วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

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

ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ และผลผลิตของข้าว กข43

Effects of elevated carbon dioxide and temperature on chlorophyll, leaf area and yield of rice cultivar RD43

ฤทัยรัตน์ โพธิ[1]*, ชลดา เดชาเกียรติไกร ธีรการุณวงศ์[1] และ สุภาพร พงศ์ธรพฤกษ์[2]

Rutairat Phothi[1]*, Chonlada Dechakiatkrai Theerakarunwong[1] and Supaporn Pongthornpruek[2]

[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000*
[1] *Faculty of Science and Technology, Nakhon Sawan Rajabhat University, Nakhon Sawan 60000*
[2] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อ.เมือง จ.อุตรดิตถ์ 53000*
[2] *Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000*

บทคัดย่อ: การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในปัจจุบันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลกและทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และผลกระทบร่วมของการเพิ่มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าว กข43 โดยศึกษาใน 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ (EC:600), การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ (ECT:600+3C) การเพิ่มของอุณหภูมิ (ET:+3C) และกลุ่มควบคุม (C:400) จากการศึกษาผลกระทบต่อคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพและผลผลิต พบว่าชุดการทดลอง EC:600 ทำให้คลอโรฟิลล์ และพื้นที่ใบ มากกว่าทั้ง 3 ชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ชุดการทดลอง ET:+3C ทำให้ทั้งคลอโรฟิลล์ และพื้นที่ใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลอง C:400 นอกจากนี้ยังพบว่ามวลชีวภาพทั้งหมดของข้าว กข43 มีค่ามากที่สุดในชุดการทดลอง EC:600 รองลงมาได้แก่ ECT:600+3C, C:400 และ ET:+3C โดยมีค่าเท่ากับ 86.87, 79.15, 72.12 และ 53.98 กรัม ตามลำดับ การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับผลผลิตพบว่าต้นข้าวในชุดการทดลอง EC:600 มีจำนวนรวงต่อกอ 43.33 รวง และเมล็ดต่อรวงเท่ากับ 114.56 เมล็ด มากกว่าทุกชุดการทดลอง ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่คาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นในอนาคต และการจัดการไนโตรเจนรวมทั้งสภาพการเพาะปลูกที่มีความเหมาะสมจะช่วยลดผลกระทบของสภาวะเครียดความร้อนและสภาวะเครียดอื่น ๆ ของพืช เช่น ความแล้ง และมลพิษทางอากาศ

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์; อุณหภูมิ; ข้าว; คลอโรฟิลล์; ผลผลิต

ABSTRACT: The rise of carbon dioxide and temperature leads global climate change and causes adverse effects on the environment. The purpose of this study is to investigate the response of rice RD43 to carbon dioxide and temperature increases, along with the combined effects of the elevated carbon dioxide and temperature. The research was conducted in 4 treatments: elevated carbon dioxide (EC:600), the combined elevated carbon dioxide and temperature (ECT:600+3C), elevated temperature (ET:+3C) and a control group (C:400) to evaluate chlorophyll, leaf area, biomass and yield. It was found that EC:600 caused more chlorophyll and leaf area than all

* Corresponding author: rutairat.p@nsru.ac.th

Received: date; October 27, 2023 Revised: date; February 9, 2024

Accepted: date; April 18, 2024 Published: date;

three experimental sets with statistical significance, while ET caused both chlorophyll and leaf area decreased significantly when compared with C:400. Total biomass was the highest in the EC:600 experiment set, followed by ECT:600+3C, C:400 and ET:+3C by 86.87, 79.15, 72.12 and 53.98 g, respectively. In terms of productivity, rice RD43 has 43.33 tillers and 114.56 grains per panicle in EC:600 experiment group, which is more than those other experiment series, while ET:+3C treatment caused the tiller number and number of grains per panicle to decrease statistically significantly. The atmospheric levels of carbon dioxide are expected to increase in future and the effective nitrogen management and other growth conditions will assist in reducing the effects of heat stress together with plant stress such as drought and air pollution.
Keywords: carbon dioxide; temperature; rice; chlorophyll; yield

บทนำ

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญซึ่งเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในภาคพลังงาน อุตสาหกรรม เกษตร ป่าไม้และการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงการดำเนินชีวิตประจำวัน ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศก่อนการพัฒนาอุตสาหกรรมมีค่า 280 ppm และเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 420 ppm ในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังมีการคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 600-650 ppm ในปี ค.ศ. 2100 (Retallack et al., 2020) การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นปัญหาสำคัญในระดับโลกส่งผลเกี่ยวเนื่องถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก IPCC คาดการณ์ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 2.6 และ 4.8 องศาเซลเซียส ในปี ค.ศ. 2065 และ ค.ศ. 2100 ตามลำดับ (IPCC., 2013) จากสถานการณ์ดังกล่าวจึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะส่งผลกระทบต่อการเพาะปลูกพืช ซึ่งทั้งคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิอากาศมีความเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึมของพืช เช่น การสังเคราะห์แสง การหายใจ การเจริญเติบโต และการสะสมมวลชีวภาพ เป็นต้น การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้เกิดการเพิ่มของประสิทธิภาพคาร์บอกซิเลชัน (Prior et al., 2005) ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตในพืชไร่ซี 3 หลายชนิด (Kimball et al., 2002) และจากการศึกษาการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ต่อผลผลิตข้าว พบว่าการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น (Phothi et al., 2016) แต่อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณค่าทางโภชนาการและคุณภาพของผลผลิตพืช เช่น การลดลงของปริมาณสารฟีนอลิกทั้งหมด (Goufo et al., 2014) โปรตีน ธาตุเหล็ก สังกะสี และวิตามินบี โดยการส่งผลกับคุณภาพของผลผลิตมีความเกี่ยวข้องกับการดูดซึมสารอาหารจากรากไม่เพียงพอในการรองรับการเติบโตเหนือพื้นดินที่ถูกกระตุ้นโดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซึมไนเตรทลดลง การลดลงของการไหลเวียนธาตุอาหารจากการลดลงของปากใบพืช (Wang et al., 2023) อย่างไรก็ตามการตอบสนองของพืชต่อคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีความเกี่ยวข้องกับชนิดและสายพันธุ์ของพืช (Kumari et al., 2013) รวมทั้งปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตอื่น ๆ เช่น แสง น้ำ และธาตุอาหารที่ต้องเพียงพอด้วยเช่นกัน

การเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อพืช โดยเฉพาะข้าวซึ่งจัดเป็นพืชที่มีความไวต่อการได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิหรือภาวะเครียดจากความร้อน มีการคาดการณ์ว่าในอนาคตอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบด้านลบต่อผลผลิตและคุณภาพของข้าว (Chaturvedi et al., 2017) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาและชีวเคมีในพืช โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการเจริญเติบโตจนกระทั่งให้ผลผลิต พืชแต่ละชนิดจะมีข้อจำกัดในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่เหมาะสมก็เป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการเจริญเติบโตของพืช การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้พืชอยู่ในสภาวะเครียด ส่งผลให้เกิดอาการใบแก่ก่อนวัย พืชต้องใช้พลังงานสะสมที่มีในการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น เปอร์ออกซิเดส ซุปเปอร์ออกไซม์ดิสมิวเทส และคะตะเลส เพื่อป้องกันผลกระทบ (Cao et al., 2009) พืชมีการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำทำให้ลดการนำเข้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประสิทธิภาพในระบบปฏิกิริยาแสง ของกระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง (Guchou et al., 2007; Xu and Zhou, 2006) และเกิดผลกระทบในกระบวนการทางชีวเคมีเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องเช่น รูบิสโก (Guchou et al., 2007) เมื่อกระบวนการทั้งปฏิกิริยาแสง และชีวเคมีไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ทำให้เกิดผลกระทบต่อการสร้างพื้นที่ใบ การเจริญเติบโต มวลชีวภาพ และผลผลิต (Cao et al., 2009) โดยผลกระทบที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ ลักษณะทางสรีรวิทยา การปรับตัวของพืช และสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ในด้านผลผลิตพบว่าอุณหภูมิที่สูงส่งผลต่อความพร้อมของดอกข้าวด้านการเจริญพันธุ์ โดยการยับยั้งการแตกของอับเรณู และการลดลง

ของเกสร (Coast et al., 2016) โดยงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสลดผลผลิตข้าว 10% (Peng et al., 2004)

ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก เป็นอาหารหลักของประชากรโลกประมาณ 67% (Senapati et al., 2022) การผลิตข้าวให้ได้ผลผลิตสูงภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของประชากรโลกจึงมีความท้าทายเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาผลกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อข้าว กข 43 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่มีคุณภาพการหุงต้มดี มีดัชนีน้ำตาลต่ำใกล้เคียงกับข้าวกล้อง รวมทั้งมีอายุการเพาะปลูกสั้น จึงได้รับการส่งเสริมให้เกษตรกรเพาะปลูก และเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยสำคัญในการสังเคราะห์แสงของพืช และมีข้อมูลที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลกระทบทางบวกและอาจสามารถลดผลกระทบจากสภาวะอื่น ๆ เช่นการเพิ่มของอุณหภูมิที่มาต่อข้าว โดยงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการศึกษาผลกระทบของสภาวะเครียดจากความร้อน ความเครียดจากการขาดน้ำ หรือมลพิษทางอากาศ เช่น ก๊าซโอโซน และการศึกษาผลกระทบร่วมของการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซโอโซนต่อข้าว ซึ่งพบว่าการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวและลดผลกระทบในทางลบจากก๊าซโอโซนในข้าวขาวดอกมะลิ 105 (Phothi et al., 2016) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ และผลกระทบร่วมของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกสำคัญที่มีการเพิ่มขึ้นในบรรยากาศและมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในปัจจุบันและมีการคาดการณ์ว่าจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต หากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและลดผลกระทบในด้านต่าง ๆ ที่เกิดจากสภาวะเครียดของพืช จะเป็นแนวทางในการรองรับสถานการณ์ในอนาคต รวมทั้งใช้เป็นข้อมูลสำหรับจัดการการเพาะปลูก เช่น ไนโตรเจน ชนิดพันธุ์ข้าว หรือปัจจัยอื่น ๆ เพื่อการผลิตข้าว รวมทั้งพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ที่มีความเหมาะสมต่อไป

วิธีการศึกษา

การจัดเตรียมต้นกล้าข้าว

เพาะเมล็ดพันธุ์ข้าว กข43 ในถาดพลาสติก ขนาดกว้าง 21 ยาว 26 ซม. โดยใช้เมล็ดพันธุ์จากศูนย์วิจัยข้าวชัยนาท จนได้ใบแท้แรกจึงเปลี่ยนย้ายภาชนะที่มีดินเหนียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 นิ้ว จำนวน 1 ต้นต่อ 1 กระถาง ปลูกในเรือนเพาะชำจนต้นข้าวมีอายุ 4 สัปดาห์

การจัดการปุ๋ย

ครั้งที่ 1 ใส่ปุ๋ย 16-20-0 อัตรา 35 กก./ไร่ หลังจากย้ายต้นกล้าปลูกในกระถาง 15 วัน

ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (ยูเรีย : 46-0-0) อัตรา 10 กก./ไร่ ในระยะแตกกอ

ครั้งที่ 3 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (ยูเรีย : 46-0-0) อัตรา 10 กก./ไร่ ในระยะสร้างรวงอ่อน (สถาบันวิจัยข้าว, 2548)

แผนการทดลองและสิ่งทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design: CRD) จำนวน 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 6 ซ้ำ ประกอบด้วย

ชุดการทดลอง 1 (EC:600)	คาร์บอนไดออกไซด์ 600 ppm/อุณหภูมิบรรยากาศ
ชุดการทดลอง 2 (ECT:600+3C)	คาร์บอนไดออกไซด์ 600 ppm/อุณหภูมิบรรยากาศ + 3 องศาเซลเซียส
ชุดการทดลอง 3 (ET:+3C)	คาร์บอนไดออกไซด์ 400 ppm/อุณหภูมิบรรยากาศ + 3 องศาเซลเซียส
ชุดการทดลอง 4 (C:400)	คาร์บอนไดออกไซด์ 400 ppm/อุณหภูมิบรรยากาศ

โดยนำต้นข้าว กข43 อายุ 4 สัปดาห์ ที่เพาะปลูกในเรือนเพาะชำย้ายมาปลูกในโรงเรือนรมก๊าซคลุมด้วยพลาสติก โปร่งแสง ตั้งภายนอกอาคาร พืชสามารถใช้แสงแดดจากธรรมชาติได้ มีช่องระบายอากาศ และพัดลมดูดอากาศจากภายนอกหมุนเวียนเข้าสู่โรงเรือนรมก๊าซ โดยมีการกรองอากาศก่อนเข้าโรงเรือนรมก๊าซด้วย Charcoal-Filter เพื่อให้อากาศที่เข้าสู่โรงเรือนรมก๊าซเป็นอากาศบริสุทธิ์ และพ่นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 400 และ 600 ppm ปรับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เรกูเรเตอร์และวาล์วปรับละเอียด และเพิ่มอุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียสโดยพัดลมไอร้อน รมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิตามชุดการทดลองวันละ 9 ชั่วโมง (เวลา 8.00 น. –

17.00 น.) เป็นเวลา 10 สัปดาห์ (ตั้งแต่ข้าวอายุ 4 สัปดาห์ จนถึง 14 สัปดาห์) โดยตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Carbon dioxide model 41C (Thermo Environmental Instruments, USA) และอุณหภูมิด้วย Weather Monitor II (Davis Instruments, USA)

การศึกษาผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิต่อข้าว กข43

3.1 วัดคลอโรฟิลล์ด้วยเครื่อง Chlorophyll meter (SPAD-502, soil and plant analysis development (SPAD), Minolta Camera Co., Osaka, Japan) หลังจากการรมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในสัปดาห์ที่ 1 - 10 โดยวัดที่ตำแหน่งที่ 2 ของใบข้าวที่เจริญเต็มที่แล้ว จำนวน 9 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.2 พื้นที่ใบ วัดพื้นที่ใบพืชด้วยเครื่องวัดพื้นที่ใบ LI-3100 (LI-COR, Lincoln, USA) โดยวัดที่ตำแหน่งที่ 2 ของใบข้าวที่เจริญเต็มที่แล้ว หลังจากการรมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในสัปดาห์ที่ 1 - 10 จำนวน 9 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.3 ศึกษามวลชีวภาพในระยะเก็บเกี่ยว เมื่อต้นข้าวอายุ 14 สัปดาห์ (หลังจากการรมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ 10 สัปดาห์) โดยแยกส่วนลำต้นและรากของต้นข้าว ล้างให้สะอาด แล้วอบตัวอย่างพืชที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในตู้อบลมร้อนและนำมาชั่งหาน้ำหนักแห้งของลำต้น น้ำหนักแห้งของราก และน้ำหนักแห้งรวม จำนวน 6 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

3.4 ศึกษาผลผลิต ได้แก่ จำนวนรวงต่อต้น จำนวนเมล็ดต่อรวง จำนวนเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ต่อเมล็ดทั้งหมด และน้ำหนักเมล็ดข้าวเปลือก 100 เมล็ด เมื่อต้นข้าวอายุ 14 สัปดาห์ (หลังจากการรมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ 10 สัปดาห์) จำนวน 6 ซ้ำต่อชุดการทดลอง

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ศึกษาความแตกต่างของคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพ และผลผลิตโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนตามแผนการทดลองและใช้ Dancan’s multiple range tests เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างชุดการทดลอง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อคลอโรฟิลล์ของข้าว กข43

จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิต่อคลอโรฟิลล์ใน 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ (EC:600), การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ (ECT:600+3C) การเพิ่มของอุณหภูมิ (ET:+3C) และกลุ่มควบคุม (C:400) เห็นผลกระทบที่ชัดเจนในการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในชุดการทดลอง ET:+3C และเพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง EC:600 โดยใบข้าวในชุดการทดลอง ET:+3C เริ่มมีคลอโรฟิลล์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 ของการทดลอง และตั้งแต่สัปดาห์ที่ 3 ของการทดลอง ชุดการทดลอง EC:600 มีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มมากขึ้นจนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่น ๆ ($p < 0.05$) ในการทดลองสัปดาห์ที่ 10 เห็นผลกระทบที่ชัดเจนในการเพิ่มขึ้นของคลอโรฟิลล์จากการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ และการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยชุดการทดลอง EC:600 มีปริมาณคลอโรฟิลล์มากที่สุด 45.69 รองลงมาได้แก่ C:400, ECT:600+3C และ ET:+3C 42.76, 41.87 และ 39.98 SPAD unit ตามลำดับ **(Table 1)** สอดคล้องกับ Shi et al. (2014) พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวที่ได้รับการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ 700 ppm มีค่าสูงขึ้น 24.7% เมื่อเปรียบเทียบใบข้าวในกลุ่มควบคุมซึ่งมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 360 ppm นอกจากชุดการทดลอง EC:600 จะทำให้ใบข้าว กข43 มีปริมาณคลอโรฟิลล์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองอื่น ๆ แล้ว ยังพบว่าในการรมก๊าซสัปดาห์ที่ 1 ถึง 10 ใบข้าวที่ได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ EC:600 และ ECT:600+3C ยังมีปริมาณคลอโรฟิลล์ในสัปดาห์ที่ 6 – 10 ซึ่งเป็นระยะสืบพันธุ์ที่มีการเจริญเติบโตของดอกและเมล็ดข้าวเพิ่มมากขึ้นโดยอยู่ในช่วง 45.10 – 46.08 และ 41.87 – 44.84 SPAD unit ตามลำดับ เห็นได้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลกระทบในทางบวกต่อคลอโรฟิลล์ในใบข้าว ในทางตรงข้ามการเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลกระทบในด้านลบโดยทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์และค่าการชักนำของปากใบลดลง (Xiong et al., 2017) สภาวะเครียดจากอุณหภูมิสูงส่งผลต่อการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ รวมทั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง (Fahad et al., 2017) และคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มคลอโรฟิลล์ในใบพืช ปฏิกิริยาชีวเคมีใน

กระบวนการสังเคราะห์แสง (Kumari et. al., 2013) นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสารต้านอนุมูลอิสระ จึงช่วยลดผลกระทบจากสภาวะเครียดจากอุณหภูมิได้ (Phothi et al., 2016)

Table 1 Effect of elevated carbon dioxide and temperature on Leaf chlorophyll (SPAD unit) of rice RD43 under elevated carbon dioxide (EC:600), the combined elevated carbon dioxide and temperature (ECT:600+3C), elevated temperature (ET:+3C) and a control group (C:400) for 10 weeks

Duration of exposure	EC:600	ECT:600+3C	ET:+3C	C:400	C.V. (%)
1	40.14±0.35a	41.28±0.77a	40.27±0.62a	39.36±0.68a	4.66
2	38.90±0.39a	38.46±0.45a	30.91±1.00b	38.63±0.19a	4.82
3	42.02±0.48a	37.26±0.49b	37.76±1.16b	38.87±0.59b	5.67
4	43.49±0.50a	39.52±0.24bc	38.93±0.60c	40.46±0.19b	3.09
5	41.41±0.63a	39.38±085a	36.93±0.98b	40.18±0.67a	6.05
6	46.08±0.57a	44.33±0.47b	42.37±0.48c	44.13±0.27b	3.11
7	45.16±0.39a	43.80±0.57ab	39.86±0.51c	43.19±0.62b	3.70
8	45.10±0.64a	44.18±0.65a	41.32±0.41b	43.91±0.38a	3.69
9	45.39±0.67a	44.84±0.62a	39.96±0.29c	41.52±0.40b	3.61
10	45.69±0.56a	41.87±0.31b	39.98±0.39c	42.76±0.33b	2.88

The data represent the mean± SE (n = 9 leaf chlorophyll). Different letters indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$.

การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อพื้นที่ใบของข้าว กข43

จากการศึกษาการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิต่อพื้นที่ใบข้าว กข43 ใน 4 ชุดการทดลองได้แก่ การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ (EC:600) การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ (ECT:600+3C) การเพิ่มของอุณหภูมิ (ET:+3C) และกลุ่มควบคุม (C:400) พบว่าชุดการทดลอง EC:600 ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใบข้าวโดยมีความแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ตั้งแต่สัปดาห์ที่ 5 ของการทดลองโดยมีพื้นที่ใบ 22.86 ตร.ซม. ในขณะที่ชุดการทดลอง ECT:600+3C, ET:+3C และ C:400 มีพื้นที่ใบ 17.44, 12.17 และ 17.92 ตร.ซม. ตามลำดับ และให้ผลในทางเดียวกันไปจนถึงสัปดาห์ที่ 10 ที่ใบข้าวมีพื้นที่ใบมากที่สุดในชุดการทดลอง EC:600 โดยมีพื้นที่ใบ 21.72 ตร.ซม. รองลงมาได้แก่ C:400, ECT:600+3C และ ET:+3C ตามลำดับ โดยมีค่า 20.03, 19.57 และ 16.33 ตร.ซม. **(Table 2)** ผลการศึกษาประเมินได้ว่าการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใบพืชซึ่งเกี่ยวเนื่องจากปริมาณคลอโรฟิลล์และกระบวนการสังเคราะห์แสง สอดคล้องกับ Mollier et al. (2023) ศึกษาผลของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิในกลุ่มควบคุม, คาร์บอนไดออกไซด์ 550 ppm + การเพิ่มของอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสจากบรรยากาศ และคาร์บอนไดออกไซด์ 750 ppm + การเพิ่มของอุณหภูมิ 6 องศาเซลเซียสจากบรรยากาศ พบว่า คาร์บอนไดออกไซด์ 550 ppm + การเพิ่มของอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ใบข้าวเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสง ส่งผลต่อการเจริญเติบโต และสะสมมวลชีวภาพ (Prior et al., 2005) ในขณะที่การเพิ่มของอุณหภูมิส่งผลให้พืชอยู่ในสภาวะเครียด พืชมีการปิดปากใบเพื่อลดการคายน้ำทำให้ลดการนำเข้าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสงลดลง (Guchou et al., 2007; Xu and Zhou, 2006) ส่งผลกระทบต่อการสร้างพื้นที่ใบ (Cao et al., 2009)

Table 2 Effect of elevated carbon dioxide and temperature on Leaf area (cm^2) of rice RD43 under elevated carbon dioxide (EC:600), the combined elevated carbon dioxide and temperature (ECT:600+3C), elevated temperature (ET:+3C) and a control group (C:400) for 10 weeks

Duration of exposure	EC:600	ECT:600+3C	ET:+3C	C:400	C.V. (%)
1	20.56±1.00a	22.03±0.61a	22.61±0.76a	21.07±0.85a	11.36
2	21.71±0.72a	17.68±0.83b	14.55±0.80c	19.84±0.80ab	12.82
3	18.18±0.54a	16.39±0.71ab	15.88±0.88b	17.09±0.47ab	11.94
4	21.67±0.63a	20.22±1.11a	11.90±0.60c	17.74±0.56b	12.71
5	22.86±0.75a	17.44±0.73b	12.17±0.53c	17.92±0.76b	11.92
6	23.45±1.00a	18.30±0.41c	13.72±0.58d	21.40±0.61b	10.67
7	23.18±0.91a	16.66±0.74c	16.35±0.64c	20.52±0.97b	12.95
8	22.81±0.90a	17.09±0.78b	15.47±1.11b	20.79±0.36a	13.13
9	21.83±0.76a	19.17±0.38b	17.29±0.91b	18.33±0.92b	12.11
10	21.72±0.54a	19.57±0.73b	16.33±0.59c	20.03±0.26b	8.56

The data represent the mean± SE (n = 9 leaf area). Different letters indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$.

.

การเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อมวลชีวภาพของข้าว กข43

การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มมวลชีวภาพของข้าวได้ ภายใต้ชุดการทดลองเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ (EC:600) ต้นข้าวมีมวลชีวภาพส่วนต้น ราก และทั้งหมด 69.59, 17.28 และ 86.87 กรัม ในขณะที่กลุ่มควบคุม (C:400) มีมวลชีวภาพส่วนต้น ราก และทั้งหมด 58.21, 13.91 และ 72.17 กรัม ตามลำดับในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ (ET:+3C) ส่งผลต่อการลดลงของมวลชีวภาพทั้งส่วนต้น ราก และมวลชีวภาพทั้งหมด โดยต้นข้าวมีมวลชีวภาพส่วนต้น ราก และทั้งหมด เท่ากับ 43.31, 10.67 และ 53.98 กรัม ตามลำดับ **(Figure 1)** สำหรับการศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์สามารถลดผลกระทบจากสภาวะเครียดจากอุณหภูมิได้ โดยต้นข้าวในชุดการทดลอง ECT:600+3C มีมวลชีวภาพส่วนต้น ราก และทั้งหมดเท่ากับ 65.68, 13.47 และ 79.15 กรัม ตามลำดับ ผลการศึกษาผลการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อมวลชีวภาพของข้าว กข43 ประเมินได้ว่าเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความสำคัญกับประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง (Long et al., 2004) ส่งผลต่อการเพิ่มมวลชีวภาพ (Peng et al., 2004) เนื่องจากพืชสามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อทำปฏิกิริยาร่วมกับเอนไซม์ไรบูโรสบิสฟอสเฟตคาร์บอกซิเลส โดยแม้อยู่ภายใต้สภาวะซึ่งปากใบของพืชปิดซึ่งเป็นการปรับตัวในระยะแรกจากสภาวะเครียดร้อน การลดลงของค่าการชักนำการเปิดปิดปากใบส่งผลให้การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงไปด้วย แต่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นช่วยเพิ่มการดูดซึมคาร์บอนเข้าสู่พืชเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงทำให้ลดผลกระทบจากสภาวะเครียดความร้อนได้ สอดคล้องกับการศึกษาของ Roy et al. (2012) และ Phothi et al. (2016) พบว่ามวลชีวภาพทั้งส่วนต้น ราก และมวลชีวภาพทั้งหมดของข้าวเพิ่มขึ้นภายใต้สภาวะการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

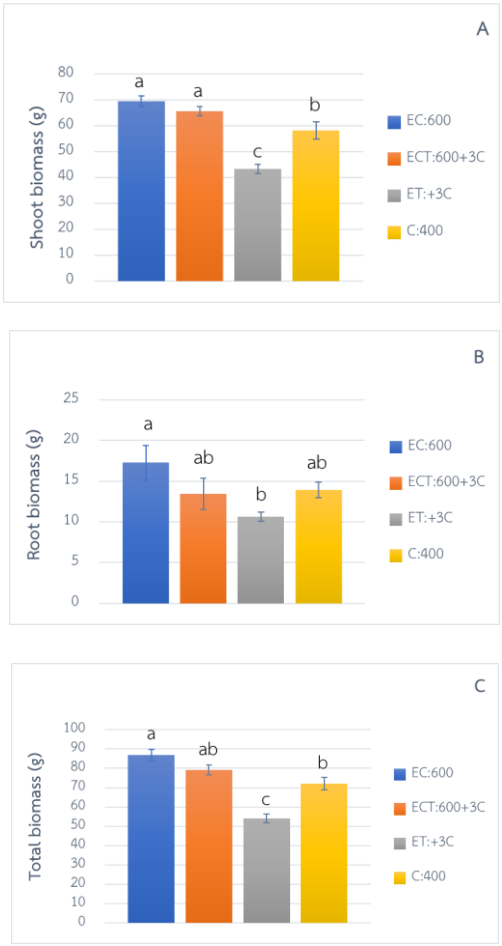

Figure 1 Shoot biomass (A), Root biomass (B) and Total biomass (C). Rice samples were allocated in 4 treatments; elevated carbon dioxide (EC:600), the combined elevated carbon dioxide and temperature (ECT:600+3C), elevated temperature (ET:+3C) and a control group (C:400). The data represent the mean±SE (n = 6 total biomass). Different letters indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$.

ผลกระทบจากการเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิที่มีต่อผลผลิตของข้าว กข43

จำนวนรวงต่อกอ

การศึกษาจำนวนรวงต่อกอใน 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ (EC:600), การเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิ (ECT:600+3C) การเพิ่มของอุณหภูมิ (ET+3C) และกลุ่มควบคุม (C:400) พบว่าชุดการทดลอง EC:600 มีจำนวนรวงต่อกอมากที่สุด รองลงมา ได้แก่ ECT:600+3C, C:400 และ ET:+3C 53.83, 45.17, 37.33 และ 9.67 รวงต่อกอ ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 4 ชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สอดคล้องกับ Lv et al. (2020) พบว่าการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์ 200 ppm จากบรรยากาศ ทำให้ผลผลิตของข้าวจาโปนิกา, อินดิคา และข้าวลูกผสมเพิ่มขึ้น 13.5, 22.6 และ 32.8% จากกลุ่มควบคุม ตามลำดับ และ Hu et al. (2021) ซึ่งพบว่าการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มผลผลิตของข้าวเฉลี่ยถึง 16.2% โดยการเพิ่มจำนวนรวง และจำนวนเมล็ด ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือพันธุ์ข้าว ปริมาณไนโตรเจน และอุณหภูมิ

จำนวนเมล็ดต่อรวงและจำนวนเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ต่อเมล็ดทั้งหมด

จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าว กข43 ลดลงในชุดการทดลอง ET:+3C อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีจำนวนเมล็ดต่อรวงเท่ากับ 68.67 เมล็ด ในขณะที่ชุดการทดลอง EC:600 สามารถเพิ่มจำนวนเมล็ดในข้าว กข43 ได้ โดยมีจำนวนเมล็ดต่อรวงเท่ากับ 114.56 เมล็ด รวมทั้งในชุดการทดลอง ECT:600+3C พบจำนวนเมล็ดต่อรวงเท่ากับ 88.33 เมล็ด เห็นได้ว่าการเพิ่มของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มผลผลิตในส่วนของเมล็ดต่อรวงมากกว่าชุดการทดลอง ET:+3C แต่ยังคงมีจำนวนเมล็ดน้อยกว่าชุดการทดลอง C:400 ซึ่งมีเมล็ดต่อรวงเท่ากับ 96.67 เมล็ด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) **(Figure 2B)** สอดคล้องกับ Wang et al. (2016) พบว่า การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 100 ppm จากบรรยากาศ ทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้น 8% ในขณะที่การเพิ่มของอุณหภูมิ 1.6-1.8 องศาเซลเซียสทำให้ผลผลิตข้าวลดลง 4.7% และการศึกษาจำนวนเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ต่อเมล็ดทั้งหมดพบว่าชุดการทดลอง ET:+3C ทำให้เมล็ดข้าว กข43 ไม่สมบูรณ์ โดยพบเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์มากถึง 75% ในขณะที่ชุดการทดลอง C:400 พบเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ 17.33% และชุดการทดลอง EC:600 และ ECT:600+3C พบเมล็ดไม่สมบูรณ์ 24.00 และ 39.00% ตามลำดับ ซึ่งทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ **(Figure 2C)** สอดคล้องกับ Samol et al. (2015) ได้ศึกษาผลของการเพิ่มอุณหภูมิ 2-4 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ข้าวมีเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ 29.84% ในขณะที่กลุ่มควบคุมมีเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ 17.87% โดยอุณหภูมิสูงมีผลต่อการงอกของละอองเกสร เนื่องจากความร้อนที่มากเกินไปจะทำลายโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ และการสังเคราะห์แสงของข้าว ทำให้ปริมาณน้ำตาลลดลง ส่งผลต่อการงอกของละอองเกสร ทำให้ส่งผลกระทบกับผลผลิตข้าว ต้นข้าวที่อยู่ในช่วงการเจริญเติบโตของระยะสืบพันธุ์ ในช่วงการออกดอกจะได้รับผลกระทบสูงกว่าช่วงการเจริญเติบโตทางลำต้น โดยสภาวะเครียดที่อุณหภูมิสูงในช่วงการเจริญเติบโตของระบบสืบพันธุ์จะส่งผลกระทบต่อการสร้างผลผลิตข้าวและส่งผลให้ผลผลิตข้าวลดลงอย่างมากในที่สุด (Song et al., 2022)

น้ำหนัก 100 เมล็ด

จากการศึกษาพบว่าการเพิ่มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อน้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าว กข43 ในชุดการทดลอง EC:600, ECT:600+3C, ET:+3C และ C:400 มีน้ำหนัก 100 เมล็ด 2.18, 1.93, 1.73 และ 2.97 กรัม ตามลำดับ โดยชุดการทดลอง C:400 มีน้ำหนัก 100 เมล็ดมากที่สุด มีความแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) รองลงมาได้แก่ชุดการทดลอง EC:600 และน้ำหนักเมล็ดน้อยที่สุดในชุดการทดลอง ECT:600+3C และ ET:+3C โดย 2 กลุ่มนี้ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ **(Figure 2D)** สอดคล้องกับ Lv et al. (2020) ที่พบว่าการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 200 ppm จากบรรยากาศแม้จะเพิ่มจำนวนเมล็ดแต่ไม่สามารถทำให้น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวเพิ่มขึ้น โดยน้ำหนัก 100 เมล็ดอยู่ระหว่าง -0.1–1.9% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากนี้ผลกระทบที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันจากชนิดของพันธุ์ข้าว โดย Zhang et al. (2022) ศึกษาผลกระทบของคาร์บอนไดออกไซด์ 700 ppm และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสในข้าว 3 พันธุ์ พบว่าน้ำหนัก 1000 เมล็ดในพันธุ์ข้าว Hejiang (HJ) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างชุดการทดลอง ในขณะที่พันธุ์ข้าว Shoubaimao (SH) มีน้ำหนัก 1000 เมล็ดเฉลี่ยสูงสุดในชุดการทดลองกลุ่มควบคุม รองลงมาได้แก่ชุดการทดลองที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสจากบรรยากาศ และมีน้ำหนัก 1000 เมล็ดน้อยที่สุดโดยมีความแตกต่างทางสถิติกับชุดการทดลองอื่น ๆ ในชุดการทดลองที่ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ 700 องศาเซลเซียส และการเพิ่มอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียส โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การแบ่งตัวของเอนโดสเปิร์มถูกยับยั้ง พื้นที่ผิวและแป้งลดลงส่งผลต่อความกว้าง และความยาวของเมล็ด (Morita et al., 2005) อุณหภูมิสูงทำให้น้ำหนักของเมล็ดข้าวลดลงและส่งผลต่อการผลิตข้าวต่อหน่วยพื้นที่ (Fahad et al., 2016) โดยการที่พืชไวต่อการได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นยังเกี่ยวข้องกับสายพันธุ์พืชอีกด้วย (Baker, 2005)

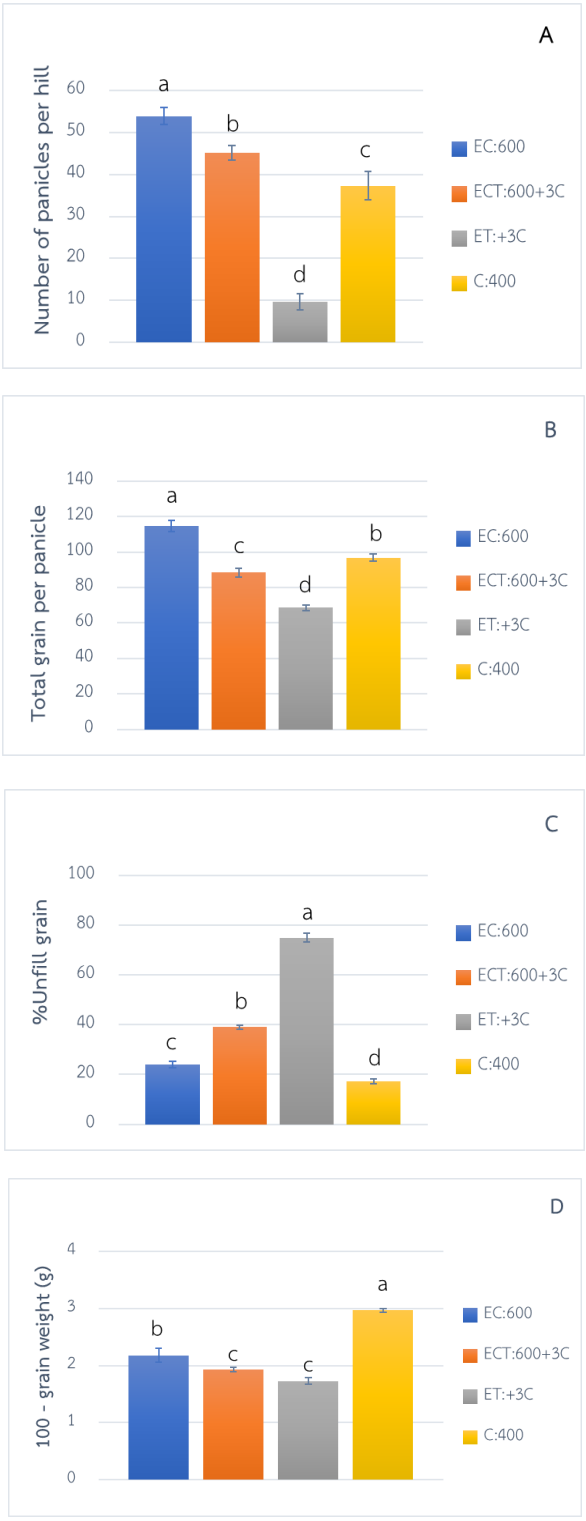

Figure 2 Number of panicles per hill (n=6) (A), Total grain per panicle (n =6) (B), %Untill grain (n =6) (C) and 100-grain weight (n =3) (D). Rice samples were allocated in 4 treatments; elevated carbon dioxide (EC:600), the combined elevated carbon dioxide and temperature (ECT:600+3C), elevated temperature (ET:+3C) and a control group (C:400). The data represent the mean±SE. Different letters indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$.

สรุป

การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลกระทบในทางบวกต่อคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพ และผลผลิตของข้าวกข43 โดยทำให้คลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ และมวลชีวภาพเพิ่มมากขึ้น และในส่วนของผลผลิตการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของจำนวนรวงต่อกอ จำนวนเมล็ดต่อรวง การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลกระทบในทางตรงลบ โดยทำให้คลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพลดลง และยังส่งผลต่อผลผลิตโดย จำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อรวงลดลง นอกจากนี้ยังส่งผลต่อการเกิดเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์ และผลกระทบร่วมระหว่างเพิ่มก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสามารถลดผลกระทบในทางลบจากการเพิ่มของอุณหภูมิที่มีต่อคลอโรฟิลล์ พื้นที่ใบ มวลชีวภาพ และผลผลิต

คำขอบคุณ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ 2565 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และศูนย์วิจัยข้าวชัยนาทที่ให้ความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์ข้าว

เอกสารอ้างอิง

สถาบันวิจัยข้าว. 2548. การใช้แผ่นเทียบสี (Leaf Color Chart) เพื่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนในการปลูกข้าวนาชลประทาน. แหล่งข้อมูล: http://www.brrd.in.th/rkb/content/manual/E-book/Eb_015.pdf. สืบค้นเมื่อ 12 ตุลาคม 2565.

Baker, T.J. 2005. Yield responses of southern US rice cultivars to CO_2 and temperature. Agricultural and Forest Meteorology. 122: 129-137.

Cao, Y.Y., H. Duan, L.N. Yang, Z.Q. Wang, L.J. Liu, and J.C. Yang. 2009. Effect of high temperature during heading and early filling on grain yield and physiological characteristics in indica rice. Acta Agronomica Sinica. 35(3): 512-521.

Coast, O., A.J. Murdoch, R.H. Ellis, F.R. Hay, and K.S.V. Jagadish. 2016. Resilience of rice (Oryza spp.) pollen germination and tube growth to temperature stress. Plant, Cell and Environment. 39(1): 26-37.

Chaturvedi, A.K., R.N. Bahuguna, M. Pal, D. Shah, S. Maurya, and K.S.V. Jagadish. 2017. Elevated CO_2 and heat stress interactions affect grain yield, quality, and mineral nutrient composition in rice under field conditions. Field Crops Research. 206: 149-157.

Fahad, S., A.A. Bajwa, U. Nazir, S.A. Anjum, A. Farooq, A. Zohaib, S. Sadia, W. Nasim, S. Adkins, S. Saud, M.Z. Ihsan, H. Alharby, C. Wu, D. Wang, and J. Huang. 2017. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. Frontiers in Plant Science. 8: 1147.

Goufo, P., J. Pereira, J. Moutinho-Pereira, C.M. Correia, N. Figueiredo, C. Carranca, E.A.S. Rosa, and H. Trindade. 2014. Rice (*Oryza sativa* L.) phenolic compounds under elevated carbon dioxide (CO_2) concentration. Environmental and Experimental Botany. 99: 28–37.

Guchou, S., Z. Xiaoping, L. Xiaojing, and Z. Ping. 2007. Effects of moderate high-temperature stress on photosynthesis in three saplings of the constructive tree species of subtropical forest. Acta Ecologica Sinica**.** 27(4): 1283-1290.

Hu, S., Y. Wang, and L. Yang. 2021. Response of rice yield traits to elevated atmospheric CO_2 concentration and its

interaction with cultivar, nitrogen application rate and temperature: A meta-analysis of 20 years FACE studies. Science of The Total Environment. 764: 142797.

IPCC. 2013. Climate Change. 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. StockerD. QinG.-K. PlattnerM. TignorS.K. AllenJ. BoschungA. NauelsY. XiaV. BexP.M. Midgley (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York.

Kimball, B.A., K. Kobayashi, and M. Bindi. 2002. Responses of agricultural crops to free air CO_2 enrichment. Advances in Agronomy. 77: 293–368.

Kumari, S., M. Agrawal, and S. Tiwari. 2013. Impact of elevated CO_2 and elevated O_3 on *Beta vulgaris* L.: Pigments, metabolites, antioxidants, growth, and yield. Environmental Pollution. 174: 279-288.

Long, S.P., E.A. Ainsworth, A. Rogers, and D.R. Ort. 2004. Rising Atmospheric Carbon Dioxide: Plants FACE the future. Annual Review of Plant Biology. 55(1): 591-628.

Lv, C., Y. Huang, W. Sun, L. Yu, and J. Zhu. 2020. Response of rice yield and yield components to elevated [CO_2]: A synthesis of updated data from FACE experiments. European Journal of Agronomy. 112: 125961.

Morita, S., J.I Yonemaru, and J.I. Takanashi. 2005. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). Annals of Botany. 95(4): 695–701.

Peng, S., J. Huang, J.E. Sheehy, R.C. Laza, R.M. Visperas, X. Zhong, G.S. Centeno, G.S. Khush, and K.G. Cassman. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 101(27): 9971-9975.

Phothi, R., C. Umponstira, C. Sarin, W. Siriwong, and N. Nabheerong. 2016. Combining effects of ozone and carbon dioxide application on photosynthesis of Thai jasmine rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Khao Dawk Mali 105. Australian journal of crop science. 10(4): 591-597.

Prior, S.A., G.B. Runinon, H. Rogers, T.H. Allen, and R.D. Wayne. 2005. Elevated Atmospheric CO_2 effects on biomass production and soil carbon in conventional and conservation cropping system. Global Change Biology. 11: 657 - 665.

Retallack, G.J., and G.D. Conde. 2020. Deep time perspective on rising atmospheric CO_2. Global and Planetary Change. 189:103177.

Roy, K.S., P. Bhattacharyya, S. Neogi., K.S. Rao, and T.K. Adhya. 2012. Combined effect of elevated CO_2 and temperature on dry matter production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice (*Oryza sativa* L.). Field Crops Research. 139: 71-79.

Samol, P., C. Umponstira, P. Klomjek, and P. Thongsanit. 2015. Responses of rice yield and grain quality to high temperature in open-top chamber to predict impact of future global warming in Thailand. Australian Journal of Crop Science. 9(9): 886-894.

Senapati, M., A. Tiwari, N. Sharma, P. Chandra, B.M. Bashyal, R.K. Ellur, P.K. Bhowmick, H. Bollinedi, K.K. Vinod, A.K. Singh, and S.G. Krishnan. 2022. Rhizoctonia solani Kühn pathophysiology: status and prospects of sheath blight disease management in rice. Frontiers in Plant Science. 13: 881116.

Shi, B.K., J.L. Huang, C.X. Hu, and M.L. Hou. 2014. Interactive Effects of Elevated CO_2 and Temperature on Rice Planthopper, Nilaparvata lugens. Journal of Integrative Agriculture. 13(7): 1520-1529.

Song, Y., C. Wang, H.W. Linderholm, Y. Fu, W. Cai, J. Xu, L. Zhuang, M. Wu, Y. Shi, G. Wang, and D. Chen. 2022. The negative impact of increasing temperatures on rice yields in southern China. Science of The Total Environment. 820: 153262.

Wang, D., L. Ziska, X. Xu, Y. Tao, J. Zhang, G. Liu, C. Cai, L. Song, and C. Zhu. 2023. Adapting rice to rising atmospheric carbon dioxide: A preliminary GMO approach to maintain nutritional integrity. European Journal of Agronomy. 144: 126766.

Wang, J., X. Liu, X. Zhang, P. Smith, L. Li, T.R. Filley, K. Cheng, M. Shen, Y. He, and G. Pan. 2016. Size and variability of crop productivity both impacted by CO_2 enrichment and warming-a case study of 4 year field experiment in a Chinese paddy. Agriculture, Ecosystems and Environment. 221: 40–49.

Xiong, D., X. Ling, J. Huang, and S. Peng. 2017. Meta-analysis and dose-response analysis of high temperature effects on rice yield and quality. Environmental and Experimental Botany. 141: 1–9.

Xu, Z.Z., and G.S. Zhou. 2006. Combined effects of water stress and high temperature on photosynthesis, nitrogen metabolism and lipid peroxidation of a perennial grass Leymus chinensis. Planta. 224: 1080-1090.

Zhang, C., Y. Li, Z. Yu, G. Wang, X. Liu, J. Liu, J. Liu, X. Zhang, K. Yin, and J. Jin, 2022. Co-elevation of atmospheric (CO_2) and temperature alters photosynthetic capacity and instantaneous water use efficiency in rice cultivars in a cold-temperate region. Frontiers in Plant Science. 13: 1037720.