

การใช้ซิลิกอนและโบรอนทางใบเพื่อบรรเทาผลกระทบจากอุณหภูมิสูงต่อผลผลิต และคุณค่าทางโภชนาการของข้าวพันธุ์ กข43

Foliar Application of Silicon and Boron to Alleviate Effects of High Temperature on Yield and Nutritional Quality of Rice Variety RD43

เพ็ญนภา จักรสมศักดิ์¹ และ สาวิกา กอนแสง^{2*}

Pennapa Jaksomsak¹ and Sawika Konsaeng^{2*}

¹ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ. เชียงใหม่ 50200

¹Department of Plant and Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

²สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ. เชียงใหม่ 50290

²Program in Agriculture, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

*Corresponding author: Email: sawika@mju.ac.th

(Received: 30 July 2026; Revised: 15 September 2026 ; Accepted: 23 September 2026)

Abstract: Rice grown in Thailand's dry season is commonly exposed to heat stress from high temperatures, resulting in lower grain yield and quality compared to the wet season. Although foliar application of silicon (Si) or boron (B) can help alleviate this effect, their combined effects on yield and nutritional quality under different growing seasons have not been studied, particularly for RD43 rice, a low glycemic-index variety of increasing economic importance. This study, therefore, aimed to evaluate the effects of foliar-applied silicon and boron on the yield and grain quality of RD43 rice grown in the dry and wet seasons. The treatments included no foliar application, foliar silicon (0.6% Si), foliar boron (0.01% B), and a combination of silicon (0.6% Si) and boron (0.01% B), showed that grain yield and quality were significantly lower in the dry season than in the wet season. Combined Si and B foliar application increased grain set particularly in the dry season and increased grain yield, without affecting nitrogen or protein accumulation in the grain, but reduced grain zinc accumulation. These findings provide guidelines for nutrient management to maintain the yield and nutritional quality of RD43 rice under the differing temperature conditions of each growing season.

Keywords: Silicon (Si), boron (B), rice, heat stress, nutrient management

บทคัดย่อ: ข้าวในฤดูนาปรังของประเทศไทยมักเกิดความเครียดเนื่องจากผลของอุณหภูมิสูง ทำให้ผลผลิตและคุณภาพเมล็ดลดลงเมื่อเทียบกับฤดูนาปี แม้การฉีดพ่นซิลิกอน หรือโบรอนทางใบสามารถช่วยบรรเทาผลกระทบนี้ แต่ยังไม่มีการศึกษาผลร่วมกันต่อผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการภายใต้ความแตกต่างของฤดูปลูก โดยเฉพาะข้าวพันธุ์ กข43 ซึ่งเป็นข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการฉีดพ่นซิลิกอนและโบรอนทางใบต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตข้าวพันธุ์ กข43 ที่ปลูกฤดูนาปรังและนาปี กรรมวิธีทดลอง ได้แก่ ไม่มีการฉีดพ่นธาตุอาหาร ฉีดพ่นด้วยซิลิกอน (0.6% Si) ฉีดพ่นด้วยโบรอน (0.01% B) และฉีดพ่นด้วยซิลิกอน (0.6% Si) ร่วมกับโบรอน (0.01% B) ผลการทดลองพบว่าผลผลิตและคุณภาพผลผลิตเมล็ดในฤดูนาปรังต่ำกว่าฤดูนาปีอย่างมีนัยสำคัญ การฉีดพ่นด้วยซิลิกอนร่วมกับโบรอนช่วยเพิ่มการติดเมล็ด โดยเฉพาะในฤดูนาปรัง และเพิ่มผลผลิตเมล็ด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการสะสมไนโตรเจน และโปรตีนในเมล็ดข้าว แต่พบว่าทำให้การสะสมสังกะสีในเมล็ดลดลง ผลการศึกษานี้เป็นแนวทางการจัดการธาตุอาหารเพื่อรักษาผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวพันธุ์ กข43 ในสภาพอุณหภูมิที่ต่างกันของแต่ละฤดูปลูก

คำสำคัญ: ซิลิกอน โบรอน ข้าว ความเครียดจากความร้อน การจัดการธาตุอาหาร

คำนำ

การปลูกข้าวในประเทศไทยโดยทั่วไปมีการปลูกในฤดูนาปีและนาปรัง (Rerkasem, 2017) ในทั้งสองฤดูปลูกมีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างฤดูนาปีเป็นการปลูกในช่วงมิถุนายน-พฤศจิกายน ซึ่งมีปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยสูงกว่า 100 มิลลิเมตรในเดือนมิถุนายน-ตุลาคม และลดลงต่ำกว่า 60 มิลลิเมตรในเดือนพฤศจิกายน ขณะที่ในฤดูนาปรังซึ่งปลูกช่วงเดือนธันวาคม-เมษายน มีปริมาณน้ำฝนรายเดือนเฉลี่ยน้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ทำให้ไม่สามารถปลูกข้าวได้ในพื้นที่นอกเขตชลประทาน (Thai Meteorological Department, 2026) นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ยในฤดูนาปรังมีค่าสูงที่สุดถึง 36.1 องศาเซลเซียส ในเดือนเมษายน เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดรายวันเฉลี่ยในฤดูนาปีพบว่ามีความสูงที่สุด 32.6 องศาเซลเซียส ในเดือนมิถุนายน (Rerkasem, 2018) ทำให้ผลผลิตข้าวในฤดูนาปรังน้อยกว่าฤดูนาปี การลดลงของผลผลิตข้าวที่ปลูกภายใต้ภาวะแล้งและอุณหภูมิสูงเกิดจากความล้มเหลวในกระบวนการผสมเกสร และการปฏิสนธิของข้าว ในระยะผสมเกสร (Matsui et al., 2001; Rang et al., 2011) ซึ่งเป็นผลกระทบของความเครียดจากความร้อน (Heat stress) ดังตัวอย่างงานวิจัยในประเทศไทยจำนวนมากที่ได้มีการรายงานถึงผลกระทบของอุณหภูมิสูงที่มีต่อผลผลิตข้าว

การปลูกข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 เหนียวแพร่ 1 R258 และสกลนคร ในฤดูนาปรัง พบว่าผลผลิตข้าวลดลงเกือบ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับฤดูนาปี (Sukkeo et al., 2017) การได้รับอุณหภูมิสูงในช่วงที่ดอกบาน ทำให้ความมีชีวิตของละอองเรณูข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวที่อ่อนแอต่ออุณหภูมิสูง ลดลงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ และการติดเมล็ดลดลง 77 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิกลางวันในช่วงดอกบานเพิ่มขึ้นจาก 34 เป็น 36 องศาเซลเซียส (Jongjaidee et al., 2010) นอกจากนี้ยังพบว่า การปลูกข้าวในสภาพภูมิอากาศที่ต่างกันของฤดูนาปีและนาปรังยังส่งผลต่อขนาดเมล็ด และคุณภาพการขัดสี เช่น เปอร์เซ็นต์ตันข้าว และท้องไข อีกด้วย (Laenoi et al., 2018)

การจัดการธาตุอาหารเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยบรรเทาผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม โบรอนเป็นจุลธาตุที่มีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับความมีชีวิตของละอองเรณูและการออกของละอองเรณู (Chen et al., 1998) พบงานวิจัยที่รายงานว่าข้าวที่ออกดอกในช่วงอุณหภูมิสูง หากได้รับสารละลายธาตุอาหารที่มีโบรอนเพียงพอ ทำให้ความมีชีวิตของละอองเรณู การออกของละอองเรณู และการติดเมล็ด เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ได้รับสารละลายธาตุอาหารที่ไม่มีโบรอน (Lordkaew et al., 2013) นอกจากนี้ยังพบรายงานเกี่ยวกับการให้ปุ๋ยโบรอนทางใบในการเพิ่มผลผลิต

และคุณภาพผลผลิต ตัวอย่างเช่น การให้สารละลายโบรอนทางใบความเข้มข้น 0.05, 0.1 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ในรูปของบอแรกซ์ ทำให้มีการสะสมโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น (Pandey and Gupta, 2013) งานวิจัยล่าสุดยังยืนยันว่าการให้โบรอนช่วยเพิ่มการดูดใช้ธาตุโบรอนและผลผลิตของข้าวได้ดีกว่าการไม่ได้รับโบรอน (Songsriin *et al.*, 2023) ในสภาพอากาศที่มีอุณหภูมิสูงในฤดูร้อนมักมีสภาวะแล้งร่วมด้วยซิลิกอนเป็นธาตุเสริมประโยชน์ที่ช่วยลดผลกระทบจากสภาวะแล้งในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวสาลี และข้าว (Marschner, 2012) โดยมีบทบาทในการรักษาปริมาณน้ำในใบ จากการลดการสูญเสียน้ำ และเพิ่มการดูดทางรากเพิ่มอัตราการสังเคราะห์แสง และการดูดซึมธาตุอาหารของพืช (Chen *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวโดยบรรเทาความเครียดทั้งจากปัจจัยทางชีวภาพและกายภาพ ทั้งนี้ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืชซึ่งช่วยเสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์ (Chaiwong and Prom-u-thai, 2022) มีรายงานว่า การให้ปุ๋ยซิลิกอนช่วยเพิ่มผลผลิตข้าว พร้อมกับกระตุ้นการแสดงออกของยีนขนส่งซิลิกอนในต้นข้าว (Chaiwong *et al.*, 2022) สำหรับการตอบสนองของข้าวต่อปุ๋ยซิลิกอนทางดิน พบว่าการให้ในอัตราที่เหมาะสมช่วยเพิ่มผลผลิตได้สูงสุด แต่การให้ในอัตราที่สูงเกินไปกลับทำให้ผลผลิตลดลงโดยเฉพาะในดินที่มีความเป็นประโยชน์ของซิลิกอนต่ำ (Sukyankij *et al.*, 2023) การให้ซิลิกอนทางดินในรูปแคลเซียมซิลิเกตอัตรา 200-600 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ยังช่วยให้ข้าวที่ปลูกในสภาพไร่น้ำท่วมต่อสภาวะแล้ง และมีผลผลิตสูงกว่าการไม่ใส่ซิลิกอน (Nolla *et al.*, 2012) นอกจากนี้ ซิลิกอนยังช่วยลดความเสียหายจากความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) และรักษาสมดุลของกระบวนการเผาผลาญในระดับเซลล์เมื่อพืชเกิดความเครียด (Sarkar *et al.*, 2022) อย่างไรก็ตามการให้ปุ๋ยทางดินอาจไม่ได้ผล หากพืชอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม การพ่นทางใบจึงเป็นวิธีการจัดการธาตุอาหารที่ช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารเพียงพอและตอบสนองต่อความเครียดได้อย่างรวดเร็ว (Osotsapar, 2015)

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงข้าวพันธุ์สมัยใหม่ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เป็นข้าวตลาดเฉพาะที่มี

ความสำคัญทางเศรษฐกิจ ข้าวพันธุ์ กข43 เป็นข้าวที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index) ปานกลางค่อนข้างต่ำ โดยการศึกษาในอาสาสมัครสุขภาพดีพบว่าข้าว กข43 มีค่าดัชนีน้ำตาลเฉลี่ย 56.9 เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหอมมะลิที่มีค่า 80.1 และยังให้ค่าตอบสนองน้ำตาลในเลือดหลังบริโภคต่ำกว่าข้าวหอมมะลิถึง 28.8 เปอร์เซ็นต์ (Sanpawithayakul *et al.*, 2026) จึงเป็นที่นิยมในกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และผู้รักสุขภาพ โดยมีแนวโน้มความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มขึ้น

แม้ว่าจะมีรายงานผลของการฉีดพ่นซิลิกอนและโบรอนร่วมกันในข้าว โดยพบว่าการฉีดพ่นซิลิกอนที่ 3,000 ppm ร่วมกับโบรอนที่ 90 ppm ให้ผลดีที่สุดต่อจำนวนรวง ความยาวรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนักเมล็ด ในข้าวพันธุ์ Sakha 104 (El-Temsah, 2017) แต่งานวิจัยดังกล่าวดำเนินการในสภาพภูมิอากาศเขตอบอุ่นถึงแห้งแล้ง ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างฤดูปลูกไม่ได้มีลักษณะเป็นความเครียดจากอุณหภูมิสูงที่ชัดเจนเช่นเดียวกับความแตกต่างระหว่างฤดูนาปีและนาปรังของประเทศไทย นอกจากนี้ยังเน้นการศึกษาเฉพาะองค์ประกอบผลผลิตและคุณภาพด้านโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต โดยไม่ได้ประเมินผลต่อธาตุอาหารในเมล็ด เช่น สังกะสี ซึ่งมีความสำคัญต่อคุณค่าทางโภชนาการของข้าว ในขณะที่งานวิจัยด้านซิลิกอนและโบรอนในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาผลของแต่ละธาตุแยกจากกัน (Lordkaew *et al.*, 2013; Chaiwong *et al.*, 2022; Songsriin *et al.*, 2023) ยังไม่พบรายงานที่ประเมินผลของการให้ซิลิกอนและโบรอนทางใบร่วมกันภายใต้สภาพภูมิอากาศที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างชัดเจนระหว่างฤดูปลูก ประกอบกับข้าวพันธุ์ กข43 เป็นข้าวตลาดเฉพาะที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเพิ่มขึ้นจากคุณสมบัติที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ แต่ยังไม่มีการศึกษาการจัดการธาตุอาหารเพื่อรักษาผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวพันธุ์นี้ ภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกันของแต่ละฤดูปลูก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของการพ่นซิลิกอนและโบรอนทางใบต่อผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการข้าวพันธุ์ กข43 ในฤดูปลูกที่ต่างกัน เพื่อเป็นแนวทางการจัดการธาตุอาหารเมื่อต้องปลูกข้าวในสภาพที่อุณหภูมิสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

ดำเนินงานวิจัยที่แปลงเกษตรกรใน ต.สันป่าเปา อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ ดินในแปลงปลูกจัดอยู่ในชุดดินสันทราย เก็บตัวอย่างดินก่อนการปลูก วิเคราะห์ความอุดมสมบูรณ์ของดินเบื้องต้น ประกอบด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณอินทรีย์วัตถุ และปริมาณธาตุอาหารในดิน (total N, available P, exchangeable K, exchangeable Ca, exchangeable Mg, available Zn, available Mn, available Fe และ available Cu) ใช้วิธีการวิเคราะห์ตามคู่มือการวิเคราะห์ดินและพืช (Puranapong, 2005) ผลการวิเคราะห์สมบัติดินก่อนเริ่มดำเนินการทดลองแสดงใน Table 1 พบว่า ดินมีค่า pH 6.4 เป็นกรดเล็กน้อย มีอินทรีย์วัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ระดับปานกลาง ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ แมงกานีสที่เป็นประโยชน์ เหล็กที่เป็นประโยชน์ และทองแดงที่เป็นประโยชน์ในระดับสูง

ปลูกข้าวพันธุ์ กข43 โดยใช้ต้นกล้าข้าวอายุ 40 วัน ด้วยวิธีนาค้ำใช้ต้นกล้า 2-3 ต้นต่อหลุม ระยะปลูก 25 x 25 เซนติเมตร การใส่ปุ๋ยทางดินใส่ปุ๋ยไนโตรเจนรูปยูเรีย 75 กิโลกรัม N/เฮกตาร์ แบ่งใส่ 2 ครั้งในอัตราที่เท่ากัน เมื่อข้าวอายุ 15 วัน และ 45 วันหลังปักดำ มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0-42-0) 12.5 กิโลกรัม P_2O_5 /เฮกตาร์ และโพแทสเซียม (0-0-60) อัตรา 20 กิโลกรัม K_2O /เฮกตาร์ (Osotsaparn *et al.*, 2008) พร้อมกับการใส่ปุ๋ยครั้งที่ 1 วางแผนการทดลองแบบ Factorial in RCBD (Randomized complete block design) จำนวน 4 ซ้ำ ขนาดแปลง 12 x 15 ตารางเมตร ปัจจัยการทดลองประกอบด้วย 2 ปัจจัย ปัจจัยที่ 1 คือ ฤดูปลูก 2 ฤดู ได้แก่ ฤดูนาปรัง (ปลูกข้าวในวันที่ 23 กุมภาพันธ์ 2566 เพื่อให้ออกดอกในช่วงเดือนเมษายน ซึ่งเป็นช่วงที่มีอุณหภูมิสูงพิจารณาจากข้อมูลสภาพอากาศย้อนหลัง 5 ปี (พ.ศ. 2561-2565) ของสถานีอุตุนิยมวิทยาเชียงใหม่) และฤดูนาปี (ปลูกข้าวในวันที่ 6 สิงหาคม 2566) ปัจจัยที่ 2 คือ กรรมวิธีฉีดพ่นธาตุอาหารทางใบ 4 กรรมวิธี ได้แก่ ไม่มีการพ่นปุ๋ยทางใบ พ่นซิลิกอนทางใบ (0.6 เปอร์เซ็นต์ Si

Table 1 Soil properties before the experiment

Soil properties ¹	Analysis
pH	6.4
Organic matter (%)	2.25
Total N (%)	0.113
Available P (mg/kg)	118
Exchangeable K (mg/kg)	86
Exchangeable Ca (mg/kg)	2,265
Exchangeable Mg (mg/kg)	284
Available Zn (mg/kg)	2.45
Available Mn (mg/kg)	27
Available Fe (mg/kg)	231
Available Cu (mg/kg)	5.6

¹Analysis method: pH-1:1 soil: water, Organic matter-Walkley and Black, total N-Kjeldahl, available P-Bray II, exchangeable K, exchangeable Ca and exchangeable Mg-extracted by ammonium acetate and analyzed by atomic absorption spectrophotometer, available Zn, available Mn available Fe and available Cu-extracted by DTPA and analyzed by atomic absorption spectrophotometer

เตรียมจาก Sodium metasilicate) พ่นโบรอนทางใบ (0.01 เปอร์เซ็นต์ B เตรียมจาก Boric acid) และพ่นทางใบด้วยซิลิกอน (0.6 เปอร์เซ็นต์ Si) ร่วมกับโบรอน (0.01 เปอร์เซ็นต์ B) สำหรับการพ่นปุ๋ยทางใบ มีการพ่นตามกรรมวิธีทดลอง 2 ครั้ง ในระยะข้าวตั้งท้อง (booting) และระยะออกรวง (heading) แต่ละกรรมวิธีพ่นปุ๋ยอัตรา 200 มิลลิลิตร ในพื้นที่ 4 ตารางเมตร

การบันทึกข้อมูลในทั้ง 2 ฤดู ประกอบด้วย การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดตั้งแต่ระยะสร้างช่อดอกจนถึงระยะดอกบาน เมื่อถึงระยะเก็บเกี่ยว (physical maturity) สุ่มเก็บผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตจากพื้นที่ 1 ตารางเมตร บันทึกข้อมูลความสูงของต้นข้าว จำนวนหน่อ จำนวนรวง น้ำหนักแห้งฟาง และน้ำหนักผลผลิตเมล็ด วัดความชื้นของเมล็ด แล้วคำนวณเป็นผลผลิตที่ความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์ สุ่มเก็บตัวอย่างรวงข้าวจำนวน 10 รวงต่อกรรมวิธี นับจำนวนเมล็ดต่อรวง จำนวนเมล็ดดี แล้วคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ด สุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือกจากแต่ละกรรมวิธี 100 เมล็ด ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ซึ่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง คำนวณเป็นน้ำหนัก 1,000 เมล็ด วิเคราะห์คุณภาพข้าวด้านโภชนาการ โดยนำตัวอย่างข้าวกล้องมาบดละเอียด วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ด้วยวิธี Kjeldahl คำนวณเป็นปริมาณโปรตีน โดยคูณปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดด้วย Kjeldahl factor ของเมล็ดข้าว (5.95) (Perez *et al.*, 1996) วิเคราะห์

ปริมาณธาตุสังกะสี โดยย่อยตัวอย่างด้วยกรดไนตริก-เปอร์คลอริก อ่านค่าด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (Puranapong, 2005)

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) ด้วยโปรแกรม Statistix 10 for Windows เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่า Least Significant Difference (LSD) ที่ความเชื่อมั่น 95%

ผลการศึกษาและวิจารณ์

อุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยในระยะการสร้างช่อดอกถึงระยะดอกบาน

Table 2 แสดงอุณหภูมิต่ำสุด สูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน ระหว่างระยะการสร้างช่อดอกถึงระยะดอกบาน ในฤดูนาปรัง อุณหภูมิต่ำสุดระยะสร้างช่อดอกมีค่า 22.5-25.6 องศาเซลเซียส สูงสุด 37.0-41.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง 27.2-30.1 องศาเซลเซียส ในระยะออกดอกอุณหภูมิต่ำสุด สูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 23.4-27.5, 38.2-42.6 และ 28.4-32.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ สำหรับฤดูนาปี อุณหภูมิต่ำสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยในระยะสร้างช่อดอกมีค่าใกล้เคียงกับฤดูนาปรัง (23.4-25.8 และ 25.0-30.0 องศาเซลเซียส) ขณะที่อุณหภูมิสูงสุดในระยะสร้างช่อดอก รวมถึงอุณหภูมิต่ำสุด อุณหภูมิสูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยใน

Table 2. Minimum, maximum and average daily temperature during panicle initiation to flowering of rice variety RD43 grown in dry and wet seasons of the year 2022/2023

Growing season		Temperature (°C)	
		Panicle initiation	Flowering
<u>Dry season</u> Apr 18-24, 2023	Minimum temperature	22.5 - 25.6	23.4 - 27.5
	Maximum temperature	37.0 - 41.5	38.2 - 42.6
	Average temperature	27.2 - 30.1	28.4 - 32.6
<u>Wet season</u> Sep 30-Oct 3, 2023	Minimum temperature	23.4 - 25.8	23.9 - 25.8
	Maximum temperature	27.5 - 36.8	29.8 - 36.2
	Average temperature	25.0 - 30.0	26.1 - 29.9

ระยะดอกบานในฤดูนาปรังมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฤดูนาปี จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่สูงในฤดูนาปรังส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต รวมทั้งคุณภาพข้าวในด้านคุณค่าทางโภชนาการของข้าวพันธุ์ กข43 ซึ่งมีความแตกต่างจากฤดูนาปรังอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในฤดูนาปรังอุณหภูมิสูงสุดรายวันมีค่าสูงถึง 42.6 องศาเซลเซียส รวมทั้งมีช่วงที่อุณหภูมิสูงกว่า 32 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อการเจริญของข้าวทุกระยะ (Aghamolki *et al.*, 2014) นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงที่ข้าวอยู่ในระยะตั้งท้อง และระยะออกดอก อุณหภูมิสูงสุดมีค่าระหว่าง 37.0-41.5 และ 38.2-42.6 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในทั้งสองระยะมีค่าสูงกว่า 35-36 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤติสำหรับการสร้างผลผลิตข้าวตามที่ Yoshida (1978) ได้รายงานไว้ ทั้งนี้ใน

ช่วงฤดูนาปีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลาดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าในฤดูนาปรังโดยอยู่ในช่วง 27.5-36.8 องศาเซลเซียส ในระยะตั้งท้อง และ 29.8-36.2 องศาเซลเซียส ในระยะออกดอก

การเจริญเติบโตที่ระยะเก็บเกี่ยว ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต

จากผลการวิจัยพบว่า ต้นข้าว กข43 ที่ปลูกในฤดูนาปรังมีความสูงที่ระยะเก็บเกี่ยวเพียง 57.08 เซนติเมตร ซึ่งต่ำกว่าต้นข้าวในฤดูนาปี ซึ่งมีความสูงเฉลี่ย 72.91 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าข้าว กข43 ที่ปลูกในฤดูนาปรังมีจำนวนหน่อ 25 หน่อต่อกอ และจำนวนรวง 20 รวงต่อกอ จะเห็นได้ว่าการสร้างหน่อและรวง น้อยกว่าข้าวที่ปลูกในฤดูนาปีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (29 หน่อต่อกอ และ 25 รวงต่อกอ) ทั้งนี้ไม่พบผลของปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างสองปัจจัย และกรรมวิธีการฉีดพ่นธาตุอาหารต่อลักษณะดังกล่าว (Table 3)

Table 3 Plant height, tiller number and panicle number of rice variety RD43 at harvest which were grown in dry and wet seasons 2022/2023 with various foliar-applied treatments

Seasons	Treatments	Plant height (cm)	Tiller number per plant	Panicle number per plant
Dry season	NF	58.17	23	20
	Si	58.54	25	19
	B	52.42	26	21
	SiB	59.21	26	21
Wet season	NF	72.17	29	25
	Si	71.34	29	25
	B	75.00	30	26
	SiB	73.08	30	26
Mean	Dry	57.08 b	25 b	20 b
	Wet	72.91 a	29 a	25 a
	NF	65.17	26	22
	Si	64.96	27	22
	B	63.71	28	24
	SiB	66.15	28	23
F-test	Season (S)	**	**	**
	Treatment (T)	ns	ns	ns
	SxT	ns	ns	ns
	LSD _{0.05} (S)	3.3	2	2
	LSD _{0.05} (T)	-	-	-
	LSD _{0.05} (SxT)	-	-	-

Means followed by different letters are significantly different among treatments according to LSD at $P \leq 0.05$

** = significantly different at $P < 0.01$, ns = not significant

ด้านผลผลิต พบว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นของ น้ำหนักฟาง และผลผลิตเมล็ด เกิดจากฤดูเพาะปลูก หรือ กรรมวิธีการฉีดพ่นธาตุอาหารอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยไม่พบ ปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างปัจจัยทั้งสอง การปลูกข้าว กข43 ในฤดูนาปีให้ผลผลิตฟาง 6.8 ตัน/เฮกตาร์ และผลผลิต เมล็ด 4.3 ตัน/เฮกตาร์ ซึ่งสูงกว่าการปลูกในฤดูนาปรัง 1.5 และ 1.7 เท่า ตามลำดับ ส่วนการฉีดพ่นธาตุอาหารพบว่า การฉีดพ่นธาตุซิลิกอนร่วมกับโบรอนทำให้น้ำหนักฟาง และผลผลิตเมล็ดสูงกว่าการไม่ฉีดพ่น และการฉีดพ่นด้วย ซิลิกอนเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ไม่พบอิทธิพลของกรรมวิธี การทดลองต่อน้ำหนัก 1,000 เมล็ด (Table 4)

Table 5 แสดงจำนวนเมล็ดต่อรวง และการ- ติดเมล็ดของข้าว กข43 ที่ได้รับกรรมวิธีการฉีดพ่นธาตุ อาหารที่ต่างกันทั้งสองฤดูปลูก ซึ่งไม่พบความแตกต่าง อย่างมีนัยสำคัญในลักษณะจำนวนเมล็ดต่อรวง โดยมี จำนวนเมล็ด 93 เมล็ดต่อรวง อย่างไรก็ตามพบความ- ต่างโดยมีปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างฤดูเพาะปลูกและ กรรมวิธีการฉีดพ่นธาตุอาหาร การฉีดพ่นโบรอน และ โบรอนร่วมกับซิลิกอน ช่วยให้การติดเมล็ดในฤดูนาปรังสูง กว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่นและการฉีดพ่นซิลิกอน โดยการติดเมล็ดที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าไม่ต่างจากการติดเมล็ดใน ฤดูนาปีในทุกกรรมวิธี เมื่อพิจารณาผลของแต่ละธาตุต่อ

Table 4 Straw yield, grain yield and 1,000 grain weight of rice variety RD43 which were grown in dry and wet seasons 2022/2023 with various foliar-applied treatments

Seasons	Treatments	Straw yield (ton/ha)	Grain yield (ton/ha)	1,000 grain weight (g)
Dry season	NF	4.2	2.3	30.42
	Si	4.6	2.4	30.28
	B	4.6	2.6	30.28
	SiB	4.5	2.9	30.36
Wet season	NF	6.3	4.3	30.52
	Si	6.2	4.0	30.93
	B	7.3	4.3	30.48
	SiB	7.5	4.5	31.02
Mean	Dry	4.5 b	2.5 b	30.34
	Wet	6.8 a	4.3 a	30.74
	NF	5.2 c	3.2 b	30.47
	Si	5.4 bc	3.3 b	30.60
	B	5.9 ab	3.4 ab	30.38
	SiB	6.0 a	3.7 a	30.69
F-test	Season (S)	**	**	ns
	Treatment (T)	**	**	ns
	SxT	ns	ns	ns
	LSD _{0.05} (S)	1.0	0.3	-
	LSD _{0.05} (T)	0.5	0.4	-
	LSD _{0.05} (SxT)	-	-	-

Means followed by different letters are significantly different among treatments according to LSD at $P \leq 0.05$

** = significantly different at $P < 0.01$, ns = not significant

Table 5 Grain number per panicle and percentage of grain set of rice variety RD43 which were grown in dry and wet seasons 2022/2023 with various foliar-applied treatments

Seasons	Treatments	Grain number per panicle	Grain set (%)
Dry season	NF	102	82.04 B
	Si	83	78.17 B
	B	87	87.36 A
	SiB	93	90.14 A
Wet season	NF	93	90.15 A
	Si	91	90.47 A
	B	103	88.73 A
	SiB	96	89.73 A
Mean	Dry	91	84.43 b
	Wet	96	89.77 a
	NF	98	86.09 bc
	Si	87	84.32 c
	B	95	88.05 ab
	SiB	94	89.94 a
F-test	Season (S)	ns	**
	Treatment (T)	ns	**
	SxT	ns	**
	LSD _{0.05} (S)	-	2.22
	LSD _{0.05} (T)	-	3.14
	LSD _{0.05} (SxT)	-	4.44

Means followed by different letters are significantly different among treatments according to LSD at $P \leq 0.05$

** = significantly different at $P < 0.01$, ns = not significant

การติดเมล็ดในฤดูนาปรัง พบว่า ฉีดพ่นโบรอนเพียงอย่างเดียวทำให้การติดเมล็ด 87.36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่แตกต่างจากการฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอน ขณะที่การติดเมล็ดจากการฉีดพ่นซิลิกอนอย่างเดียวมีค่าไม่แตกต่างจากกรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่นธาตุอาหาร แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของการติดเมล็ดภายใต้อุณหภูมิสูง เป็นอิทธิพลที่มาจากโบรอนมากกว่าซิลิกอน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากบทบาทของโบรอนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับความมีชีวิตของละอองเรณู และกระบวนการงอกของหลอดละอองเรณู (Chen *et al.*, 1998; Lordkaew *et al.*, 2013) ซึ่งเป็นกระบวนการเฉพาะเจาะจงในช่วงการผสมเกสร

ส่วนซิลิกอนมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างพืช และการรักษาสมดุลน้ำ ซึ่งอาจมีผลทางอ้อมต่อการติดเมล็ด (Marschner, 2012)

ในงานวิจัยนี้พบว่าข้าว กข43 ที่ปลูกในฤดูนาปรังมีการติดเมล็ดที่ลดลง 5.34 เปอร์เซ็นต์ และทำให้ผลผลิตลดลง 40.41 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับฤดูนาปี ซึ่งสอดคล้องกับกลไกความล้มเหลวในกระบวนการผสมเกสรภายใต้ความเครียดจากอุณหภูมิสูงที่มีรายงานไว้ในข้าวพันธุ์อื่น (Jagadish *et al.*, 2007; Matsui *et al.*, 2001; Prasad *et al.*, 2006; Rang *et al.*, 2011) จากรายงานของ Rehman *et al.* (2014) ที่พบว่าการฉีดพ่นโบรอนช่วย

เพิ่มเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ด และผลผลิตเมล็ด แต่ในงานวิจัยนี้ ได้ผลที่ต่างออกไป แม้ว่าการฉีดพ่นโบรอนทำให้มีการติดเมล็ดมากขึ้น แต่พบว่าการฉีดพ่นโบรอนเพียงอย่างเดียวไม่ได้ทำให้ผลผลิตเมล็ด มีความแตกต่างจากกรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่นธาตุอาหาร เนื่องจากในกระบวนการสร้างผลผลิตข้าว มีกระบวนการอื่นที่เกี่ยวข้องนอกเหนือจากขั้นตอนการผสมเกสร จะเห็นได้จากความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตเมล็ดกับจำนวนหน่อตอก และจำนวนรวงตอก อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้พบว่าการฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอนช่วยให้มีเปอร์เซ็นต์การติดเมล็ดมากขึ้น รวมทั้งได้ผลผลิตเมล็ดที่สูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่นธาตุอาหาร อาจเนื่องมาจากซิลิกอนที่ฉีดพ่นร่วมกับโบรอนมีบทบาทในการลดการสูญเสีย น้ำ ช่วยเพิ่มอัตราการสังเคราะห์แสง ซึ่งส่งผลต่อการสะสม น้ำหนักเมล็ด (Chen *et al.*, 2011)

คุณค่าทางโภชนาการในเมล็ดข้าว

ฤดูเพาะปลูกมีผลกระทบต่อปริมาณไนโตรเจน และโปรตีนในเมล็ดข้าวกล้องพันธุ์ กข43 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในฤดูนาปีมีปริมาณไนโตรเจน และโปรตีนในเมล็ดข้าวกล้อง 1.53 และ 9.10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฤดูนาปรังมีค่า 1.42 และ 8.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยไม่พบผลจากกรรมวิธีการฉีดพ่นธาตุอาหารต่อปริมาณไนโตรเจน และโปรตีนในเมล็ดข้าว สำหรับปริมาณสังกะสีพบที่ไม่ได้รับผลกระทบจากฤดูเพาะปลูก แต่พบว่าการได้รับการฉีดพ่นธาตุอาหารที่ต่างกันทำให้ปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องมีความแตกต่างกัน ดังแสดงใน Table 6 มีรายงานว่าซิลิกอนสามารถลดการดูดซับสังกะสีเข้าสู่รากข้าวผ่านการกักการ แสดงออกของยีนขนส่งสังกะสี โดยไม่มีผลต่อสัดส่วนการเคลื่อนย้ายจากรากไปยังส่วนเหนือดิน (Huang *et al.*, 2020)

Table 6 Nitrogen, protein and Zn in brown rice of rice variety RD43 which were grown in dry and wet seasons 2022/2023 with various foliar-applied treatments

Seasons	Treatments	Nitrogen (%)	Protein (%)	Zn (mg/kg)
Dry season	NF	1.41	8.39	17.50
	Si	1.47	8.72	18.25
	B	1.41	8.44	17.00
	SiB	1.36	8.14	16.00
Wet season	NF	1.45	8.66	17.50
	Si	1.53	9.12	18.50
	B	1.56	9.25	16.75
	SiB	1.58	9.37	16.75
Mean	Dry	1.42 b	8.42 b	17.19
	Wet	1.53 a	9.10 a	17.38
	NF	1.43	8.52	17.50 b
	Si	1.50	8.92	18.38 a
	B	1.49	8.84	16.88 bc
	SiB	1.47	8.74	16.38 c
F-test	Season (S)	**	**	ns
	Treatment (T)	ns	ns	**
	SxT	ns	ns	ns
	LSD _{0.05} (S)	0.06	0.36	0.70
	LSD _{0.05} (T)	-	-	-
	LSD _{0.05} (SxT)	-	-	-

Means followed by different letters are significantly different among treatments according to LSD at $P \leq 0.05$

** = significantly different at $P < 0.01$, ns = not significant

ซึ่งกลไกนี้สอดคล้องกับผลที่พบในกรรมวิธีที่มีการฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอนที่มีปริมาณสังกะสีในข้าวกล้องน้อยกว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่น 6.4 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่สามารถอธิบายผลตรงข้ามที่พบในกรรมวิธีการฉีดพ่นซิลิกอนเพียงอย่างเดียว ที่พบว่าปริมาณสังกะสีในข้าวกล้องสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่น ทั้งนี้ในงานวิจัยดังกล่าวศึกษาในสภาพไฮโดรโปนิกส์และเป็นการให้ซิลิกอนทางราก ซึ่งอาจมีกลไกการตอบสนองที่แตกต่างจากการฉีดพ่นทางใบในสภาพแปลงดังเช่นในงานวิจัยนี้ ความแตกต่างของการตอบสนองระหว่างกรรมวิธีการฉีดพ่นซิลิกอน และซิลิกอนร่วมกับโบรอน จึงอาจเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างซิลิกอนกับโบรอนต่อระบบขนส่งธาตุอาหารในพืช ซึ่งยังไม่มีการศึกษากลไกที่ชัดเจน นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีภายในต้นข้าว ที่เกิดจากความแตกต่างทางพันธุกรรม และสภาพแวดล้อมการปลูก รวมทั้งไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องกับผลผลิตเมล็ดในข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และกำหอม มข. ที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งกลไกการควบคุมทั้งสองลักษณะนี้อาจแยกจากกันในทางสรีรวิทยา (Rinsinjoy *et al.*, 2019) สอดคล้องกับผลจากการทดลองนี้ ที่พบว่าปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวไม่ได้แปรผันไปในทิศทางเดียวกับผลผลิตเมล็ด

สรุป

จากการดำเนินการวิจัยเพื่อประเมินผลกระทบจากอุณหภูมิสูงในฤดูนาปรังต่อผลผลิตและคุณภาพข้าว คุณค่าทางโภชนาการสูง โดยได้ทำการศึกษาในข้าวพันธุ์ กข43 งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าข้าวพันธุ์นี้ที่ปลูกในฤดูนาปรังมีการเจริญเติบโต การให้ผลผลิต และคุณค่าทางโภชนาการต่ำกว่าฤดูนาปีอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลจากความเครียดจากอุณหภูมิสูงในช่วงการสร้างช่อดอกและออกดอก การฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอนทางใบสามารถช่วยบรรเทาผลกระทบดังกล่าวได้บางส่วน โดยเพิ่มการติดเมล็ด และผลผลิตเมล็ดให้สูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่มีการฉีดพ่นธาตุอาหาร โดยไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณไนโตรเจนและโปรตีนในเมล็ด แต่พบว่าการฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอน

ทำให้ปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องลดลง ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ควรพิจารณาควบคู่กับการเพิ่มผลผลิต ผลการทดลองยังชี้ให้เห็นว่าการจัดการธาตุอาหารสามารถช่วยรักษาผลผลิตข้าว กข43 ที่ปลูกภายใต้สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังไม่สามารถชดเชยผลกระทบด้านคุณค่าทางโภชนาการได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตามควรมีการทดสอบอัตรา และช่วงเวลาในการฉีดพ่นที่เหมาะสม รวมถึงตรวจสอบกลไกที่ทำให้ปริมาณสังกะสีลดลงเมื่อฉีดพ่นซิลิกอนร่วมกับโบรอน เพื่อพัฒนาแนวทางการจัดการธาตุอาหารที่รักษาทั้งผลผลิตและคุณค่าทางโภชนาการของข้าวพันธุ์นี้ได้อย่างสมดุลภายใต้สภาพภูมิอากาศที่มีอุณหภูมิสูง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมูลนิธิฐาน (Fundamental Fund) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 จากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

- Aghamolki, M.T.K., M.K. Yusop, F.C. Oad, H. Zakikhani, H.Z. Jaafar, S. Kharidah and M.H. Musa. 2014. Heat stress effects on yield parameters of selected rice cultivars at reproductive growth stages. *Journal of Food, Agricultural and Environment* 12(2): 741-746.
- Chaiwong, N. and C. Prom-u-thai. 2022. Significant roles of silicon for improving crop productivity and factors affecting silicon uptake and accumulation in rice: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22(2): 1970-1982.
- Chaiwong, N., T. Pusadee, S. Jamjod and C. Prom-u-thai. 2022. Silicon application promotes productivity, silicon accumulation and

- upregulates silicon transporter gene expression in rice. *Plants* 11(7): 989, doi: 10.3390/plants11070989.
- Chen, W., X. Yao, K. Cai and J. Chen. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. *Biological Trace Element Research* 142(1): 67-76.
- Chen, Y., J.M. Smagula, W. Litten and S. Dunham. 1998. Effect of boron and calcium foliar sprays on pollen germination and development, fruit set, seed development, and berry yield and quality in lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.). *Journal of American Society for Horticultural Science* 123(4): 524-531.
- El-Temsah, M.E. 2017. Response of rice yield, its components and quality to silicon and boron foliar application. *Middle East Journal of Agriculture Research* 6(4): 1259-1267.
- Huang, S., N. Yamaji, Y. Ma and J.F. Ma. 2020. Silicon suppresses zinc uptake through down-regulating zinc transporter gene in rice. *Physiologia Plantarum* 170(3): 425-432.
- Jagadish, S., P. Craufure and T. Wheeler. 2007. High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany* 58(7): 1627-1635.
- Jongjaidee, J., S. Lordkaew, S. Konsaeng, S. Jamjod and B. Rerkasem. 2010. Influence of high temperature on pollen viability and fertilization in Thai rice varieties. *Journal of Agriculture* 26(Special Issue): 29-35. (in Thai)
- Laenoi, S., B. Rerkasem, S. Lordkaew and C. Prom-u-thai. 2018. Seasonal variation in grain yield and quality in different rice varieties. *Field Crops Research* 221: 350-357.
- Lordkaew, S., S. Konsaeng, J. Jongjaidee, B. Dell, B. Rerkasem and S. Jamjod. 2013. Variation in responses to boron in rice. *Plant and Soil* 363(1): 287-295.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press. 651 p.
- Matsui, T., K. Omasa and T. Horie. 2001. The difference in sterility due to high temperatures during the flowering period among japonica-rice varieties. *Plant Production Science* 4(2): 90-93.
- Nolla, A., R.J. de Faria. G.H. Korndorfer and T.B. da Silva. 2012. Effect of silicon on drought tolerance of upland rice. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10(1): 269-272.
- Osotsapar, Y., A. Wongmaneerote and C. Hongprayoon. 2008. *Fertilizers for Sustainable Agriculture*. Kasetsart University Press, Bangkok. 519 p. (in Thai)
- Osotsapar, Y. 2015. *Soil, Nutrients and Fertilizer in Rice*. Soil and Fertilizer Society of Thailand, Bangkok. 454 p. (in Thai)
- Pandey, N. and B. Gupta. 2013. The impact of foliar boron sprays on reproductive biology and seed quality of black gram. *Journal of Trace Elements in Medicine Biology* 27: 58-64.
- Perez, C.M., B.O. Juliano, S.P. Liboon, J.M. Alcantara and K.G. Cassman. 1996. Effects of late nitrogen fertilizer application on head rice yield, protein

- content, and grain quality of rice. *Cereal Chemistry* 73(5): 556-560.
- Prasad, P.V.V., K.J. Boote, L.H. Allen Jr., J.E. Sheehy and J.M.G. Thomas. 2006. Species ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Research* 95(2-3): 398-411.
- Puranapong, N. 2005. *Handbook of Soil and Plant Analysis*. Maejo University, Chiang Mai. 286 p. (in Thai)
- Rang, Z.W., S.V.K. Jagadish, Q.M. Zhou, P.Q. Craufurd and S. Heuer. 2011. Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. *Environmental and Experimental Botany* 70(1): 58-65.
- Rehman, A., M. Farooq, Z.A. Cheema, A. Nawaz and Z. Wahid. 2014. Foliage applied boron improves the panicle fertility, yield and biofortification of fine grain aromatic rice. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 14(3): 723-733.
- Rerkasem, B. 2017. The rice value chain: a case study of Thai rice. *ASR: CMU Journal of Social Science and Humanities* 4(1): 1-26.
- Rerkasem, B. 2018. *Thai Rice Science*. Research Administration Center, Chiang Mai University: Chiang Mai. 296 p. (in Thai)
- Rinsinjoy, R., S. Lordkaew and C.T. Prom-u-thai. 2019. Zinc accumulation in upland and wetland rice grown under non-flooded and flooded conditions. *Journal of Agriculture* 35(3): 425-434. (in Thai)
- Sanpawithayakul, K., N. Kaewprasert, P. Tantiyavarong, S. Wichansawakun and T. Tharavanij. 2026. Determination of glycemic index of RD43 rice and Thai Hom Mali rice and effects on postprandial glucose and insulin responses in healthy participants: a crossover study. *Thammasat University Hospital Journal Online* 11(1): 169-181.
- Sarkar, M.M., S. Mukherjee, P. Mathur and S. Roy. 2022. Exogenous nano-silicon application improves ion homeostasis, osmolyte accumulation and palliates oxidative stress in *Lens culinaris* under NaCl stress. *Plant Physiology and Biochemistry* 192: 143-161.
- Songsriin, J., S. Yamuangmorn, S. Lordkaew, S. Jumrus, J. Veeradittakit, S. Jamjod and C. Prom-u-thai. 2023. Efficacy of soil and foliar boron fertilizer on boron uptake and productivity in rice. *Agronomy* 13(3): 692, doi: 10.3390/agronomy13030692.
- Sukkeo, S. B. Rerkasem and S. Jamjod. 2017. Heat tolerance in Thai rice varieties. *ScienceAsia* 43(2): 61-69.
- Sukyankij, S., S. Sukyankij, M. Phun-iam and T. Panich-pat. 2023. Response of rice to silicon fertilizer application and its effects on silicon availability in soil of Phra Nakhon Si Ayutthaya, Thailand. *Journal of Agriculture* 39(2): 155-167.
- Thai Meteorological Department. 2026. Monthly Mean Rainfall in Thailand 30 years. (Online). Available: <https://www.tmd.go.th/en/ClimateChart/monthly-mean-rainfall-in-thailand-mm-30-years> (June 29, 2026). (in Thai)
- Yoshida, S. 1978. *Tropical Climate and Its Influence on Rice*. International Rice Research Institute, Los Banos. 25 p.