab	-163	-450	-329 ab	-87.5
IR20	-660 c	-1,722 ab	-300	-781	-528 b	-91.7
DH212	-290 ab	-1,679 ab	-169	-625	-244 a	-91.7
F-test	**	*	ns	ns	*	ns
<b>Water regime x Varieties</b>						
F-test	**	ns	ns	ns	ns	ns
CV a (%)	-43.7	-26.3	115	-47.9	-100	-49.0
CV b (%)	-66.4	37.8	100	-76.5	-81.5	-31.6
Mean	-571	1,665	174	-638	-299	-88.9

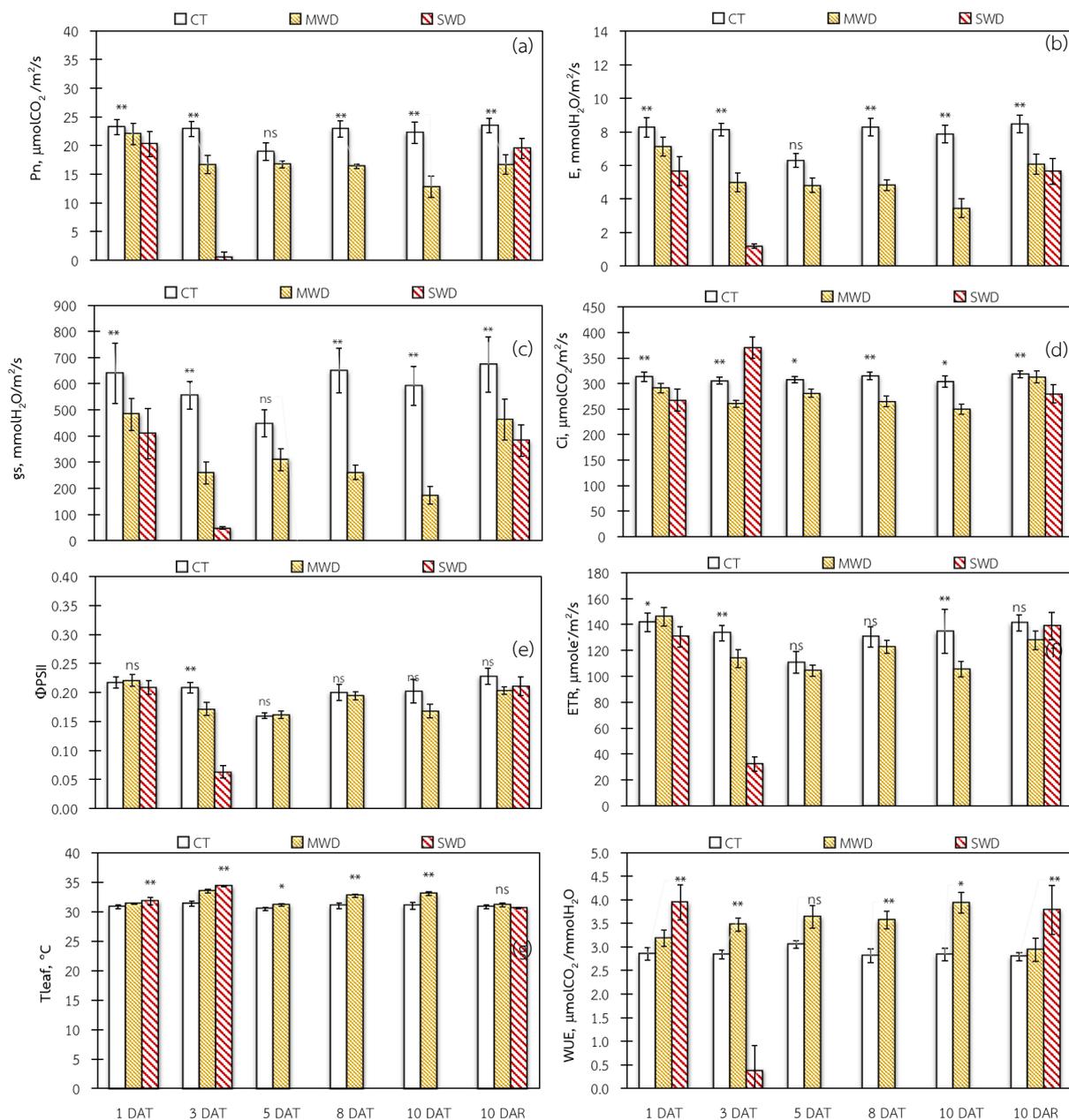
Means with different uppercase denote significant difference between the three water conditions; different lowercase denote significant difference among rice varieties under the same conditions; \*, \*\* indicates significant difference among varieties at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively and ns indicates not significant difference. DAT; day after treatment, DAR; day after recovery.

### อิทธิพลของการขาดน้ำต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ

การขาดน้ำส่งผลกระทบต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของข้าว พบว่าระดับการให้น้ำที่แตกต่างกัน มีผลต่อลักษณะของอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในทุกลักษณะที่วัด โดยการขาดน้ำปานกลางและการขาดน้ำรุนแรงทำให้ค่า  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $\Phi_{PSII}$  และ ETR มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาพการให้น้ำปกติ (Figure 3a-h) โดยมีค่าลดลงเล็กน้อยในวันแรกหลังการควบคุมระดับน้ำ และค่าลดลงมากขึ้นในวันที่ 3 หลังการควบคุมน้ำ โดยเฉพาะในสภาพขาดน้ำรุนแรงที่ได้รับผลกระทบมากกว่าและแสดงอาการเร็วกว่าการขาดน้ำปานกลาง จนทำให้สภาพขาดน้ำรุนแรงไม่สามารถเก็บข้อมูลต่อได้หลังจากวันที่ 3 หลังการควบคุมระดับน้ำ ในขณะที่ค่า  $C_i$  ลดลงภายใต้การขาดน้ำปานกลางและการขาดน้ำรุนแรงในวันที่ 1 หลังการควบคุมน้ำ เมื่อเทียบกับสภาพการให้น้ำปกติ และกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 3 หลังการควบคุมน้ำในสภาพขาดน้ำรุนแรง สำหรับค่า  $T_{leaf}$  มีค่าสูงขึ้นตั้งแต่วันแรกของการควบคุมน้ำ และเพิ่มสูงขึ้นอีกในวันที่ 3 หลังการควบคุมน้ำ พบทั้งในสภาพขาดน้ำปานกลางและขาดน้ำรุนแรง ในขณะที่ค่า WUE เป็นค่าสัดส่วนของอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิต่ออัตราการคายน้ำ ( $P_n/E$ ) นั้นหมายถึงการสูญเสียน้ำ 1 หน่วย สามารถตรึง  $CO_2$  ได้เท่าใด ถ้าค่าสูงแสดงว่ามีประสิทธิภาพการใช้น้ำดี พบว่า การขาดน้ำปานกลางและขาดน้ำรุนแรงส่งผลให้ค่า WUE สูงขึ้นในวันที่ 1 หลังการควบคุมน้ำ แต่เมื่อเข้าวันที่ 3 หลังการควบคุมน้ำค่า WUE กลับลดลงต่ำมากโดยเฉพาะในสภาพขาดน้ำรุนแรง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าในสภาพขาดน้ำรุนแรงจะได้รับผลกระทบมากกว่าในสภาพขาดน้ำปานกลาง ภายหลังจากเติมน้ำกลับคืนแก่ต้นข้าวเป็นระยะเวลา 10 วันเพื่อประเมินการฟื้นตัวของข้าว พบว่า ค่า  $P_n$  และ E กลับมามีค่าสูงขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าในสภาพปกติประมาณ 20-25% แสดงว่าการขาดน้ำทั้ง 2 ระดับส่งผลกระทบต่อการทำงานของสังเคราะห์แสงและการคายน้ำของข้าว แม้ผ่านไป 10 วันแล้วความสามารถในการสังเคราะห์แสงยังไม่ฟื้นตัวเท่ากับสภาพปกติ เนื่องจาก

ปากใบยังคงปิดแคบค่า  $g_s$  ต่ำกว่าในสภาพปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบ PSII ( $\Phi_{PSII}$ ) และ อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) และอุณหภูมิใบ (Tleaf) มีค่าไม่แตกต่างกับสภาพปกติ แสดงว่ามีการฟื้นตัวของการรักษาอุณหภูมิใบ และระบบปรับแสงได้ดีหลังการได้รับน้ำกลับคืน

ข้าวมีกลไกในการตอบสนองต่อสภาพขาดน้ำโดยการปิดปากใบให้แคบลง ซึ่งเป็นกลไกแรกในการตอบสนองต่อสภาพเครียดของข้าว (พลอยพิศ และคณะ, 2565) ค่านำไหลปากใบ ( $g_s$ ) เป็นค่าที่สะท้อนระดับการเปิดปิดปากใบพืชในช่วงเวลานั้น หากมีค่าลดต่ำลงแสดงว่าปากใบปิดแคบลง จึงส่งผลต่อการจำกัดเส้นทางการไหลของ  $CO_2$  และน้ำ สะท้อนว่าข้าวมีการปรับตัวเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในต้นพืช ในขณะที่รากไม่สามารถดูดน้ำไปใช้ได้ภายใต้สภาพขาดน้ำ (นวิรัตน์, 2558) โดย  $g_s$  จะไปจำกัดการแพร่ของ  $CO_2$  ในกระบวนการตรึง  $CO_2$  ทำให้  $CO_2$  ในช่องว่างระหว่างเซลล์มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ค่า  $C_i$  ในสภาพขาดน้ำของการทดลองนี้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดได้จากการที่ข้าวไม่ได้นำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้เกิดการสะสม  $CO_2$  ในช่องว่างระหว่างเซลล์สูงขึ้นค่า  $C_i$  จึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $P_n$  ที่ต่ำลง หรือในสภาวะขาดน้ำทำให้พืชเครียดจึงทำให้พืชหายใจเพิ่มขึ้น  $CO_2$  ที่สะสมในช่องว่างระหว่างเซลล์จึงสูงขึ้นทำให้ค่า  $C_i$  เพิ่มขึ้นได้เช่นกัน ในขณะเดียวกันปากใบที่ปิดแคบลงยังส่งผลต่ออัตราการคายน้ำ (E) ที่ลดลงตามไปด้วยและยังส่งผลต่อเนื่องถึงการระบายความร้อนของใบข้าว ทำให้พืชเกิดการสะสมความร้อนที่ใบข้าว ส่งผลให้อุณหภูมิใบมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การขาดน้ำยังส่งผลต่อ PSII ทำให้ค่า  $\Phi_{PSII}$  และ ETR มีค่าลดลงเช่นกัน สำหรับประสิทธิภาพใช้น้ำ (WUE) เป็นค่าสัดส่วนของอัตราสังเคราะห์แสงต่ออัตราการคายน้ำในใบ ในสภาพขาดน้ำที่ไม่รุนแรงข้าวจะพยายามที่จะปรับตัวโดยรักษาระดับน้ำในต้น โดยการลดอัตราการคายน้ำและยังคงรักษาความสามารถในการสังเคราะห์แสงไว้ทำให้ค่า WUE มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้ในสภาพที่พืชขาดน้ำในระดับต่ำถึงปานกลาง จะส่งผลกระทบกับการควบคุมการปิดของปากใบแต่ไม่กระทบกับความสามารถในการตรึง  $CO_2$  ของข้าว (วสันต์ และคณะ, 2563) ซึ่งในการทดลองนี้พบว่าการขาดน้ำระดับปานกลางค่า  $C_i$  ของข้าวทุกพันธุ์ต่ำกว่าในสภาพปกติสะท้อนให้เห็นว่ามีการใช้  $CO_2$  ที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้สามารถรักษาอัตราสังเคราะห์แสงให้สูงได้ แต่ในสภาพขาดน้ำที่รุนแรงเป็นสภาพที่ข้าวไม่สามารถรักษาน้ำในต้นให้สามารถดำเนินกิจกรรมภายในเซลล์ได้ ปากใบปิดแคบมาก  $C_i$  เพิ่มขึ้นมาก อัตราการสังเคราะห์แสง และอัตราการคายน้ำลดลงมาก ทำให้ค่า WUE ลดต่ำกว่าสภาพปกติมาก สอดคล้องกับที่ Centritto et al. (2009) ได้รายงานไว้ว่า เมื่อพืชเกิดความเครียดจากการขาดน้ำ พืชจะปิดปากใบหรือลดขนาดของปากใบลง เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำในต้นพืช ทำให้การแลกเปลี่ยนแก๊สถูกจำกัดการเข้าออกของ  $CO_2$  และ  $H_2O$  ซึ่งส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงในพืช



**Figure 2** Parameters of leaf gas exchange: (a) net photosynthetic rate ( $P_n$ ); (b) transpiration rate ( $E$ ); (c) stomatal conductance ( $g_s$ ); (d) intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ); (e) light-adapted quantum efficiency of PSII ( $\Phi_{PSII}$ ); (f) electron transpiration rate (ETR); (g) leaf temperature ( $T_{leaf}$ ); (h) water use efficiency (WUE) under control (CT), moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at 1, 3, 5, 8, 10 day after treatment (DAT) and 10 day after recovery (DAR). The error bars represent  $\pm$  SE

### การตอบสนองทางลักษณะสรีรวิทยาของพันธุ์ข้าวต่อสภาพเครียดจากการขาดน้ำ

ประเมินการตอบสนองของข้าวภายใต้สภาวะขาดน้ำที่ 3 วันหลังควบคุมระดับน้ำ เพื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 ระดับน้ำ พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างระดับน้ำในทุกลักษณะของอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊ส (Table 2) โดยพบว่าค่า  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $\Phi$ PSII และ ETR เมื่อเริ่มได้รับสภาพขาดน้ำมีค่าลดลงและเมื่อขาดน้ำรุนแรงมากขึ้นค่ายิ่งลดลง ในขณะที่  $C_i$  มีค่าลดลงในช่วงแรกของการขาดน้ำแต่เมื่อขาดน้ำที่ระดับรุนแรงมากขึ้นค่า  $C_i$  กลับเพิ่มสูงขึ้น สำหรับ Tleaf มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามระดับความรุนแรงของการขาดน้ำและ WUE มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการขาดน้ำ แต่เมื่อขาดน้ำที่ระดับรุนแรงขึ้นค่า WUE กลับลดต่ำลง

การประเมินการตอบสนองของพันธุ์ข้าวภายใต้ระดับการให้น้ำที่แตกต่างกัน พบว่าค่า  $P_n$  ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติ แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำ (Table 2) โดยในสภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ มีค่า  $P_n$  สูงที่สุด 23.1 และ 19.9  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำรุนแรง ข้าวเจ้าหอมนิลและ DH212 มีค่า  $P_n$  สูงที่สุด 3.80 และ 1.65  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับค่า E ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติ แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำปานกลาง โดยข้าวเจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่ มีค่า E สูงที่สุด 7.20 และ 6.13  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ และในสภาพขาดน้ำรุนแรงพบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าว โดยข้าวสินเหล็ก, DH212, เจ้าหอมนิล และ IR20 มีค่าสูงที่สุด 1.48, 1.43, 1.40 และ 1.13  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับค่า  $g_s$  พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพปกติ โดยข้าว IR20 และเจ้าหอมนิล มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 778 และ 638  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับในสภาพขาดน้ำปานกลาง พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวโดยข้าวเจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 437 และ 325  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ และในสภาพขาดน้ำรุนแรงพบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าว โดยข้าวสินเหล็ก, DH212, เจ้าหอมนิล และ IR20 มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 60.7, 59.9, 57.0 และ 47.4  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ค่า  $C_i$  ในสภาพให้น้ำปกติพบความแตกต่างระหว่างพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ โดยข้าวเจ้าหอมนิล, KDML105, DH212 และไรซ์เบอร์รี่มีค่า  $C_i$  ต่ำที่สุด 311, 295, 291 และ 290  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำปานกลางไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าว แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำรุนแรง โดยข้าว DH212 และเจ้าหอมนิลมีค่า  $C_i$  ต่ำที่สุด 342 และ 279  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับค่า  $\Phi$ PSII และ ETR ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าว ขณะที่ค่า Tleaf พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าวทั้งในสภาพให้น้ำปกติ และสภาพขาดน้ำปานกลาง โดยในสภาพให้น้ำปกติข้าวพันธุ์ IR20, เจ้าหอมนิล, DH212 และสินเหล็ก มีค่า Tleaf ต่ำที่สุด 30.2, 30.8, 30.8 และ 31.4 °C ตามลำดับ และสำหรับในสภาพขาดน้ำปานกลางพบว่า ข้าวเจ้าหอมนิล สินเหล็ก IR20 และ KDML105 มีค่า Tleaf ต่ำที่สุด 32.3, 33.3, 33.5 และ 33.1 °C ตามลำดับ ในขณะที่สภาพขาดน้ำรุนแรงส่งผลทำให้ค่า Tleaf เพิ่มสูงขึ้นในข้าวทุกสายพันธุ์และไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าว ซึ่งค่า Tleaf ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีอัตราการคายน้ำลดลง ทำให้การระบายความร้อนในต้นพืชลดลง ทำให้เกิดการสะสมความร้อนที่ใบข้าว ค่า Tleaf จึงเพิ่มสูงขึ้น สำหรับค่า WUE ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพปกติและสภาพขาดน้ำปานกลาง ในขณะที่สภาพขาดน้ำรุนแรงพบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าว โดยข้าวเจ้าหอมนิล และ DH212 มีค่าประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงที่สุด 2.60 และ 1.20  $\mu\text{molCO}_2/\text{mmolH}_2\text{O}$  ตามลำดับ

สภาพขาดน้ำส่งผลกระทบต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบของข้าวทุกสายพันธุ์ โดยเฉพาะในการขาดน้ำระดับรุนแรงข้าวจะได้รับผลกระทบมากกว่าการขาดน้ำระดับปานกลางซึ่งแสดงออกมาในลักษณะที่ต่างกัน จากการศึกษาพบความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์ข้าวภายใต้สภาพขาดน้ำทั้งสองระดับ โดยลักษณะที่พบความแตกต่างของพันธุ์ข้าวภายใต้สภาพขาดน้ำ ได้แก่  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $C_i$ , Tleaf และ WUE จากลักษณะที่กล่าวมานี้ อาจใช้เป็นดัชนีบ่งบอกการขาดน้ำในข้าวหรืออาจใช้ในการจำแนกพันธุ์ข้าวหรือใช้เพื่อประเมินพันธุ์ข้าวที่มีความทนแล้งภายใต้สภาพขาดน้ำได้ โดยในสภาพขาดน้ำปานกลาง พบว่าข้าวเจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่สามารถรักษาอัตราสังเคราะห์แสงในใบได้สูงกว่าพันธุ์อื่น แสดงว่าการดำเนินกิจกรรมภายในใบได้รับผลกระทบจากการขาดน้ำน้อยหรือแสดงถึงความสามารถทนต่อสภาพขาดน้ำปานกลางได้ดี สำหรับในสภาพขาดน้ำรุนแรงพบว่าเจ้าหอมนิล และ DH212 ยังคงสังเคราะห์แสงได้

ในขณะที่ข้าวพันธุ์อื่นมีการหายใจมากกว่าการสังเคราะห์แสง กล่าวได้ว่าข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่มีความสามารถในการรักษากระบวนการภายในต้นได้เทียบเท่ากับพันธุ์ DH212 ที่เป็นพันธุ์ทนแล้ง ซึ่งสามารถจัดอยู่ในกลุ่มที่สามารถทนแล้งได้ใกล้เคียงกับ DH212

### การตอบสนองทางลักษณะสรีรวิทยาของพันธุ์ข้าวภายหลังการฟื้นตัวจากการขาดน้ำ

การประเมินการฟื้นตัวของข้าวหลังจากให้น้ำแก่ข้าวอีกครั้งเป็นระยะเวลา 10 วัน ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างระดับน้ำในค่า  $\Phi$ PSII, ETR และ Tleaf แต่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างระดับน้ำในค่า  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $C_i$  และ WUE (Table 3) โดยพบว่าค่า  $\Phi$ PSII, ETR และ Tleaf สามารถฟื้นตัวได้ดีจนทำให้ค่า  $\Phi$ PSII, ETR และ Tleaf เพิ่มขึ้นและกลับมาใกล้เคียงกับค่าในสภาพให้น้ำปกติจึงไม่พบความแตกต่างระหว่างระดับน้ำ ในขณะที่  $P_n$ , E และ  $g_s$  มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการฟื้นตัวแต่ยังคงมีค่าที่ต่ำกว่าในสภาพให้น้ำปกติสำหรับค่า  $C_i$  และ WUE พบว่าข้าวสามารถฟื้นตัวได้ในสภาพขาดน้ำปานกลางดีกว่าในสภาพขาดน้ำรุนแรง

การประเมินการตอบสนองของพันธุ์ข้าวภายหลังการฟื้นตัวจากการขาดน้ำ พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวของค่า  $P_n$  ในทุกระดับการให้น้ำ (Table 3) โดยในสภาพให้น้ำปกติ ข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และ IR20 มีค่า  $P_n$  สูงที่สุด 28.7 และ 25.3  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวไรซ์เบอร์รี่, สีนเหล็ก และ DH212 มีค่า  $P_n$  สูงที่สุด 20.9 19.4 และ 19.4  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำรุนแรง ข้าวสินเหล็ก, เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ มีค่า  $P_n$  สูงที่สุด 23.9 23.1 และ 22.8  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับค่า E พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในทุกระดับการให้น้ำ โดยในสภาพให้น้ำปกติ ข้าวพันธุ์ IR20 และเจ้าหอมนิลมีค่า E สูงที่สุด 10.3 และ 7.58  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวทุกสายพันธุ์มีค่า E สูงยกเว้นในข้าว KDML105 ที่มีค่า E ต่ำเพียง 3.13  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ในขณะที่สภาพขาดน้ำรุนแรง ข้าว DH212 มีค่า E สูงที่สุด 8.43  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  สำหรับค่า  $g_s$  พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในทุกระดับการให้น้ำ โดยในสภาพให้น้ำปกติ ข้าว IR20 และเจ้าหอมนิล มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 1,039 และ 952  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำปานกลางข้าว IR20 มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 744  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  และในสภาพขาดน้ำรุนแรง ข้าวพันธุ์ DH212 และ IR20 มีค่า  $g_s$  สูงที่สุด 532 และ 526  $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ สำหรับค่า  $C_i$  พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในทุกระดับการให้น้ำ โดยในสภาพให้น้ำปกติ ข้าว IR20 มีค่า  $C_i$  สูงที่สุด 340  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ ในสภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวพันธุ์ IR20 และเจ้าหอมนิล มีค่า  $C_i$  สูงที่สุด 346 และ 345  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ และในสภาพขาดน้ำรุนแรง ข้าว IR20 มีค่า  $C_i$  สูงที่สุด 341  $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$  ส่วนค่า  $\Phi$ PSII ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำปานกลางและรุนแรง ข้าวทุกพันธุ์สามารถฟื้นตัวได้ดีจนทำให้ค่าใกล้เคียงกับในสภาพให้น้ำปกติ แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติ โดยข้าวไรซ์เบอร์รี่, เจ้าหอมนิล และ KDML105 ที่มีค่า  $\Phi$ PSII สูงที่สุด 0.28, 0.25 และ 0.25 ตามลำดับ สำหรับค่า ETR ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติและสภาพขาดน้ำรุนแรง แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำปานกลาง โดยข้าวไรซ์เบอร์รี่และเจ้าหอมนิลมีค่า ETR สูงที่สุด 148  $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$  ขณะที่ค่า Tleaf ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพขาดน้ำปานกลางและขาดน้ำรุนแรง แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งในสภาพให้น้ำปกติ โดยข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และ IR20 มีค่าอุณหภูมิใบต่ำที่สุด 30.1 และ 29.7 °C ตามลำดับ และค่า WUE ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าวในสภาพให้น้ำปกติและสภาพขาดน้ำปานกลาง แต่พบความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญยิ่งในสภาพขาดน้ำรุนแรง โดยข้าวพันธุ์ IR20 และ DH212 มีค่า WUE ต่ำที่สุดและค่าใกล้เคียงกับในสภาพให้น้ำปกติมีค่า 2.80 และ 2.18  $\mu\text{molCO}_2/\text{mmolH}_2\text{O}$  ตามลำดับ จากการตอบสนองของข้าวภายใต้สภาพขาดน้ำทั้งสองระดับ พบว่า ข้าวทุกสายพันธุ์สามารถฟื้นตัวด้านศักยภาพการสังเคราะห์แสงได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังคงต่ำกว่าสภาพปกติ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพันธุ์ข้าวพบว่า เจ้าหอมนิล ไรซ์เบอร์รี่ สีนเหล็ก และ DH212 มีการฟื้นตัวได้ดีกว่าข้าวดอกมะลิ และ IR20 พันธุ์ทดสอบที่อ่อนแอต่อสภาวะขาดน้ำ

**Table 2** Net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate (E), stomatal conductance ( $g_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration (Ci), light-adapted quantum efficiency of PSII

Varieties	$P_n$ ( $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )			E ( $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ )			$g_s$ ( $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ )			Ci ( $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )		
	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD
KDML105	21.7	15.6 b	-0.40 b	7.13	4.58 bc	0.93 bc	442 b	249 bc	36.6 bc	295 b	259	406 a
JHN	28.0	23.1 a	3.80 a	8.90	7.20 a	1.40 ab	638 ab	437 a	57.0 ab	311 ab	290	279 b
Riceberry	24.8	20.0 a	0.03 b	9.33	6.13 ab	0.70 c	496 b	325 ab	29.5 c	290 b	243	409 a
Sinlek	19.6	13.9 b	-0.43 b	7.35	3.70 c	1.48 a	525 b	182 c	60.7 a	317 a	258	387 a
IR20	23.2	14.8 b	-0.38 b	8.75	4.03 c	1.13 abc	778 a	189 c	47.4 abc	330 a	252	400 a
DH212	20.2	12.9 b	1.65 ab	7.40	4.33 c	1.43 ab	458 b	172 c	59.9 a	291 b	259	342 ab
F-test	ns	**	**	ns	**	*	*	**	*	**	ns	**
CV (%)	19.7	15.7	213	16.0	20.9	30.5	25.7	32.3	30.3	4.5	8.3	12.8
Mean	23.0 A	16.6 B	0.71 C	8.14 A	4.94 B	1.18 C	556 A	256 B	48.5 C	306 B	260 C	371 A

Varieties	$\Phi\text{PSII}$			ETR ( $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ )			Tleaf ( $^{\circ}\text{C}$ )			WUE ( $\mu\text{molCO}_2/\text{mmolH}_2\text{O}$ )		
	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD
KDML105	0.20	0.15	0.00	132	102	19.9	31.9 ab	33.1 bc	34.6	3.10	3.80	-0.63 b
JHN	0.23	0.20	0.08	147	119	54.7	30.8 bc	32.3 c	34.4	3.13	3.23	2.60 a
Riceberry	0.23	0.20	0.10	155	146	23.0	33.0 a	34.6 a	34.2	2.70	3.23	0.05 b
Sinlek	0.18	0.18	0.00	119	105	22.9	31.4 bc	33.3 abc	34.2	2.68	3.75	-0.30 b
IR20	0.20	0.18	0.08	121	101	32.4	30.2 c	33.5 abc	34.3	2.65	3.78	-0.50 b
DH212	0.18	0.13	0.10	127	110	40.9	30.8 bc	34.0 ab	34.3	2.70	3.05	1.20 ab
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	*
CV (%)	27.8	26.0	99.0	19.6	14.7	64.8	3.41	2.39	1.33	15.5	13.2	307
Mean	0.20 A	0.17 B	0.06 C	133 A	112 B	32.3 C	31.3 B	33.4 A	34.3 A	2.83 B	3.48 A	0.40 C

( $\Phi\text{PSII}$ ), electron transpiration rate (ETR), leaf temperature (Tleaf) and water use efficiency (WUE) of six rice varieties under control (CT), moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at 3 days after treatment.

Means with different uppercase denote significant difference among the three water conditions; different lowercase denote significant difference among rice varieties under the same conditions; \*, \*\* indicates significant difference among varieties at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively and ns indicates not significant difference.

**Table 3** Net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate (E), stomatal conductance ( $g_s$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ), light-adapted quantum efficiency of PSII ( $\Phi$ PSII), electron transpiration rate (ETR), leaf temperature ( $T_{leaf}$ ) and water use efficiency (WUE) of six rice varieties under control (CT), moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at 10 days after recovery.

Varieties	$P_n$ ( $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )			E ( $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ )			$g_s$ ( $\text{mmolH}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$ )			$C_i$ ( $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ )														
	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD												
KDML105	22.8	bc	10.6	c	14.7	c	7.63	b	3.13	b	3.20	e	469	c	166	e	163	c	297	c	279	d	237	e
JHN	28.7	a	12.7	c	23.1	a	9.78	a	6.90	a	4.07	de	952	a	554	b	257	c	326	b	345	a	234	e
Riceberry	22.5	bc	20.9	a	22.8	a	7.58	b	6.57	a	6.73	b	490	bc	401	d	406	b	302	c	293	c	281	c
Sinlek	21.4	c	19.4	a	23.9	a	8.15	b	6.93	a	6.33	bc	628	b	424	d	415	b	323	b	302	c	263	d
IR20	25.3	ab	17.0	b	14.6	c	10.3	a	6.10	a	5.20	cd	1,039	a	744	a	526	a	340	a	346	a	341	a
DH212	20.2	c	19.4	a	18.2	b	7.40	b	6.73	a	8.43	a	458	c	485	c	532	a	321	b	313	b	322	b
F-test	**		**		**		**		*		**		**		**		**		**		**		**	
CV (%)	11.0		6.96		7.87		9.28		17.8		15.0		14.4		6.71		15.8		2.76		2.28		4.06	
Mean	23.5	A	16.8	C	19.6	B	8.48	A	6.09	B	5.85	B	673	A	464	B	392	C	318	A	313	A	280	B

Varieties	$\Phi$ PSII			ETR ( $\mu\text{mole}/\text{m}^2/\text{s}$ )			$T_{leaf}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )			WUE ( $\mu\text{molCO}_2/\text{mmolH}_2\text{O}$ )														
	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD	CT	MWD	SWD												
KDML105	0.25	ab	0.20	0.20	155	103	c	160	31.8	a	30.5	30.4	2.98	3.43	4.60	b								
JHN	0.25	ab	0.20	0.20	160	148	a	153	30.1	c	32.2	30.4	2.95	1.80	5.70	a								
Riceberry	0.28	a	0.23	0.20	148	148	a	142	31.8	a	31.4	31.1	2.98	3.17	3.58	cd								
Sinlek	0.20	bc	0.20	0.23	126	116	bc	163	30.7	b	31.6	30.6	2.70	2.90	3.83	bc								
IR20	0.20	bc	0.20	0.20	131	123	b	114	29.7	c	30.3	30.5	2.45	3.50	2.80	de								
DH212	0.18	c	0.20	0.18	127	130	b	101	30.8	b	30.7	30.8	2.70	2.90	2.18	e								
F-test	*		ns		ns		**		ns		ns		ns		ns	**								
CV (%)	18.7		24.6		25.8		13.2		6.57		17.5		1.07		2.52		1.57		10.7		20.2		13.0	
Mean	0.23		0.21		0.20		141		128		137		30.8		31.1		30.7		2.79	B	2.95	B	3.69	A

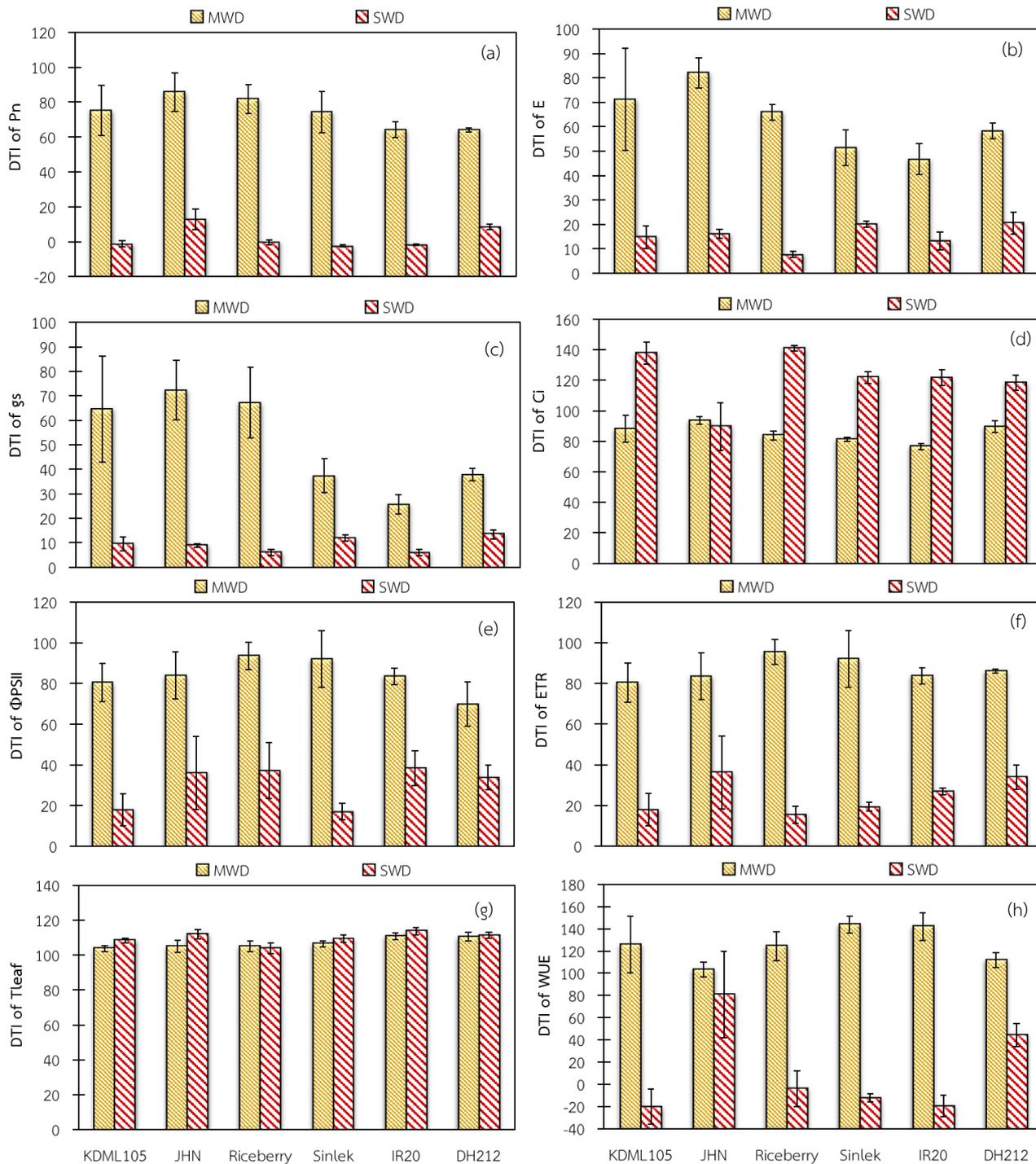
Means with different uppercase denote significant difference among the three water conditions; different lowercase denote significant difference among rice varieties under the same conditions;

\*, \*\* indicates significant difference among varieties at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively and ns indicates not significant difference.

### ดัชนีการทนแล้งของลักษณะทางสรีรวิทยา

ค่าดัชนีการทนแล้ง (Drought tolerance index; DTI) ใช้บ่งบอกถึงความทนทานต่อสภาวะขาดน้ำของข้าว จากการประเมินค่า DTI ของข้าวภายใต้สภาพขาดน้ำปานกลางและขาดน้ำรุนแรง พบว่า ค่า DTI ของ  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $\Phi PSII$ , ETR และ WUE ที่มีค่าสูงแสดงว่ามีความสามารถในการทนแล้งได้ดีกว่าพันธุ์ที่มีค่า DTI ต่ำ และค่า DTI ของ  $C_i$  และ Tleaf ที่มีค่าต่ำแสดงว่ามีความสามารถในการทนแล้งได้ดีกว่าพันธุ์ที่มีค่า DTI สูง จากการทดลองพบว่า ค่า DTI ของ  $P_n$  และ WUE มีค่าสูงในข้าวทุกพันธุ์ แสดงว่าข้าวทุกพันธุ์สามารถทนแล้งได้ดีในสภาพขาดน้ำปานกลาง แต่ในสภาพขาดน้ำรุนแรงพบว่า มีเพียงข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และ DH212 ที่สามารถทนแล้งได้ดี (Figure 3a,h) ค่า DTI ของ E มีค่าสูงในข้าวทุกพันธุ์ยกเว้นในข้าวพันธุ์ IR20 และสินเหล็ก และในสภาพขาดน้ำรุนแรงค่า DTI ลดต่ำลงมีค่าใกล้เคียงกันในข้าวทุกพันธุ์ (Figure 3b) ค่า DTI ของ  $g_s$  มีค่าสูงในข้าวพันธุ์ KDM105 เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ ตามลำดับแสดงว่ามีความสามารถทนแล้งได้ดีในสภาพขาดน้ำปานกลาง ในสภาพขาดน้ำรุนแรงข้าวพันธุ์สินเหล็ก และ DH212 สามารถทนแล้งได้ดี (Figure 3c) ค่า DTI ของ  $C_i$  มีค่าต่ำในข้าวทุกพันธุ์ แสดงว่าข้าวทุกพันธุ์สามารถทนแล้งได้ในสภาพขาดน้ำปานกลาง แต่พบว่า มีเพียงข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิลเท่านั้นที่ทนแล้งได้ดีในสภาพขาดน้ำรุนแรง (Figure 3d) ค่า DTI ของ  $\Phi PSII$  และ ETR มีค่าสูงใกล้เคียงกันในข้าวทุกพันธุ์และในสภาพขาดน้ำรุนแรงค่า DTI ลดต่ำลงมีค่าใกล้เคียงกันในข้าวทุกพันธุ์ (Figure 3e,f) และค่า DTI ของ Tleaf มีค่าต่ำในข้าวทุกพันธุ์ แสดงว่าข้าวทุกพันธุ์สามารถทนแล้งได้ในสภาพขาดน้ำปานกลาง แต่มีเพียงข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่เท่านั้นที่สามารถทนแล้งได้ดีในสภาพขาดน้ำรุนแรง (Figure 3g)

จากการประเมินความทนทานต่อสภาพขาดน้ำในข้าวด้วยดัชนีการทนแล้งของอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ แสดงให้เห็นว่าข้าวมีกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยาและการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน โดยข้าวที่สามารถทนแล้งได้หลายพารามิเตอร์จากการวัดอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สระดับใบ คือ ข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และ DH212 รองลงมาเป็นข้าวพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่ KDM105 และสินเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้าวที่ทดสอบมีดัชนีการทนแล้งในบางลักษณะสูงกว่าและบางลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้าวพันธุ์ทนแล้งที่ใช้เปรียบเทียบอย่าง DH212 และพบว่าข้าวพันธุ์ IR20 ซึ่งเป็นพันธุ์อ่อนแอต่อภาวะขาดน้ำมีค่า DTI ที่ต่ำ จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ข้าวที่ศึกษาในการทดลองนี้มีลักษณะทางสรีรวิทยาที่สามารถทนทานต่อความแห้งแล้งได้เมื่อเทียบกับพันธุ์เปรียบเทียบ ซึ่งนอกจากงานวิจัยนี้ยังมีรายงานการใช้ค่าดัชนีความทนทานเพื่อประเมินความทนทานต่อสภาวะขาดน้ำของพันธุ์ข้าวนาสวนและสามารถใช้จำแนกพันธุ์ข้าวที่ทนทานและอ่อนแอต่อสภาวะขาดน้ำได้ (Hussain et al., 2021)



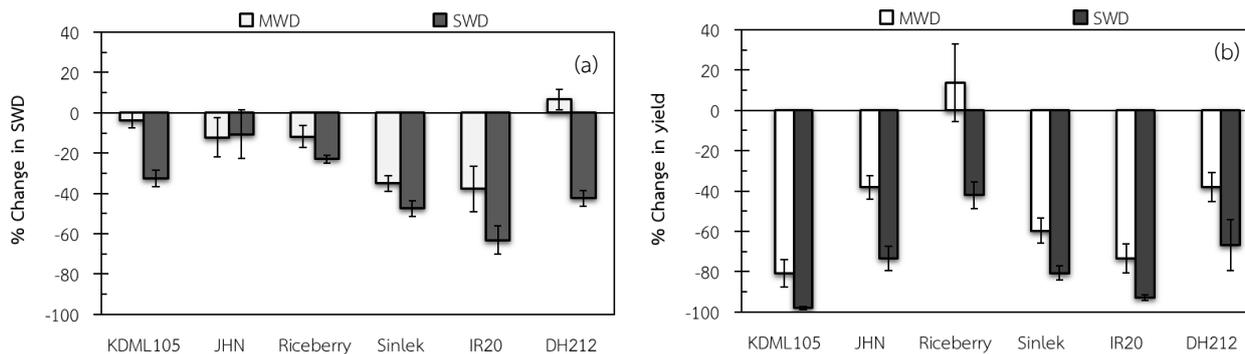
**Figure 3** Drought tolerance index (DTI) of six rice varieties under moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at 3 days after treatment: (a) DTI of net photosynthetic rate ( $P_n$ ); (b) transpiration rate (E); (c) stomatal conductance ( $g_s$ ); (d) intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ); (e) light-adapted quantum efficiency of PSII ( $\Phi_{PSII}$ ); (f) electron transpiration rate (ETR); (g) leaf temperature ( $T_{leaf}$ ); (h) water use efficiency (WUE). The error bars represent  $\pm$  SE

### การประเมินความทนทานของพันธุ์ข้าวจากน้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิต

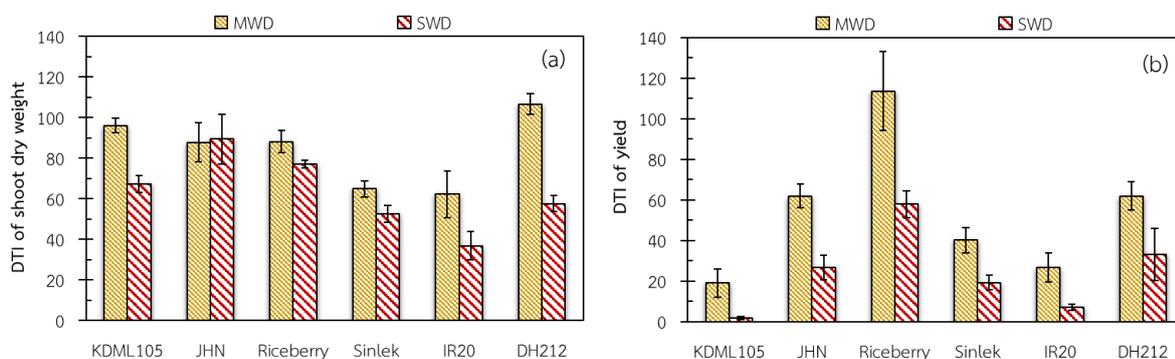
การประเมินความทนทานต่อสภาพขาดน้ำจากเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพและผลผลิตของข้าวในสภาพขาดน้ำ พบว่าการสะสมน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดิน (SDW) หรือน้ำหนักมวลชีวภาพของข้าวลดลงตามระดับความรุนแรงของการขาดน้ำ (Figure 4) ในสภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวพันธุ์ DH212 KDML105 เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ -6.6, 3.9, 11.8 และ 12.2% ตามลำดับ ส่วนในสภาพขาดน้ำรุนแรงพบว่า เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่มีเปอร์เซ็นต์การลดลงของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 10.6 และ 22.9% ตามลำดับ ซึ่งลดลงน้อยกว่า DH212 ที่เป็นพันธุ์ทนแล้ง สำหรับการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตข้าว พบว่าไรซ์เบอร์รี่และเจ้าหอมนิลมีเปอร์เซ็นต์การลดลงของผลผลิตต่ำที่สุด และจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับ DH212 สอดคล้องกับพารามิเตอร์อัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส เช่น อัตราสังเคราะห์แสง และค่าน้ำไหลปากใบ

การประเมินความทนแล้งของข้าวจากดัชนีการทนแล้ง (DTI) ของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพและผลผลิต พบว่าภายใต้สภาพขาดน้ำปานกลาง ข้าวพันธุ์ KDML105, DH212, เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ มี DTI ของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพสูงที่สุด แต่เมื่อขาดน้ำรุนแรงมีเพียงข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่ที่มี DTI ของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพสูงที่สุด (Figure 5a) นอกจากนี้ ยังพบว่าภายใต้สภาพขาดน้ำปานกลาง และขาดน้ำรุนแรง ข้าวพันธุ์ DH212 มี DTI ของผลผลิตสูงที่สุดทั้งสองระดับน้ำ (Figure 5b) แต่เมื่อพิจารณาในข้าวพันธุ์ไทย พบว่าข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่มี DTI ของผลผลิตสูงทั้งสองระดับน้ำ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาจากดัชนีการทนแล้งของน้ำหนักรวมมวลชีวภาพและผลผลิต ข้าวพันธุ์ทนแล้งที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ DH212 แสดงถึงการทนแล้งอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับพันธุ์ IR20 ที่เป็นพันธุ์อ่อนแอ และเมื่อพิจารณาจากดัชนีการทนแล้งของข้าวพันธุ์ไทย การศึกษานี้ได้ชี้ให้เห็นว่าข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิลและไรซ์เบอร์รี่มีความสามารถในการทนแล้งสูง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสรีรวิทยาร่วมกับผลผลิตและน้ำหนักรวมมวลชีวภาพ พบว่าสอดคล้องกันคือ ข้าวพันธุ์เจ้าหอมนิล และไรซ์เบอร์รี่ แสดงความทนทานต่อสภาพเครียดจากการขาดน้ำในสภาพขาดน้ำปานกลางและรุนแรงได้และอยู่ในกลุ่มเดียวกับ DH212 ที่เป็นพันธุ์ทนแล้ง โดยสามารถรักษาสถานะน้ำในต้น ทำให้ยังคงสามารถสังเคราะห์แสงหรือสร้างอาหารได้ในสภาพขาดน้ำและมีการฟื้นตัวหลังได้รับน้ำกลับคืนได้ดี ทำให้การลดลงของผลผลิตและชีวมวลต่ำกว่าพันธุ์ที่อ่อนแอได้แก่ IR20 สอดคล้องกับการศึกษาของ Anjum et al. (2011) และ Chaum et.al. (2010) ที่พบว่าการขาดน้ำทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ rubisco ในกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง ทำให้อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิลดลงและส่งผลกระทบต่อผลผลิต นอกจากนี้ Farooq et al. (2010) ยังพบว่าความเครียดจากภัยแล้งทำให้การเจริญเติบโตและการพัฒนาของข้าวลดลง การแตกกอต่ำ ความสูงของต้นและมวลชีวภาพลดลง



**Figure 4** Percentage change (% Change) of six rice varieties under moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at harvesting stage: (a) % Change in shoot dry weight (SWD); (b) % Change in yield. The error bars represent ± SE



**Figure 5** Drought tolerance index (DTI) of six rice varieties under moderate water deficit (MWD) and severe water deficit (SWD) at harvesting stage: (a) DTI of shoot dry weight; (b) DTI of yield. The error bars represent ± SE

**Table 4** Correlation coefficients (r) between shoot dry weight (SDW) and yield with leaf gas exchange parameters (n = 18)

Parameters	$P_n$	E	$g_s$	$C_i$	$\Phi_{PSII}$	ETR	$T_{leaf}$	$WUE_{leaf}$
SDW	0.44 ns	0.47 *	0.43 ns	-0.34 ns	0.44 ns	0.48 *	-0.42 ns	0.40 ns
Yield	0.82 **	0.83 **	0.84 **	-0.31 ns	0.79 **	0.75 **	-0.72 **	0.50 *

ns; non-significant, \*, significant for  $P < 0.05$ , \*\*, significant for  $P < 0.01$

**Table 5** Correlation coefficients (r) between drought tolerance index (DTI) of shoot dry weight (SDW) and yield with leaf gas exchange parameters (n=12)

Parameters	$P_n$	E	$g_s$	$C_i$	$\Phi PSII$	ETR	$T_{leaf}$	WUE <sub>leaf</sub>
DTI of SDW	0.64 *	0.65 *	0.69 *	-0.52 ns	0.52 ns	0.57 ns	-0.55 ns	0.60 *
DTI of Yield	0.56 ns	0.51 ns	0.59 *	-0.36 ns	0.57 ns	0.55 ns	-0.48 ns	0.46 ns

ns; non-significant, \*, significant for  $P < 0.05$ , \*\*, significant for  $P < 0.01$

**ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตกับอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าว**

จากการวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพกับอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าวภายใต้สภาวะการขาดน้ำ พบความสัมพันธ์ต่ำในเชิงบวกระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพกับ E ( $r = 0.47^*$ ) และระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพกับ ETR ( $r = 0.48^*$ ) (Table 4) และพบความสัมพันธ์สูงในเชิงบวกระหว่างผลผลิตกับ  $P_n$  ( $r = 0.82^{**}$ ) ระหว่างผลผลิตกับ E ( $r = 0.83^{**}$ ) ระหว่างผลผลิตกับ  $g_s$  ( $r = 0.84^{**}$ ) ระหว่างผลผลิตกับ  $\Phi PSII$  ( $r = 0.79^{**}$ ) ระหว่างผลผลิตกับ ETR ( $r = 0.75^{**}$ ) ระหว่างผลผลิตกับ WUE ( $r = 0.50^*$ ) และยังพบความสัมพันธ์สูงในเชิงลบระหว่างผลผลิตกับ  $T_{leaf}$  ( $r = -0.72^{**}$ ) นอกจากนี้ การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีการทนแล้ง (DTI) ของน้ำหนักมวลชีวภาพกับอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าวภายใต้สภาวะการขาดน้ำ พบความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่าง DTI น้ำหนักมวลชีวภาพกับ  $P_n$  ( $r = 0.64^*$ ) ระหว่าง DTI น้ำหนักมวลชีวภาพกับ E ( $r = 0.65^*$ ) ระหว่าง DTI น้ำหนักมวลชีวภาพกับ  $g_s$  ( $r = 0.69^*$ ) และระหว่าง DTI น้ำหนักมวลชีวภาพกับ WUE ( $r = 0.60^*$ ) (Table 5) สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง DTI ของผลผลิตกับลักษณะอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สของใบข้าว พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง DTI ผลผลิตกับ  $g_s$  ( $r = 0.59^*$ ) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเมื่อข้าวมีอัตราการคายน้ำและอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนสูงมีความสัมพันธ์กับการสร้างน้ำหนักมวลชีวภาพที่สูง การเปิดปากใบมากหรือค่าน้ำไหลสูง การสังเคราะห์แสง การคายน้ำ ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสงสองในสภาพมีแสง การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน และประสิทธิภาพการใช้น้ำในพืชที่สูงด้วย และทำให้อุณหภูมิใบต่ำเพราะมีการระบายความร้อนในต้นพืชได้ดี ลักษณะเหล่านี้ของข้าวจึงมีความสัมพันธ์กับการมีผลผลิตที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับที่มีรายงานว่า การสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นตัวกำหนดหลักของผลผลิตและมวลชีวภาพในพืช เพราะมีการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีและสร้างอาหารสะสมไว้ที่ส่วนต่างๆของพืช (Long et al., 2005) นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า อัตราการสังเคราะห์แสง ค่าน้ำไหลปากใบ และอุณหภูมิทรงพุ่มที่เย็นลงมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลผลิตในข้าวสาลี (Fischer et al., 1998) จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า น้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตของข้าวมีความสัมพันธ์กับลักษณะทางสรีรวิทยาที่ประเมินได้จากอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สบางลักษณะ ดังนั้น  $P_n$ , E,  $g_s$ ,  $\Phi PSII$ , ETR, WUE และ  $T_{leaf}$  จึงสามารถใช้เป็นลักษณะเพื่อประเมินความทนแล้งของพันธุ์ข้าว ซึ่งเคยมีรายงานการศึกษาการวัดอัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สในการทดสอบของข้าวภายใต้สภาพขาดน้ำจากลักษณะ  $P_n$  และ  $g_s$  (Centritto et al., 2009) นอกจากนี้ยังมีรายงานของ วสันต์ และคณะ (2563) ที่ศึกษาการตอบสนองของปากใบและกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะขาดน้ำจากลักษณะหลายลักษณะอาทิ  $P_n$ , E,  $g_s$  และ ETR แต่ยังไม่พบในเชิงการนำมาประยุกต์ใช้ในการคัดเลือกพันธุ์ทนแล้งมากนัก

**สรุป**

อิทธิพลของการขาดน้ำส่งผลต่ออัตราการแลกเปลี่ยนแก๊สทำให้ค่าอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิ ( $P_n$ ) อัตราการคายน้ำ (E) ค่าน้ำไหลปากใบ ( $g_s$ ) ประสิทธิภาพการใช้แสงของระบบรับแสงสองในสภาพมีแสง ( $\Phi PSII$ ) อัตราเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) และประสิทธิภาพการใช้น้ำ (WUE) ลดลง ในขณะที่ค่าความเข้มข้น  $CO_2$  ในช่องว่างใบ ( $C_i$ ) และอุณหภูมิใบ ( $T_{leaf}$ ) มีค่าเพิ่มสูงขึ้น การขาดน้ำยังทำให้น้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตลดลงในข้าวทุกสายพันธุ์ ระดับความรุนแรงของการขาดน้ำส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและผลผลิตมาก จากการประเมินความทนทานต่อความแห้งแล้งของพันธุ์ข้าวจากค่า  $P_n$ , E และ  $g_s$  ร่วมกับน้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิต พบว่าข้าวไรซ์เบอร์รี่และเจ้าหอมนิลทนทานต่อการขาดน้ำได้ดีทั้งในสภาพขาดน้ำปานกลางและขาดน้ำรุนแรงสำหรับข้าวพันธุ์สินเหล็กและขาวดอกมะลิ 105 ค่อนข้างอ่อนแอต่อสภาพขาดน้ำแต่ทนมากกว่าข้าวพันธุ์ IR20 นอกจากนี้ยังพบ

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักมวลชีวภาพและผลผลิตข้าวกับลักษณะทางสรีรวิทยาจากการวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สในใบ โดยมีพารามิเตอร์  $P_n$ ,  $E$  และ  $g_s$  ที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงที่สุด ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความทนแล้งและประเมินผลผลิตข้าวในสภาพขาดน้ำได้

### คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักงานปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และขอขอบคุณแปลงวิจัยศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว และภาควิชาพืชไร่ฯ คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ที่อนุเคราะห์ให้ใช้พื้นที่และโรงเรือนเพื่อเป็นสถานที่ในการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- กรมการข้าว. 2559. องค์ความรู้เรื่องข้าว: พันธุ์ข้าว. แหล่งข้อมูล: <http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/index.htm>. ค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2563.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. 2565. ระบบสารสนเทศการผลิตทางการเกษตร: รายงานข้อมูลภาวะการผลิตพืช. แหล่งข้อมูล: <https://production.doae.go.th/data-state-location/index>. ค้นเมื่อ 1 พฤศจิกายน 2565.
- ธีระรัตน์ อุบลรัตน์, เกศราภรณ์ จันทร์ประเสริฐ และวาสิณี พงษ์ประยูร. 2560. การตอบสนองด้านสรีรวิทยาและจัดกลุ่มข้าวหอมพันธุ์ไทย 4 พันธุ์ต่อภาวะเครียดจากความเค็มจากเกลือโซเดียมคลอไรด์. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 22(2): 233-247.
- นวรรตน์ อุดมประเสริฐ. 2558. สรีรวิทยาของพืชภายใต้สภาวะเครียด. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- ปริญานุช ลาขุนทด, ปิยะดา ธีระกุลพิศุทธิ์, จิรวัดน์ สนิทชน และโจนาทิสชา แอล เชียงหลิว. 2558. ผลของการขาดน้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำในใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่โครโมโซม 9 บางส่วนถูกแทนที่ด้วยยีนทนแล้ง. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 15(3): 46-55.
- พลอยพิศ เพ็ญพิมพ์, คัทลียา ฉัตรเที่ยง, ลพ ภาณุตานนท์, วินัย อุดขาว, ศิริพรรณ สุขขัง และสมนึก พรหมแดง. 2565. การตอบสนองของปากใบและกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะเครียดจากเกลือที่ชักนำด้วยโซเดียมคลอไรด์ของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในระยะแตกกอ. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 53(1): 77-93.
- วสันต์ ปานนิม, คัทลียา ฉัตรเที่ยง, วินัย อุดขาว, ศิริพรรณ สุขขัง, สมนึก พรหมแดง และสุนทรียิ่งชัชวาลย์. 2563. การตอบสนองของปากใบและกระบวนการสังเคราะห์แสงภายใต้สภาวะขาดน้ำจากการชักนำด้วยสารพอลิเอทิลีนไกลคอลของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 (*Oryza sativa* L. ssp. *indica* cv. KDML105) ในระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 51(2): 90-106.
- ศรีสังวาลย์ ปลายวิเศษกุล และสุนทรียิ่งชัชวาลย์. 2554. อิทธิพลของความเข้มแสงต่อจุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์และประสิทธิภาพการบอกซิเลชันของใบผักโขม. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 42(2): 203-210.
- ศูนย์วิทยาศาสตร์ข้าว. 2560. งานวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าว. แหล่งข้อมูล: <https://dna.kps.ku.ac.th/index.php/research-develop/rice-breeding-lab>. ค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2563.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2565. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร: ตารางแสดงรายละเอียดข้าวนาปี. แหล่งข้อมูล: <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/rice%20varieties%2064.pdf>. ค้นเมื่อ 1 ตุลาคม 2565.
- สุนทรียิ่งชัชวาลย์, จินตณา บางจั่น และภูริพงศ์ คำรงวุฒิ. 2544. พลังงานน้ำในรอบวันของใบส้มเขียวหวาน. น. 45-61. ใน: รายงานโครงการพัฒนาวิชาการข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาของส้มเขียวหวาน. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.
- Anjum, S.A., X. Xie, L. Wang, M.F. Saleem, C. Man, and W. Lei. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agricultural Research. 6(9): 2026–2032.
- Boyer, J.S. 1995. Measuring the Water Status of Plants and Soils. Academic Press, Inc.

- Centritto, M., M. Lauteri, M.C. Monteverdi, and R. Serraj. 2009. Leaf gas exchange carbon isotope discrimination, and grain yield in contrasting rice genotypes subjected to water deficits during the reproductive stage. *Journal of Experimental Botany*. 60(8): 2325-2339.
- Cha-um, S., S. Yooyongwech, and K. Supaibulwatana. 2010. Water stress in the reproductive stage of four indica rice genotypes. *Pakistan Journal of Botany*. 42: 3387-3398.
- Dhansu, P., N. Kulshreshtha, R. Kumar, A.K. Raja, S.K. Pandey, V. Goel, and B. Ram. 2021. Identification of Drought-Tolerant Co-canes Based on Physiological Traits, Yield Attributes and Drought Tolerance Indices. *Sugar Tech*. 23(4): 747-761.
- Farooq, M., N. Kobayashi, O. Ito, A. Wahid, and R. Serraj. 2010. Broader leaves result in better performance of indica rice under drought stress. *Journal of Plant Physiology*. 13: 1066-1075.
- Fischer, R.A., D. Rees, K.D. Sayre, Z.M. Lu, A.G. Condon, and A.L. Saavedra. 1998. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. *Crop Science*. 38: 1467-1475.
- Foley, J.A., N. Ramankutty, K.A. Brauman, E.S. Cassidy, J.S. Gerber, N.D. Johnston, N.D. Mueller, C. O'Connell, D.K. Ray, P.C. West, and C. Balzer. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*. 478: 337-342.
- Hussain, T., N. Hussain, M. Ahmed, C. Nualsri, and S. Duangpan. 2021. Responses of lowland rice genotypes under terminal water stress and identification of drought tolerance to stabilize rice productivity in Southern Thailand. *Plants*. 10(12): 2565.
- Jain, R., A. Singh, S. Singh, S.P. Singh, V.K. Srivastava, A. Chandra, A.D. Pathak, and S. Solomon. 2017. Physio-Biochemical Characterization of Sugarcane Genotypes for Waterlogging Tolerance. *World Journal of Agricultural Sciences*. 13(2): 90-97.
- Kumar, A., S. Dixit, T. Ram, R.B. Yadaw, K.K. Mishra, and N.P. Mandal. 2014. Breeding high-yielding drought-tolerant rice: Genetic variations and conventional and molecular approaches. *Journal of Experimental Botany*. 65(21): 6265-6278.
- LI-COR Inc. 2002. LI-6400 system Photosynthesis, Fluorescence, Respiration. Printed in the U.S.A.
- Long, S.P., X.G. Zhu, S.L. Naidu, C.A. Raines, and D.R. Ort. 2005. Limits to efficiencies of primary production-constraints and opportunities. In *Yields of farmed species: constraints and opportunities in the 21<sup>st</sup> century*, pp. 167-191. In proceedings of a University of Nottingham Easter School Series, June 2004. Sutton Bonington, UK.
- Malumpong, C., S. Cheabu, C. Mongkolsiriwatana, W. Detpittayanan, and A. Vanavichit. 2019. Spikelet fertility and heat shock transcription factor (Hsf) gene responses to heat stress in tolerant and susceptible rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *The Journal of Agricultural Science*. 157(4): 283-299.
- Ohashi, Y., N. Nakayama, H. Saneoka, P.K. Mohapatra, and K. Fujita. 2009. Differences in the responses of stem diameter and pod thickness to drought stress during the grain filling stage in soybean plants. *Acta Physiologiae Plantarum*. 31(2): 271-277.
- Pandey, V., and A. Shukla. 2015. Acclimation and tolerance strategies of rice under drought stress. *Rice science*. 22(4): 47-161.
- Pitaloka, M.K., R.S. Caine, C. Hepworth, E.L. Harrison, J. Sloan, C. Chutteang, C. Phunthong, R. Nongngok, T. Toojinda, S. Ruengphayak, S. Arikrit, J.E. Gray, and A. Vanavichit. 2022. Induced genetic variations in stomatal density

- and size of rice strongly affects water use efficiency and responses to drought stresses. *Frontiers in Plant Science*. 13.
- Raman, A., S.B. Verulkar, N.P. Mandal, M. Variar, V.D. Shukla, L. Dwivedi, B.N. Singh, O.N. Singh, P. Swain, A.K. Mall, S. Robin, R. Chandrababu, A. Jain, T. Ram, S. Hittalmani, S. Haefele, H.P. Piepho, and A. Kumar. 2012. Drought yield index to select high yielding rice lines under different drought stress severities. *Rice*. 5(31): 1–12.
- Roonprapant, P., A. Arunyanark, and C. Chutteang. 2021. Morphological and physiological responses to water deficit stress conditions of Robusta coffee (*Coffea canephora*) genotypes in Thailand. *Agriculture and Natural Resources*. 55(3): 473-484.
- Rungrat, T., and C. Poothab. 2019. Short-term water deficit stress induces anthocyanin accumulation and changes in grain yield and yield components in colored rice grain. *Agriculture and Natural Resources*. 53(3): 292-297.
- Spectrum technologies, Inc. 2017. Field scout TRD150 Soil Moisture Meter, product manual. Printed in the U.S.A.
- Taiz, L., and E. Zeiger. 2002. *Plant physiology*. 3<sup>rd</sup> Edition. Sinauer Associates, Inc.
- Wang, J.H., L.H. Geng, and C.M. Zhang. 2012. Research on the weak signal detecting technique for crop water stress based on wavelet denoising. *Advanced Materials Research*. 424/425: 966–970.
- Yang, X., B. Wang, and L. Chen. 2019. The different influences of drought stress at the flowering stage on rice physiological traits grain yield and quality. *Scientific Reports*. 9: 3742.