วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

Journal Home Page : https://li01.tci-thaijo.org/index.php/agkasetkaj

ผลของแสงธรรมชาติและแสงจาก light-emitting diode (LED) ต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและลักษณะอื่นที่เกี่ยวข้องในข้าว

Effects of natural light and light-emitting diode (LED) light on photosynthetic efficiency and other related parameters in rice

เทพสุดา รุ่งรัตน์[1]* และ ณัฐชัย แถวอุทุม[1]

Tepsuda Rungrat[1]* and Nattachai Thaw-U-Thum[1]

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

[1] Department of Agricultural Science, Faculty of Agriculture, Natural Resources and Environment Naresuan University, Mueang, Phitsanulok 65000, Thailand

บทคัดย่อ: การศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการปลูกข้าวภายใต้แสงธรรมชาติและแสง light-emitting diode (LED) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง และลักษณะอื่นที่เกี่ยวข้องในข้าวพันธุ์ไทย วางแผนการทดลองแบบ split plot in complete randomized design (split plot in CRD) จำนวน 5 ซ้ำ โดยมีปัจจัยหลักคือแหล่งกำเนิดแสง 2 ประเภท คือ แสงจากธรรมชาติ (700-950 μmol/m^2/s) และ แสง LED (850-1,000 μmol/m^2/s) ปัจจัยรองคือ พันธุ์ข้าว 5 พันธุ์ ได้แก่ ไรซ์เบอรี่ (RB), กข10 (RD10), ชัยนาท1 (CN1), พิษณุโลก2 (PSL2) และหอมสุพรรณบุรี (HOM-SP) จากผลการทดลองพบว่า ข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED แสดงค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด (Fv/Fm) ได้สูงกว่า โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.788 เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในสภาวะแสงธรรมชาติ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.72 ค่าความเขียวใบ (SPAD) ของข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED มีค่ามากกว่าต้นข้าวที่ปลูกในสภาพแสงธรรมชาติ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 43.75 และ 33.85 SPAD unit ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย คลอโรฟิลล์ *a*, *b* และ คลอโรฟิลล์รวม มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพันธุ์ข้าว และระหว่างสภาพการให้แสง พบความแปรปรวนของปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* ในข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED มากกว่าแสงธรรมชาติในพันธุ์ HOM-SP RBและ RD10 ลักษณะของอัตราการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (ETR) ในข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED และแสงธรรมชาติมีความแตกต่างกัน โดยต้นข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED มีค่า ETR สูงกว่าการปลูกภายใต้แสงธรรมชาติ โดยมีค่าระหว่าง 2.98 – 186.82 μmol/m^2/s และ 1.416 – 88.169 μmol/m^2/s ตามลำดับ จากการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าแสง LED มีอิทธิพลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและลักษณะอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงในข้าว เช่นเดียวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวและสภาพแวดล้อม

คำสำคัญ: แสงธรรมชาติ; แสง LED; ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง; ข้าว; คลอโรฟิลล์

ABSTRACT: The objective of this study was to investigate the effect of natural light and light-emitting diode (LED) on photosynthetic efficiency and chlorophyll contents of five commercial rice varieties. The experiment was laid out in split plot in complete randomized design (split plot in CRD) with 5 replications.The main plot was the growth conditions (natural light (700-950 μmol/m^2/s) and LED light (850-1,000 μmol/m^2/s), and the sub plot was five rice varieties including Rice Berry (RB), RD10, Chainat1 (CN1), Phitsanulok2 (PSL2), and Hom-Supanburi (HOM-SP). The results showed that plants grown under LED exhibited a greater performance in maximum quantum efficiency of photosystem II (Fv/Fm) with an average of 0.788 in comparison to plant grown under natural light (Fv/Fm=0.72). The greenness of rice leaf grown under LED was higher than under natural light condition with the average of 43.75 and 33.85 SPAD unit, respectively. Chlorophyll *a*, *b*, and total chlorophyll contents showed significantly differences among varieties and between the growth conditions. The variation of chlorophyll a and b contents in rice leaves

* Corresponding author: tepsudar@nu.ac.th

Received: date; August 31, 2020 Accepted: date; March 1, 2021 Published: date; October 5, 2021

was higher under LED than natural light in HOM-SP, RB, and RD10. The result for the electron transport rate (ETR) showed that there was different between LED and natural grown plants. Plants grown under LED light showed a much higher ETR than natural light plant with the ETR ranging between 2.98 – 186.82 μmol/m^2/s and 1.416 – 88.169 μmol/ m^2 / s, respectively. There is variation of traits in response to light source which tends to improve photosynthetic efficiency significantly, as well as the interaction between genetic and environment.
Key words: natural light; LED light; Photosynthetic efficiency; rice; chlorophyll

บทนำ

ข้าวมีบทบาทสำคัญทางเศรษฐกิจของไทยและมีบทบาทอย่างมากต่อสังคมไทย โดยพื้นที่ปลูกข้าวของไทยคิดเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นที่เพาะปลูกของทั้งประเทศ โดยรัฐบาลมีนโยบายจะเพิ่มพื้นที่ที่จะผลิตอีก 5 แสนเฮกต้าร์ จากที่มีอยู่ในปัจจุบัน 9.2 ล้านเฮกตาร์ เพื่อที่จะเพิ่มการส่งออกข้าวให้มากกว่าปีที่ผ่านมา ในการส่งออกข้าวในประเทศไทยมีแนวโน้มในการส่งออกเพิ่มมากขึ้น โดยมีอัตราการส่งออกในแต่ละปีตั้งแต่ ปี พ.ศ.2558 - 2560 มีปริมาณการส่งออก 9.79, 9.88 และ 11.48 ล้านตันต่อปีตามลำดับ แต่ในปี พ.ศ. 2562 คาดว่าจะมีการส่งออกข้าวที่ลดลงเนื่องจากมีปริมาณการผลิตข้าวลดลง ซึ่งทางรัฐบาลมีการระบายข้าวในสต็อกออกไปหมดแล้วในปีที่ผ่านมา (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2562)

ในปัจจุบัน Light Emitting Diode (LED) มีบทบาทมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความจำเป็นที่ต้องผลิตอาหารให้เพิ่มขึ้น 50% ภายในปี 2020 เพื่อให้เพียงพอต่อการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก (Yamori et al., 2014) ดังนั้นการนำเทคโนโลยี plant factories คือการปลูกพืชในระบบปิด เข้ามาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตต่อปีให้เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเพิ่มคุณภาพและปริมาณของสารออกฤทธิ์สำคัญทางชีวภาพ และสารต้านอะนุมูลอิสระในพืชบางชนิดได้ เช่นน้ำตาล แป้ง วิตตามินซี โปรตีน โพลีฟีนอล แอนโทไซนานิน และเบต้าแคโรทีน (Hasan et al., 2017) จึงได้รับความนิยมในหลายประเทศ การปลูกพืชในระบบปิดนั้น จำเป็นต้องให้แสงเพื่อให้พืชมีการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้ และมีการพิสูจน์แล้วว่าสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้ดี คือการใช้หลอดกำเนิดแสงแบบ LED เพื่อใช้ทดแทนแหล่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ (Kozai, 2013) จากการศึกษาการใช้แสง LED เพื่อเพิ่มคุณภาพและผลผลิตในผักสลัด โดยใช้แสงสีแดง สีน้ำเงินและสีขาว พบว่าจะมีการเพิ่มผลผลิตได้มากที่สุดคือการใช้แสงสีแดงและแสงสีน้ำเงินในสัดส่วน 90R/10B (Wojciechowska et al., 2015) นอกจากนี้ Zhang et al. (2016) ได้ศึกษาผลของ LED แสงสีเขียวต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณผลผลิต พบว่าการให้ LED ในสัดส่วนแสงสีแดง 50 % แสงสีน้ำเงิน 25 % และแสงสีเขียว 25 % ในระยะกล้าสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตทางลำต้น ใบ และราก ในระยะการแตกกอ และมีผลต่อปริมาณผลผลิต ปริมาณคลอโรฟิลล์ และ ค่าการสะท้อนแสงของคลอโรฟิลล์ในขณะที่การให้แสงสีเขียวที่ความเข้มข้นต่ำไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวในระยะแตกกอ และการให้ผลผลิต Chen et al. (2014) รายงานว่าการใช้ LED สีแดงร่วมกับสีน้ำเงินสามารถกระตุ้นให้ต้นกล้าข้าวสร้างสารแอนโทไซยานินในใบข้าวได้ นอกจากนี้ แสง LED ยังส่งเสริมให้ต้นข้าวมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูงสุดเพิ่มสูงขึ้น

การศึกษาการสะท้อนแสงของคลอโรฟิลล์ (chlorophyll fluorescence) เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาแสงของพืช (light reaction) ในระบบแสง 2 (photosystem II, PSII) และสามารถใช้อธิบายการส่งผ่านอิเล็กตรอนของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Misra et al., 2012; นงลักษณ์ และคณะ, 2557 ซึ่งเมื่อพืชดูดรับแสงด้วยเนื้อเยื่อในส่วนของไทลาคอย์ พลังงานแสงจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาเคมี (photochemistry) บางส่วนจะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของพลังงานความร้อน (heat) และพลังงานบางส่วนจะสะท้อนออกมาในรูปแบบของchlorophyll fluorescence (Krause and Weis, 1991) ในพืชสีเขียวนั้นการวัดค่า chlorophyll fluorescence สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิการสังเคราะห์ด้วยแสง การถ่ายทอดอิเล็กตรอน และการทำงานของ PS II ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของพืชนั้นๆ และความผิดปกติของพืชที่เกิดจากปัจจัยต่างๆ ได้ (Krause and Weis, 1991; Pedrós et al., 2008; Baker, 2008; Rungrat et al., 2016) การใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่า chlorophyll fluorescence เพื่อการประเมินศักยภาพของต้นพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาพการเจริญเติบโตที่ไม่เหมาะสมจึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และจัดว่าเป็นหนึ่งในเทคนิคที่มีความสำคัญสำหรับงานวิจัยด้านสรีรวิทยาพืช (Baker, 2008; Brown et al., 2014) นอกจากนี้การวัดค่า chlorophyll fluorescence สามารถทำได้โดยไม่ทำลายตัวอย่างในระหว่างการเก็บข้อมูล

ดังนั้น การศึกษาถึงอิทธิพลของสภาวะการปลูกภายใต้แสงธรรมชาติและแสง LED ต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของข้าวไทยจำนวน 5 พันธุ์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ค่า chlorophyll fluorescence ด้วยเครื่อง PAR fluoro meter และการประเมินค่าความเขียวใบพืชด้วยเครื่อง SPAD meter มาประยุกต์ใช้ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของพืชอย่างรวดเร็ว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตข้าว รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสารสำคัญในข้าวสำหรับการผลิตข้าวในระบบกึ่งปิดในอนาคตต่อไป

วิธีการศึกษา

พันธุ์ข้าว การปลูก และการจำลองสภาพแสง

วางแผนการทดลองแบบ split plot in completely randomized design (split plot in CRD) จำนวน 5 ซ้ำ โดยมีปัจจัยหลักคือรูปแบบการให้แสง 2 แบบ คือ แสงธรรมชาติ (natural light) และ แสง LED ปัจจัยรองคือ พันธุ์ข้าว จำนวน 5 พันธุ์ คือ ไรซ์เบอรี่ (RB) กข10 (RD10) ชัยนาท1 (CN1) พิษณุโลก2 (PSL2) หอมสุพรรณบุรี (Hom-SP) โดยพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลองคัดเลือกจากลักษณะข้าวไม่ไวแสง มีศักยภาพการให้ผลผลิตที่ดี และเป็นที่นิยมของเกษตรกรในเขตภาคเหนือตอนล่าง ทำการเพาะกล้าข้าวในถาดหลุม เมื่อข้าวมีอายุได้ 25 วัน ทำการย้ายปลูกลงกระถางพลาสติกก้นปิด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกปากกระถาง 30 ซม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกก้นกระถาง 17.5 ซม. ความสูง 22 ซม. ที่บรรจุดินเหนียวจำนวน 5 กก./กระถาง จำนวน 1 ต้น/กระถาง ใส่ธาตุอาหารเพิ่มเติมเพื่อให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ ในอัตราส่วนดังนี้ 100 มก. N, 50 มก. P และ 50 มก. K /ดิน 1 กก. โดยใช้ปุ๋ยสูตร 46-0-0 ในอัตรา 176 มก./ดิน 1 กก. ปุ๋ยสูตร 18-46-0 ในอัตรา 108 มก./ดิน 1 กก. และปุ๋ยสูตร 0-0-60 ในอัตรา 83 มก./ดิน 1 กก. และใส่โดโลไมท์ (30% CaO + 20% MgO) ในอัตรา 10 ก./ดิน 1 กก. โดยทำการคลุกโดโลไมท์ลงในดินแต่ละกระถางและทิ้งไว้เป็นเวลา 7 วัน ก่อนทำการปลูกข้าว เพื่อเป็นการปรับปรุงดิน และให้ต้นข้าวสามารถดูดธาตุฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น แบ่งการใส่ปุ๋ยออกเป็น 3 ครั้ง ครั้งละเท่าๆ กัน โดยการแบ่งชั่งปุ๋ยใส่ถุงขนาดเล็กตามอัตราที่กำหนดต่อกระถาง ทำการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 ก่อนปลูกโดยการคลุกผสมลงในกระถาง ใส่ปุ๋ยครั้งที่ 2 และ 3 เมื่อข้าวอายุได้ 25 วัน และ 60 วัน หลังย้ายปลูก จัดการดูแลกำจัดแมลงศัตรูพืชตามความเหมาะสม สำหรับทรีตเมนต์ที่ปลูกภายใต้แสงธรรมชาติ ต้นข้าวจะถูกนำไปปลูกและดูแลรักษาในโรงเรือนเปิด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเข้มแสงในช่วงกลางวันระหว่าง PAR = 700-950 µmol/m^2/s และอุณหภูมิกลางวันเฉลี่ย 38°C - 41°Cโดยวัดที่ระดับทรงพุ่ม ณ แปลงทดลองของคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ม.นเรศวร ส่วนทรีตเมนต์ที่ปลูกภายใต้แสง LED นั้น ต้นข้าวจะถูกนำไปปลูกดูแลรักษาที่ตู้ปลูกพืชแบบกึ่งปิดที่มีการให้แสง LED จำนวน 12 ชั่วโมง (6.00 h - 18.00 h) ที่ระดับความเข้มแสงอยู่ที่ PAR = 850 - 1,000 µmol/m^2/s วัดที่ระดับทรงพุ่ม ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 75-80 %RH อุณหภูมิช่วงกลางวันและกลางคืนเท่ากับ 35°C /25°C ทำการทดลองระหว่างเดือน กรกฎาคม – ตุลาคม 2561

การวัดการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสุทธิ และลักษณะทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้อง

บันทึกข้อมูลทางด้านสรีรวิทยา และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของข้าวทุกพันธุ์ที่ระยะแตกกอเต็มที่ เนื่องจากที่ระยะแตกกอเต็มที่ ต้นข้าวจะมีการพัฒนาทางลำต้นเต็มที่และมีความสมบูรณ์ของต้น นอกจากนี้พลังงานที่พืชเก็บสะสมไว้ยังไม่ได้ถูกนำไปใช้สำหรับการสร้างส่วนขยายพันธุ์และพัฒนาเป็นเมล็ดต่อไป โดยทำการวัดเมื่อต้นข้าวมีอายุ 60 วันสำหรับพันธุ์ CN1 Hom-SP และ PSL2 และที่อายุ 70 วันสำหรับพันธุ์ RB และ RD10 โดยการวัดค่าที่ใบอ่อนที่แผ่เต็มที่ (youngest fully expanded leaf) ทำการวัดค่าคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซน (chlorophyll fluorescence) ด้วยเครื่อง PAR fluoro meter (PAR-FluorPen; FP 100-Max-LM-D/USB, PSI®, Gzece Republic) โดยก่อนทำการวัดค่า chlorophyll fluorescence ต้นข้าวจะถูกนำไปไว้ในที่มืด (dark-adapted) เป็นเวลา 30 นาที การประเมินค่าความเขียวของใบ (leaf greenness) จะใช้เครื่องมือวัดปริมาณคลอโรฟิลล์ (hand-held SPAD-502 chlorophyll meter, Konica minolta®, Japan การวัดค่า chlorophyll fluorescence และ SPAD value ใช้ตัวอย่างใบข้าวใบเดียวกัน โดยวัดที่ส่วนกลางใบไปถึงปลายใบ

วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* และคำนวณตามวิธีการและสมการของ Arnon (1949) ทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะแตกกอเต็มที่ โดยตัดใบข้าวใบเดียวกับที่วัดค่า chlorophyll fluorescence และ SPAD value ตัดจากส่วนกลางใบโดยเว้นเส้นกลางใบ เป็นชิ้น

ขนาดเล็ก น้ำหนักเฉลี่ย 50 มก. ใส่ในหลอดทดลอง และเติมสาร 80 % Acetone จำนวน 15 มล. นำตัวอย่างไปแช่เย็นที่ 4 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในที่มืด นำสารละลายที่ได้เจือจางโดย 80 % Acetone ให้ได้ปริมาตร 25 มล. ดูดตัวอย่างปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ใน microplate แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดปฏิกิริยาบนไมโครเพลต (Microplate Reader: Biotek®, Synergy H1 Hybrid reader) ที่ความยาวคลื่น 663 และ 645 นาโนเมตร (nm) และคำนวณปริมาณคลอโรฟิลล์มีหน่วยเป็น มก./ก.น้ำหนักสด (mg/gFW) ดังสมการ

Chlorophyll *a* = ((12.7 X A_{663})-(2.6 X A_{645}))/ (50 mg) X 25 ml

Chlorophyll *b* = ((22.9 X A_{645})-(4.68 X A_{663}))/ (50 mg) X 25 ml

Total chlorophyll = ((20.2 X A_{645})-(8.02 X A_{663}))/ (50 mg) x 25 ml

โดย A_{633} = ค่าที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 663 nm - blank

A_{645} = ค่าที่วัดได้ที่ความยาวคลื่น 645 nm – blank

การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลแบบสองทาง (two-way ANOVA) ตามแผนการทดลองที่วางไว้ และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบ LSD (Least significant difference) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยใช้โปรแกรม R และ R-studio (RStudio Team, 2019)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

อิทธิพลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า chlorophyll fluorescence (Fv/Fm และ electron transport rate)

การวัดค่า chlorophyll fluorescence เป็นการวัดการตอบสนองทางสรีรวิทยของพืชที่เกิดจากความเครียดเนื่องจากสภาพแวดล้อม ซึ่งสามารถใช้อธิบายการส่งผ่านอิเล็กตรอน (ETR) และประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดของ PSII (Fv/Fm) ของพืชในสภาพแวดล้อมนั้นๆ ได้ ผลการทดลองพบว่าค่า Fv/Fm ของข้าวแต่ละพันธุ์มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อปลูกภายใต้แหล่งกำเนิดแสงที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อปลูกภายใต้แสง LED ข้าวทุกพันธุ์มีค่า Fv/Fm สูงกว่าการปลูกภายใต้แสงธรรมติ (**Figure 1a**) พันธุ์ Hom-SP RB และ RD10 มีค่าเฉลี่ย Fv/Fm ภายใต้แสง LED สูงกว่าปลูกภายใต้แสงปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.78 0.76 และ 0.77 ตามลำดับ ในขณะที่ข้าวพันธุ์ CN1 และ PSL2 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างการปลูกภายใต้สภาพ LED light และ natural light นอกจากนี้ยังพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างการให้แสงและพันธุ์ข้าว (light x variety) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P value = 0.0211)

อัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน (ETR) ของข้าวทั้ง 5 พันธุ์ (**Figure 1b**) ที่ระยะแตกกอเต็มที่พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยค่าเฉลี่ยอัตราการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน ในข้าวที่ปลูกภายใต้แสง LED มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกภายใต้แสงธรรมชาติ 2.1 เท่า และมีความแตกต่างทางสถิติที่ทุกความเข้มแสง PPFD ตั้งแต่ 10 – 1,000 µmol/m^2/s ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ ทิวา และคณะ (2560) ที่พบว่าการปลูกต้นพิทูเนียภายใต้ระบบปลูกพืชแบบกึ่งปิดภายใต้แสง LED สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ การที่ต้นข้าวแสดงค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง Fv/Fm และ ETR ภายใต้สภาพแสง LED ที่สูงกว่าต้นข้าวที่ปลูกในสภาวะแสงธรรมชาตินั้นอาจเป็นผลมาจาก ต้นข้าวในสภาพแสงธรรมชาติ ได้รับแสงที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างวันเนื่องจากเมฆฝน ร่มเงา และสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อีกทั้งความเข้มแสงที่สูงเกินไปในสภาพธรรมชาติอาจทำลายเซลล์พืชบางส่วนที่ใช้สำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช ทั้งนี้ประสิทธิภาพการใช้แสงสูงสุดและการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนในข้าวแต่ละพันธุ์ยังขึ้นอยู่กับพันธุกรรม และความสามารถในการปรับตัวของพืชนั้นๆ อีกด้วย

ความแตกต่างของค่าความเขียวใบ (SPAD) และปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ คลอโรฟิลล์ *b* ภายในใบข้าวระหว่างการปลูกภายใต้แสงธรรมชาติ และแสง LED

การปลูกข้าวภายใต้สภาวะแสง LED ให้ค่าความเขียวใบมากว่าการปลูกข้าวภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ (**Figure 2a**) โดยให้ค่าอยู่ที่ 43.754±0.63 SPAD Unit ส่วนการปลูกภายใต้สภาวะแสงธรรมชาติ โดยให้ค่าอยู่ที่ 33.848±0.54 SPAD Unit ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการปลูกภายใต้แสง LED และ แสงธรรมชาติมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ $P < 0.01$ นอกจากนี้ยังพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวและสภาพแสง ($P < 0.01$) พันธุ์ RB ให้ค่าความเขียวใบเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 43.766±1.47 SPAD Unit และพันธุ์ CN1 ให้ค่าความเขียวใบเฉลี่ยน้อยที่สุด เท่ากับ 35.02±2.80 SPAD Unit พบว่าในสภาพแสงแบบ LED สามารถเพิ่มค่าความเขียวใบได้ดีกว่าแสงธรรมชาติ ในสภาพการได้รับแสงที่แตกต่างกันระหว่างแสง LED กับแสงธรรมชาติ พบว่าข้าวทั้ง 5 พันธุ์ ให้ค่าความเขียวใบ (SPAD unit) แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับ $P < 0.01$ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Kobayashi et al. (2013) พบว่าการปลูกผักสลัดในระบบไฮโดรโพนิค ภายใต้สภาพหลอด LEDs สีแดงและสีน้ำเงิน ส่งผลให้ผักสลัดมีค่า SPAD สูงกว่าผักสลัดที่ปลูกภายใต้สภาพหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความสม่ำเสมอของแสงที่พืชได้รับจากหลอด LED ทำให้พืชที่ค่าความเขียวใบที่เพิ่มขึ้น และอาจเป็นไปได้ว่าในสภาพธรรมชาติซึ่งสภาพอากาศมีอุณหภูมิเฉลี่ย 38°C - 41°C ในตอนกลางวัน ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิภายในตู้ปลูกพืชแบบกึ่งปิดที่มีการให้แสง LED ซึ่งมีอุณหภูมิช่วงกลางวันเท่ากับ 35°C จึงเป็นผลให้ค่า SPAD ของต้นข้าวที่ปลูกในสภาพธรรมชาตินั้นน้อยกว่าการปลูกภายใต้แสง LED โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการศึกษาของ Liu et al. (2013) ที่พบว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า SPAD ปริมาณน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ และโปรตีนในใบธงของข้าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่าง SPAD และปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลงลงภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้น

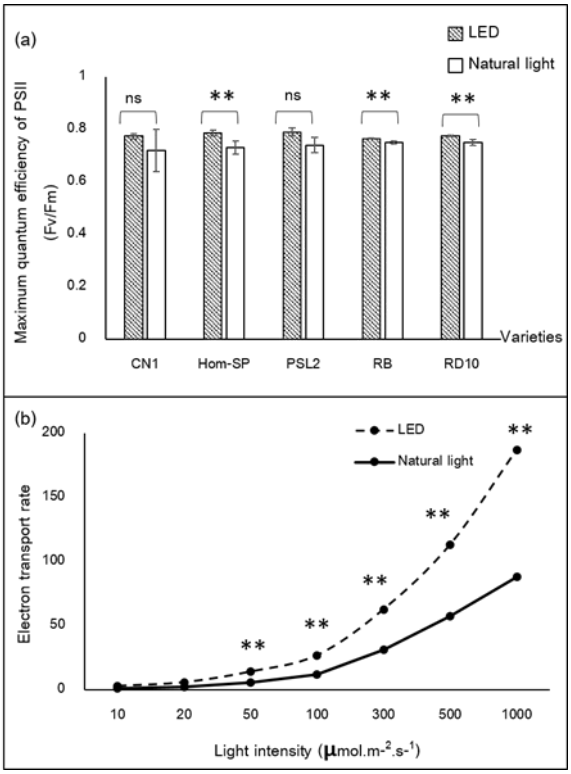

Figure 1 Maximum quantum efficiency of PSII (Fv/Fm) (a) and ETR (b) of rice leaves at tillering stage. Plants were grown under LED and natural light treatments. Leaves were placed in dark-adapted state for 30 min allowing the reaction centers to be re-oxidized. Fv/Fm and ETR were the average from five replicates ±SE. The data shows "**" indicated significant differences at P<0.01 between the values in LED and natural light treatments. The coefficient of variation (CV %) for Fv/Fm and ETR is 8.65% and 28.15%, respectively

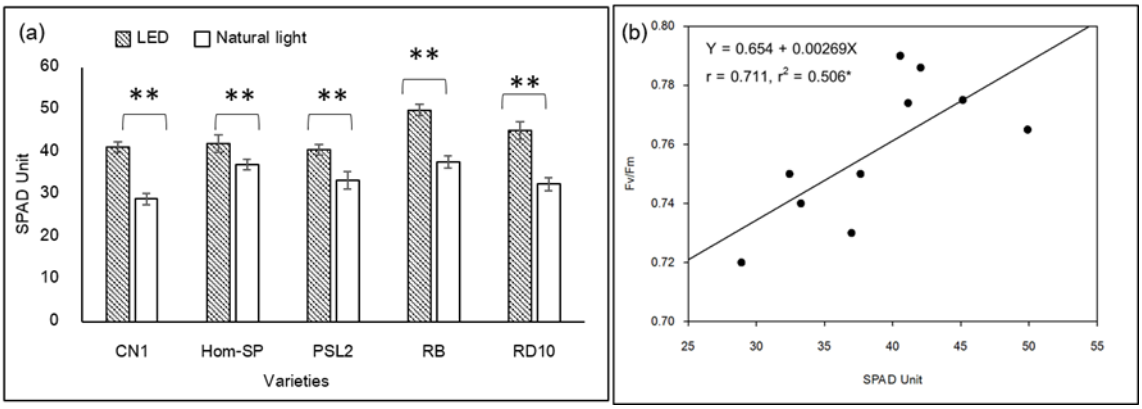

Figure 2 SPAD value at tillering stage of five rice varieties grown under LED and natural light (a), and correlation between SPAD values and Fv/Fm of five rice varieties at tillering stage. All data are the mean ± standard error of five replications. ** indicates significant differences at P<0.01 between the values in LED and natural light treatments. The coefficient of variation (CV %) for SPAD is 17.17%.

เมื่อวัดปริมาณรงควัตถุที่เกี่ยวข้องในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พบว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในแต่ละสภาวะการปลูก (**Figure 3a-3c**) จากการเก็บตัวอย่างใบข้าวที่ระยะการแตกกอเต็มที่ พบว่า ข้าวพันธุ์RB และ RD10 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* เฉลี่ยเท่ากับ 0.83 และ 0.65 มก./ก.น้ำหนักสด ตามลำดับภายใต้แสง LED ซึ่งมากกว่าการปลูกภายใต้แสงธรรมชาติ โดยมีค่าเฉลี่ยคลลโรฟิลล์ *a* เท่ากับ 0.63 และ 0.53 มก./ก.น้ำหนักสด ตามลำดับ ในขณะที่พันธุ์ Hom-SP ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติระหว่างการปลูกทั้งสองสภาวะ ในทางตรงกันข้าม ข้าวพันธุ์ CN1 และ PSL2 มีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และคลอโรฟิลล์ *b* เฉลี่ยภายใต้แสงธรรมชาติมากกว่าภายใต้แสง LED จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า SPAD ที่เพิ่มขึ้นภายใต้แสง LED ไม่มีมีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ (**Figure 3d**) ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า การวัดด้วยค่า SPAD เป็นเพียงการวัดค่าความเขียวโดยเฉลี่ยของใบพืชเท่านั้น ซึ่งจะสะท้อนถึงความสมบูรณ์ของพืชในสภาวะความเครียดแบบต่างๆ (Shah et al., 2017) และแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไนโตรเจนในใบพืชนั้นๆ ได้ (Yang et al., 2014; Ghosh et al., 2020) แต่ไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบเป็นปริมาณรงค์วัตถุอย่างเช่น ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืชได้อย่างแท้จริง เนื่องจากการกระจายตัวของคลอโรฟิลล์บนใบพืชนั้นมีความแตกต่างกันในแต่ละตำแหน่ง (Yuan et al., 2016) นอกจากนี้ Qu et al. (2017) ได้รายงานถึงความแปรรวนและความสัมพันธ์ของลักษณะประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสง ค่า SPAD และน้ำหนักแห้ง นั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างของลักษณะทางพันธุกรรมของข้าวในแต่ละพันธุ์อีกด้วย ซึ่งอาจส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวนั้นไม่เท่ากันในแต่ละพันธุ์

เมื่อวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวทั้ง 5 พันธุ์ กับสภาวะการปลูกทั้ง 2 สภาวะ พบว่าพันธุ์ข้าวมีปฏิสัมพันธ์กันกับสภาวะการปลูกในหลายลักษณะได้แก่ ปริมาณคลอโรฟิลล์ ($P < 0.01$) ค่าความเขียวใบ (SPAD value) ($P < 0.01$) และประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสุทธิ ($P < 0.05$) โดยประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงของข้าวทั้ง 5 พันธุ์มีแนวโน้มในที่ดีกว่าเมื่อปลูกภายใต้แสง LED โดยพบว่าการให้แสง LED ช่วยให้ข้าวมีแนวโน้มเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าว แต่ไม่ทุกพันธุ์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางพันธุกรรมและการปรับตัวของพันธุ์นั้นๆ ต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พืชได้รับแสงที่เหมาะสมกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงอย่างเต็มที่ จึงทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น จึงทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ค่าทางสถิติปรากฏว่าค่าความเขียวใบ SPAD เมื่อปลูกภายใต้แสง LED สูงกว่าปลูกภายใต้แสงธรรมชาติทุกพันธุ์ แต่ปริมาณคลอโรฟิลล์ในข้าวบางพันธุ์ต่ำกว่า ได้แก่ CN1 และ PSL2 และบางพันธุ์มีค่าสูงกว่า ได้แก่ HOM-SP RD10 และ RB เช่นเดียวกับการศึกษาของ Chen et al. (2014) โดยการให้แสง LED ที่ระยะกล้า ที่ช่วงคลื่นต่างๆ แล้วพบว่า ข้าวที่ได้รับแสงในระยะกล้า ส่งผลต่อเนื่องถึงการพัฒนาทางลำต้น ผลผลิต และสัดส่วนของคลอโรฟิลล์ *a/b* ในใบข้าว จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะทางพันธุกรรมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้นของค่าความเขียวใบพืช ซึ่งวัดจากค่า SPAD ที่ไม่เท่ากัน อย่างเช่นพันธุ์ CN1 ที่มีประสิทธิภาพการเพิ่มขึ้น

ของค่า SPAD ที่สูงกว่าทุกพันธุ์ อาจเป็นเพราะข้าวพันธุ์ CN1 มีการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนได้ดีกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559) จึงทำให้มีปริมาณไนโตรเจนในใบข้าวมากขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการเพิ่มขึ้นของค่าความเขียวใบได้ดีกว่าข้าวพันธุ์อื่นๆ

เมื่อศึกษาถึงสหสัมพันธ์ระหว่างค่า SPAD และ Fv/Fm ผลปรากฏกว่ามีสหสัมพันธ์ทางบวกระดับปานกลาง โดยมีค่า r = 0.711 (r^2=0.506) (**Figure 2b**) เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ Kumagai et al., (2009) ที่พบความสัมพันธ์ทางบวกระหว่างค่า SPAD และ Fv/Fm ในใบข้าว (r = 0.843, r^2 = 0.712) นั่นหมายความว่าเมื่อต้นข้าวมีค่าความเขียวใบที่มากขึ้น จะมีแนวโน้มทำให้พืชมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากเมื่อพืชอยู่ภายใต้แสง LED ซึ่งมีความเข้มข้นของแสงที่สม่ำเสมอตลอดการทดลอง สามารถส่งเสริมให้พืชมีขนาดและปริมาณของ chloroplast ที่เพิ่มขึ้น การทำงานของเอนไซม์ *Rubisco* มีมากขึ้น และมีประสิทธิภาพของขบวนการ carboxylation ที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นได้ (Li et al., 2009)

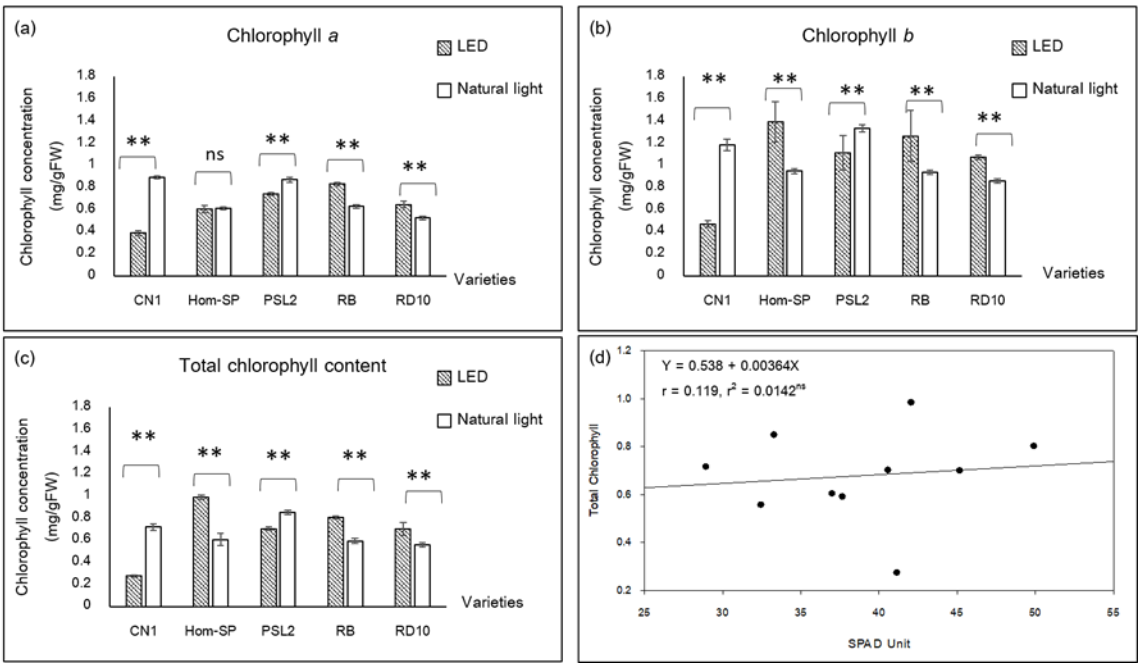

Figure 3 Chlorophyll *a* (a), chlorophyll *b* (b), total chlorophyll content (c), and relationship between SPAD values and total chlorophyll content (d) of different rice varieties grown under LED and natural light treatments. All data are the mean ± standard error of five replications. ** indicates significant differences at $p < 0.01$ between the values in LED and natural light treatments. The coefficient of variation (CV %) for Chlorophyll *a*, *b*, and total chlorophyll is 29.51%, 30.50%, and 31.52%, respectively.

ซึ่งต่างจากต้นพืชที่อยู่ภายใต้แสงธรรมชาติที่แสงแดดมีความไม่สม่ำเสมอกันในระหว่างวัน และในแต่ละวัน ประกอบกับอุณหภูมิสภาพอากาศที่ค่อนข้างสูง จึงส่งผลให้โมลกุลของ light harvesting complex อาจถูกทำลายเนื่องจากความเข้มแสงและอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปในสภาพธรรมชาติ เป็นผลให้มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงที่ลดลงได้ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองนี้ไม่พบสหสัมพันธ์ระหว่างค่า SPAD และค่า chlorophyll content ในข้าวทั้ง 5 พันธุ์แต่อย่างใด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก พันธุกรรมพืชที่แตกต่างกันส่งผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของพืชแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่า มีเพียงข้าวพันธุ์ HOM-SP RD10 และ RB เท่านั้นที่มีค่า Fv/Fm ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับค่า chlorophyll *a* ที่เพิ่มขึ้น ภายใต้แสง LED

สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้แสง LED ที่ความเข้มแสงอย่างน้อย 800-1,000 μmol/m^2/s ส่งผลให้ข้าวจำนวน 3 พันธุ์จากทั้งหมด 5 พันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวHOM-SP RD10 และ RB มีปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* และ *b* เพิ่มสูงขึ้น มีค่าความเขียวใบมากขึ้น มีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงสูงสุดที่มากกว่าข้าวที่ปลูกโดยได้รับแสงธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกันในทุกลักษณะที่ทำการศึกษา ดังนั้น การประยุกต์ใช้แสง LED เพื่อกระตุ้นให้ต้นข้าวมีประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงเพิ่มมากขึ้น มีปริมาณการสร้างรงควัตถุและสารออกฤทธิ์ที่สำคัญเพิ่มขึ้นสำหรับการสกัดสารสำคัญต่างๆ จากต้นข้าวและผลผลิตจากข้าวนั้นจัดว่ามีความเป็นไปได้สูงมาก อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยยังจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์กับการตอบสนองต่อแสง LED และศึกษาถึงกลไกการตอบสนองทางสรีรวิทยา และปริมาณสารออกฤทธิ์ต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อไป อีกทั้งเพื่อเป็นการรองรับความต้องการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพของประชากรในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

กองวิจัยและพัฒนาข้าว. 2559. องค์ความรู้เรื่องข้าว. กรมการข้าว. แหล่งข้อมูล: http://www.ricethailand.go.th/rkb3/. ค้นเมื่อ 29 ตุลาคม 2563.

นงลักษณ์ พยัคฆศิรินาวิน, อุบล ชินวัง, และสุวัฒน์ ธีระพงษ์ธนากร. 2557. การประยุกต์ใช้เทคนิคคลอโรฟิลล์ฟลูออเรสเซ็นท์กับพืชสวน. การเกษตรราชภัฏ. 13: 37-46.

พิชญ์สินี เพชรไทย, และธรรมศักดิ์ ทองเกตุ. 2560. ผลของความเข้มแสงและระยะเวลารับแสงต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักกาดหอม. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์. 4: 54-59.

ทิวา จามระรี, ปารวี กาญจนประโชติ, สมเกียรติ จรุรงค์ล้ำเลิศ และสริริวัฒน์ สาครวาสี. 2560. อิทธิพลของแสงไฟแอลอีดีต่อการเจริญเติบโตของต้นพิทูเนียพันธุ์ Purple ภายใต้ระบบการปลูกพืชแบบกึ่งปิด. น. 184-191. ใน: ประชุมวิชาการระดับชาติ พิบูลสงครามวิจัย ครั้งที่ 3 ประจำปี พ.ศ. 2560 วันที่ 23 – 24 มีนาคม 2560. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม, พิษณุโลก.

สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. 2561. สรุปสถานการณ์ส่งออกข้าวไทยปี 2660 และแนวโน้มและทิศทางการส่งออก ข้าวไทยปี 2561. สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย. แหล่งข้อมูล: http://www.thairiceexporters.or.th. ค้นเมื่อ 3 กันยายน 2562.

Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts, polyphenolexidase in beta vulgaris. Plant Physiology. 24: 1–15.

Baker, N. R. 2008. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. Annual Review of Plant Biology. 59: 89–113.

Brown, T.B., R. Cheng, X.R. Sirault, T. Rungrat, K.D. Murray,M. Trtilek, R.T. Furbank, M. Badger, B.J. Pogson, and J.O. Borevitz. 2014. TraitCapture: genomic and environment modelling of plant phenomic data. Current Opinion in Plant Biology. 18: 73–79.

Chen, C.C., M.Y. Huang, K.H. Lin, S.L. Wong, W.D. Huang, and C.M. Yang. 2014. Effects of light quality on the growth, development and metabolism of rice seedlings (*Oryza sativa* L.). Research Journal of Biotechnology. 9: 15-24.

Ghosh, M., D.K. Swain, M.K. Jha, V.K. Tewari, and A. Bohra. 2020. Optimizing chlorophyll meter (SPAD) reading to allow efficient nitrogen use in rice and wheat under rice-wheat cropping system in eastern India. Plant Production Science. 23: 270-285.

Hasan, M.M., T. Bashir, R. Ghosh, S.K. Lee, and H. Bae. 2017. An overview of LEDs' effects on the production of bioactive compounds and crop quality. Molecules. 22: 1420.

Kobayashi, K., T. Amore, and M. Lazaro. 2013. Light-Emitting Diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce. Optics and Photonics Journal. 3: 74–77.

Kumagai, E., A. Araki, and F. Kubota. 2009. Correlation of chlorophyll meter readings with gas exchange and chlorophyll fluorescence in flag leaves of rice (*Oryza sativa* L.) Plant Production Science. 12: 50–53.

Kozai, T. 2013. Plant factory in Japan - current situation and perspectives. Chronica. Horticulture. 53: 8-11.

Krause, G., and E. Weis. 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 42: 313–349.

Li, Y., Y. Gao, X. Xu, Q. Shen, and S. Guo. 2009. Light-saturated photosynthetic rate in high nitrogen rice (*Oryza sativa* L.) leaves is related to chloroplastic CO_2 concentration. Journal of Experimental Botany. 60: 2351–2360.

Liu, Q.H., X. Wu, T. Li, J.M. Ma, and X.B. Zhou. 2013. Effects of elevated air temperature on physiological characteristics of flag leaves and grain yield in rice. Chilean journal of agricultural research. 73: 85-90.

Misra, A.N, M. Misra, and R. Singh. 2012. Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology. P.176-190. In: Biophysics. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.

Pedrós, R., I. Moya, Y. Goulas, and S. Jacquemoud. 2008. Chlorophyll fluorescence emission spectrum inside a leaf. Photochemical and Photobiological Science. 7: 498–502.

Qu, M., G. Zheng, S. Hamdani, J. Essemine, Q. Song, H. Wang, C. Chu, X. Sirault, and X. Zhua. 2017. Leaf photosynthetic parameters related to biomass accumulation in a global rice diversity survey. Plant Physiology. 175: 248-258.

RStudio Team. 2019. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc. Massachusetts, USA. Available: http://www.rstudio.com/. Accessed March 2019

Rungrat, T., M. Awlia, T. Brown, R. Cheng, X. Sirault, J. Fajkus, M. Trtilek, B. Furbank, M. Badger, M. Tester, B.J. Pogson, J.O. Borevitz, and P. Wilson. 2016. Using Phenomic Analysis of Photosynthetic Function for Abiotic Stress Response Gene Discovery. The Arabidopsis Book. 14: e0185.

Shah, S.H., R. Houborg, and M.F. McCabe. 2017. Response of chlorophyll, carotenoid and spad-502 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). Agronomy. 7:61.

Wojciechowska, R., O. Dtugosz-Grochowska, A. Kotton, and M. Zupnik. 2015. Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. Scientia Horticulturae. 187: 80-86.

Yamori, W., G. Zhang, M. Takagaki, and T. Maruo. 2014. Feasibility study of rice growth in plant factories. Rice Research. 2: 119.

Yang, H., J. Yang, Y. Lv, and J. He. 2014. SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status. Plant Production Science. 17: 81-92.

Yuan, Z., Q. Cao, K. Zhang, S.T. Ata-Ul-Karim, Y. Tian, Y. Zhu, W. Cao, and X. Liu. 2016. Optimal leaf positions for SPAD meter measurement in rice. Frontiers in Plant Science. 7: 719.

Zhang, S.X., D.D. Huang, X.Y. Yi, S. Zhang, R. Yao, C.G. Li, A. Liang, and X.P. Zhang. 2016. Rice yield corresponding to the seedling growth under supplemental green light in mixed light-emitting diodes. Plant Soil and Environment. 62: 222-229.