วารสารแก่นเกษตร THAIJO

Content List Available at ThaiJo

Khon Kaen Agriculture Journal

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

การเพิ่มผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวโดยการจัดการปุ๋ยสังกะสี ในพันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่

Improving grain yield and zinc accumulation by zinc fertilizer management in wetland and upland rice varieties

พัชรินทร์ ตุ้ยวงค์[1] และ ชนากานต์ เทโบลต์ พรมอุทัย[1,2]*

Patcharin Tuiwong[1], and Chanakan Thebault Prom-u-thai[1,2]*

[1] *ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*
[1] *Department of Plant and Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University*
[2] *ศูนย์วิจัยข้าวล้านนา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*
[2] *Lanna Rice Research Center, Chiang Mai University*

บทคัดย่อ: การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของกรรมวิธีในการจัดการปุ๋ยสังกะสีที่แตกต่างกันต่อผลผลิตและการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวนาสวน (พันธุ์ชัยนาท 1) และข้าวไร่ (พันธุ์กำหอม มช.) โดยการจัดการปุ๋ย 4 รูปแบบ คือ (1) ใส่ตามที่เกษตรกรใช้ (control) (2) ใส่ปุ๋ยสังกะสี (Zn) เพิ่มจากการจัดการแบบที่ 1 (3) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) เพิ่มจากอัตราที่ใส่แบบที่ 1 และ (4) ใส่ปุ๋ยไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) และสังกะสี (Zn) เพิ่มจากการจัดการแบบที่ 1 โดยใส่ปุ๋ย 2 วิธี คือ (1) ใส่ทางดิน และ (2) ฉีดพ่นทางใบ ผลการทดลองพบว่า การจัดการปุ๋ย N-P-K-Zn แบบใส่ทางดินส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้นมากที่สุด 38.9% ข้าวกล้องพันธุ์กำหอม มช. เมื่อใส่ปุ๋ยด้วยกรรมวิธี Zn, N-P-K และ N-P-K-Zn ทางดินหรือทางพ่นทางใบมีความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 27.8% ส่วนข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 เมื่อใส่ปุ๋ย N-P-K และ N-P-K-Zn ทางดินมีความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 23.3% เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีใส่ปุ๋ยแบบควบคุม (control) พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างผลผลิตและความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ($r = 0.78$, $p< 0.05$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในพันธุ์กำหอม มช. การศึกษานี้บ่งชี้ว่า พันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่ตอบสนองต่อกรรมวิธีการจัดการปุ๋ยที่แตกต่างกันในการสะสมธาตุสังกะสีในข้าวกล้อง ทั้งนี้สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการจัดการปุ๋ยสังกะสีเพื่อเพิ่มผลผลิตและปริมาณความเข้มข้นสังกะสีในข้าว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของข้าวกล้อง ซึ่งเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้บริโภคข้าวและเป็นแนวทางให้เกษตรกรในการเลือกกรรมวิธีการใช้ปุ๋ยอย่างเหมาะสมสำหรับข้าวแต่ละสายพันธุ์ต่อไป
คำสำคัญ: การพ่นปุ๋ยทางใบ; การใส่ปุ๋ยทางดิน; การสะสมธาตุสังกะสี; พันธุ์ข้าวนาสวน; พันธุ์ข้าวไร่

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the interaction effects between fertilizer treatment (FT) and application method (AM) on yield and zinc (Zn) accumulation in wetland (CNT1) and upland (KH CMU) rice varieties. The four fertilizer treatments of (1) local treatment (control), (2) local treatment + Zn, (3) local treatment + N, P and K, and (4) local treatment + N, P, K and Zn were applied by using two difference application methods of soil and foliar applications. Both soil and foliar fertilizer applications were applied at tillering, booting and flowering stages. At maturity, plants were harvested to determine yield and the samples of brown rice were analyzed for Zn concentration. The result showed that grain yield was the highest increased up to 38.9% by soil application of N-P-K-Zn when compared with the local treatment. Foliar and soil applications of Zn, N-P-K and N-P-K-Zn increased 27.8% grain Zn concentration in KH CMU which was higher than the local treatment, while it was increase by 23.3% in soil application of N-P-K and N-P-K-Zn in CNT1. The result showed a positive correlation between grain yield and Zn concentration in CNT1 ($r = 0.78$, $P < 0.05$), but such the correlation was not found in KH CMU. This experiment

* Corresponding author: chanakan15@hotmail.com, chanakan.p@cmu.ac.th

Received: date; June 2, 2020 Accepted: date; November 26, 2020 Published: date; August 5, 2021

indicated that the wetland and upland rice varieties responded differently to Zn fertilizer management for grain yield and Zn accumulation. The results from this study would be useful for the selection of appropriate fertilizer management for increasing grain yield and Zn accumulation in rice cultivation which would be benefits for both farmers and consumers
Keywords: foliar fertilizer application; soil fertilizer application; Zn accumulation; wetland rice variety; upland rice variety

บทนำ

การผลิตข้าวให้ได้ผลผลิตสูงเป็นสิ่งที่เกษตรกรให้ความสำคัญอย่างมาก การใช้ปุ๋ยจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการจัดการในระบบการเพาะปลูกข้าวเพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพทางโภชนาการในข้าว สังกะสี (Zn) เป็นจุลธาตุที่เกี่ยวข้องกับการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรต การสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์ออกซิน และการสร้างละอองเรณู (Marschner, 2011) ตลอดจนช่วยเพิ่มการผสมเกสร การเจริญของหลอดเรณูเข้าไปในเกสรเพศเมีย และปฏิสนธิ (Kaya and Higgs, 2002) นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับการแสดงออกของยีนที่ทำให้พืชทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Cakmak, 2000) เมื่อพืชได้รับปริมาณธาตุสังกะสีไม่เพียงพอจะทำให้เกิดอาการสูญเสียคลอโรฟิลล์ (chlorosis) แสดงลักษณะเส้นใบเขียวและเนื้อใบมีสีเหลืองทอง (bronzing) ขนาดของต้นแคระแกรน นำไปสู่การเข้าสู่ระยะการสร้างดอกที่ล่าช้าและส่งผลให้ก้านดอกหลุดร่วง นอกจากนี้การขาดธาตุสังกะสีในระยะต้นอ่อนส่งผลให้ต้นอ่อนไม่สามารถพัฒนาและตายในที่สุด (Bandyopadhyay et al., 2017; Lee et al., 2017) ดังนั้น ธาตุสังกะสีจึงมีบทบาทสำคัญในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิตของพืชอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีหน้าที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของเอนไซม์หลายชนิด เช่น คาร์บอนิกแอนไฮเดรส คาร์บอกซีเพปทิเดส แอลคาไลน์ฟอสฟาเทส แอมิโนเพปทิเดส แล็กทิกดีไฮโดรจีเนส เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของโปรตีน และคาร์โบไฮเดรตและเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่อยู่ในร่างกายคน และมีบทบาทหน้าที่ต่อการแสดงออกของยีน (gene expression) (Shu et al., 2008) ดังนั้นหากร่างกายได้รับสังกะสีไม่เพียงพอจะส่งผลให้กระบวนการทางสรีระวิทยาและพัฒนาการบกพร่องและนำไปสู่ปัญหาทางสุขภาพ เช่น ร่างกายอ่อนแอ ภูมิคุ้มกันลดลง ตลอดจนการทำงานของสมองช้าลง (Maret, 2013; Wani et al., 2017) ในขณะที่ข้าว (*Oryza sativa* L.) เป็นอาหารหลักของประชากรประมาณครึ่งหนึ่งของโลก แต่พบว่ามีปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีน้อยกว่าอาหารจำพวกเนื้อสัตว์อยู่หลายเท่า อาทิ หอยนางรมและเนื้อแดงมีปริมาณสังกะสี 74.0 – 871.2 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม (Givens, 2018; Saito et al., 2017) แต่ในข้าวกล้องและข้าวขาวมีปริมาณสังกะสีเพียง 3.5 – 60.0 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม (Saenchai et al., 2014) ร่างกายมนุษย์ต้องการสังกะสีในปริมาณ 15 – 22 มิลลิกรัม ต่อวัน ซึ่งโดยทั่วไปการบริโภคอาหารในแต่ละวันจะได้รับสังกะสีเข้าสู่ร่างกายเฉลี่ย 5 – 22 มิลลิกรัม ความแปรปรวนของการได้รับสังกะสีในร่างกายแต่ละวัน ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะอาหารที่บริโภคในแต่ละพื้นที่ (Noulas et al., 2018) แต่พบว่าพันธุ์ข้าวส่วนมากมีปริมาณสังกะสีในข้าวขาวต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานความต้องการในการบริโภคที่กำหนด แต่พบว่ามีข้าวไร่บางพันธุ์สะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดสูงคือ KPK, SMJ, R258 และ NR มีค่าเฉลี่ย 38.5 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม (Saenchai et al., 2014)

พันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่มีการตอบสนองต่อกรรมวิธีการปลูกในการเพิ่มผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดแตกต่างกัน เช่น การจัดการสภาพการปลูกแบบขังน้ำและไม่ขังน้ำ ซึ่งเป็นวิธีการจัดการน้ำแบบปกติของข้าวนาสวนและข้าวไร่ ตามลำดับ (Rinsinjoy et al., 2019) การจัดการปุ๋ยสังกะสีพบว่าสามารถเพิ่มผลผลิตในข้าวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในดิน เนื่องจากช่วยปรับสมดุล pH ของดิน ลดการตกตะกอนของสังกะสี (ZnS, $Zn(OH)_2$ และ $ZnCO_3$) (Xie et al., 2019) เพิ่มปริมาณสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อการดูดใช้ของพืช ธาตุสังกะสีที่เป็นประโยชน์อยู่ในรูปที่สร้างพันธะกับอินทรียวัตถุและไอออนอิสระ (Zn^{2+}) (Krithika et al., 2016) ควรมีปริมาณ DTPA-Zn มากกว่า 1 มิลลิกรัม ต่อดิน 1 กิโลกรัม จึงเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ของพืช (Noulas et al., 2018) การจัดการสังกะสีแก่พืชสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การฉีดพ่นทางใบหรือการใส่ทางดินโดยตรง โดยปุ๋ยสังกะสีในรูป ZnO, $ZnCl_2$, ZnEDTA และ Zn-Humate ได้นำมาใช้แก้ไขปัญหาการขาดสังกะสีอย่างแพร่หลาย (Doolette et al., 2020; Ghasemi et al., 2017) พบว่า การใส่ปุ๋ยสังกะสีในอัตรา 2 มิลลิกรัม ต่อดิน 1 กิโลกรัม เหมาะแก่การเพิ่มผลผลิต ส่วนในอัตรา 4

มิลลิกรัม ต่อดิน 1 กิโลกรัม เหมาะแก่การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ด (Cakmak et al., 2017) การฉีดพ่นสังกะสีทางใบโดยทั่วไปใช้ในรูป $ZnSO_4.7H_2O$ และ $Zn(NO_3)_2.6H_2O$ ที่ 0.5 – 1 % (w/v) ในอัตรา 500 – 600 ลิตร ต่อเฮกตาร์ (Fu et al., 2016; Phattarakul et al., 2012) โดยมีรายงานพบว่า การฉีดพ่นสังกะสีทางใบสามารถเพิ่มการสะสมของสังกะสีในพืชหลายชนิด เช่น มันฝรั่ง ข้าวสาลี ถั่วเหลือง ข้าวโพด ข้าว (Dore et al., 2018; Filipovic et al., 2019; Kumar et al., 2018; Ranjbar and Bahmaniar, 2007; Rose et al., 1981; Shaoxia et al., 2019; White et al., 2017) การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินมีรายงานว่าส่งผลในการเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิตในพืชได้มากกว่าการฉีดพ่นปุ๋ยสังกะสีทางใบ เช่น ความสูง ดัชนีพื้นที่ใบ จำนวนหน่อต่อต้น จำนวนรวงต่อต้น และผลผลิตเมล็ด (Dore et al., 2018; Kumar et al., 2018) ในขณะที่พบว่า การจัดการร่วมกันระหว่างการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินและการฉีดพ่นทางใบในข้าวสาลีส่งผลให้ผลผลิตเมล็ด องค์ประกอบผลผลิต และความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้น (Ranjbar and Bahmaniar, 2007) ประสิทธิภาพในการใส่ปุ๋ยสังกะสีขึ้นอยู่กับการใส่ร่วมกับธาตุอาหารหลักอื่น ๆ ทั้งไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จากการทดลองในข้าวพันธุ์บาสมาติพบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีช่วยให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนหรือสังกะสีเพียงอย่างเดียว (Hakoomat et al., 2014) ในข้าวสาลีกลับพบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับการฉีดพ่นสังกะสีทางใบไม่ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้นจากเดิม 51.7% (Cakmak et al., 2010) ภายใต้สภาวะเครียดจากดินเค็มที่ส่งผลให้ผลผลิตข้าวลดลง พบว่า การใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียมร่วมกับสังกะสีทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นได้ (Mel et al., 2019) เนื่องจากการใส่ปุ๋ยสังกะสีส่งผลให้ดูดใช้โพแทสเซียมได้ดีขึ้น ช่วยลดการดูดซับโซเดียมตลอดจนลดการสะสมโซเดียมในพืช (Amiri et al., 2016) จึงเป็นไปได้ว่าการจัดการปุ๋ยสังกะสีในรูปแบบต่าง ๆ น่าจะมีผลต่อผลผลิตและการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวแตกต่างกันในข้าวนาสวนและข้าวไร่ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการจัดการปุ๋ยสังกะสีในกรรมวิธีที่แตกต่างกันต่อผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในพันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่ ซึ่งน่าจะใช้เป็นแนวทางในการจัดการปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

วิธีการศึกษา

<u>การปลูกข้าว</u>

จัดชุดการทดลองแบบ Factorial 2×2×4 ในแผนการทดลอง Completely Randomized Design (CRD) โดยทำ 3 ซ้ำ มีทั้งหมด 3 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวนาสวน (พันธุ์ชัยนาท 1; CNT 1) และข้าวไร่ (พันธุ์กำหอม มช. ; KH CMU) ปัจจัยที่ 2 วิธีการใส่ปุ๋ย 2 วิธีคือ การใส่ปุ๋ยทางดินและการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ และปัจจัยที่ 3 คือ วิธีการจัดการปุ๋ย 4 รูปแบบ (**Table 1**) ทดลองในสภาพโรงเรือน ณ ศูนย์วิจัยสาธิตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหียะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในฤดูเพาะปลูกข้าวนาปี ระหว่างเดือนสิงหาคม – ธันวาคม 2561 เริ่มจากการหว่านเมล็ดข้าวในกระบะเพาะกล้า เมื่อต้นกล้าอายุได้ 2 สัปดาห์ ย้ายปลูกในกระถางทดลองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ความลึก 25 เซนติเมตร ปลูกแบบต้นเดี่ยวจำนวน 3 ต้น ต่อกระถาง กระถางบรรจุดินแห้งไว้ 15 กิโลกรัม ต่อกระถาง โดยดินที่ใช้ปลูกมีค่าปฏิกิริยาดินปานกลาง pH 6.1 ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะ 1.5 dS/m ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 0.11 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช 22.6 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 113.4 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืช 0.7 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม จัดการน้ำให้ทุกกระถางอยู่ในสภาพน้ำขัง โดยมีระดับปริมาณน้ำเหนือผิวดินสูง 5 เซนติเมตร ใส่ปุ๋ยรองพื้นทุกกระถางในอัตรา 30-30-30 กิโลกรัม $N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$ ต่อเฮกตาร์ และทุกวิธีที่ได้รับปุ๋ยทางดินใส่เพิ่มปุ๋ยซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ในอัตรา 50 กิโลกรัม ต่อเฮกตาร์ ส่วนปุ๋ยยูเรีย (N) ฟอสฟอรัส (sodium dihydrogen orthophosphate) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (K_2O) ใส่เพิ่มในอัตรา 70 กิโลกรัม ต่อเฮกตาร์ ทุกกรรมวิธีที่ใส่ทางดิน แบ่งใส่ 3 ครั้ง จากจำนวนปุ๋ยที่พืชได้รับทั้งหมด 3 ระยะ คือระยะการแตกกอ ตั้งท้องและระยะดอกบาน และทุกวิธีที่ได้รับปุ๋ยจากการฉีดพ่นทางใบ พ่นในระยะเดียวกับการใส่ทางดิน พ่นที่ลำต้นและใบของข้าวจนกระทั่งเปียกชุ่มและป้องกันการไหลลงดินโดยคลุมไว้ด้วยกระดาษที่โคนต้นบนผิวดิน ฉีดพ่น Zn และ N-P-K ที่ความเข้มข้น 0.5% ในอัตรา 700 ลิตร ต่อเฮกตาร์ โดยคำนวนจากพื้นที่กระถาง

Table 1 Description of fertilizer managements by soil and foliar applications in wetland and upland rice varieties

Fertilizer application	Fertilizer treatment	Symbol
Soil application	Local treatment urea (N), sodium dihydrogen orthophosphate (P) and potassium chloride (K) fertilizer were directly applied into soil at 30kg ha^{-1} each, respectively)	control
	Local treatment + 50 kg Zn ha^{-1}	Zn
	Local treatment + 70 kg N ha^{-1}, 70 kg P ha^{-1},70 kg K ha^{-1}	N-P-K
	Local treatment + 50 kg Zn ha^{-1}, 70 kg N ha^{-1}, 70 kg P ha^{-1} 70 kg K ha^{-1}	N-P-K-Zn
Foliar application	Local treatment urea (N), sodium dihydrogen orthophosphate (P) and potassium chloride (K) fertilizer were directly applied into soil at 30 kg ha^{-1} each, respectively)	control
	Local treatment + Foliar 0.5% $ZnSO_4.7H_2O$	Zn
	Local treatment + Foliar 0.5% N, 0.5% P and 0.5% K	N-P-K
	Local treatment + Foliar 0.5% $ZnSO_4.7H_2O$, 0.5% N, 0.5% P and 0.5% K	N-P-K-Zn

การบันทึกข้อมูล

เก็บเกี่ยวข้าวทั้ง 2 พันธุ์ในระยะสุกแก่และวิเคราะห์ผลผลิตโดยนำข้าวเปลือกมาผึ่งแดดเพื่อลดความชื้นให้เหลือ 14 เปอร์เซ็นต์ ชั่งน้ำหนักแห้งพร้อมทั้งบันทึกข้อมูล

การวิเคราะห์ทางเคมี

สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก 10 กรัม แกะเมล็ดแยกส่วนที่เป็นข้าวกล้องและเปลือกออกจากกัน นำส่วนของข้าวกล้องมาวิเคราะห์หาปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดโดยใช้วิธีการ dry – ashing เผาตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิ 535 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และนำสารละลายตัวอย่างมาอ่านค่าด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometry (AA) เปรียบเทียบความเข้มข้นจากสารละลายมาตรฐานของธาตุสังกะสี

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดย Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกรรมวิธี โดยหาค่า LSD (Least Significant Difference) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และหาความสัมพันธ์ของข้อมูลแต่ละชุดโดยวิธีการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

ผลการศึกษา

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติพบว่าพันธุ์ข้าว วิธีการจัดการปุ๋ยและวิธีการใส่ปุ๋ย มีอิทธิพลต่อผลผลิตและความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (**Table 2**) โดยพบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างวิธีการใส่ปุ๋ยและการจัดการปุ๋ยทั้ง 4 รูปแบบต่อผลผลิตเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (**Figure 1**) ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 มีผลผลิตเมล็ดเฉลี่ย 9.6 กรัม ต่อต้น มากกว่าพันธุ์กำหอม มช. ที่มีผลผลิตเมล็ดเฉลี่ย 6.0 กรัม ต่อต้น และวิธีการจัดการปุ๋ยแบบ N-P-K และ N-P-K-Zn ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น 15.9% และ 24.2% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีการใส่ปุ๋ยแบบ control นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยโดยตรงทางดินส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าวิธีการฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ คือ 8.9 กรัม ต่อต้น พบว่าวิธีการจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี N-P-K-Zn โดยการใส่ทางดินส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้นมากที่สุดคือ 38.9% เปรียบเทียบกับการจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี control ในขณะที่การฉีดพ่นปุ๋ยในกรรมวิธี Zn, N-P-K, N-P-K-Zn โดยการพ่นทางใบ และการใส่ปุ๋ย Zn อย่างเดียวทางดินไม่ส่งผลต่อผลผลิตเมล็ด

Table 2 Analysis of variance of the two rice varieties grown under different fertilizer treatments and application methods on grain yield and Zn concentration in brown rice

Source	Grain yield	Zn concentration
Variety (V)	***	***
Fertilizer treatment (FT)	**	***
Application method (AM)	***	ns
FT*V	ns	***
FT*AM	**	ns
V*AM	ns	**
FT*V*AM	ns	***

Note: "*", "**"and "***" denote "significant difference at p<0.05, p<0.01and p<0.001, respectively," and "ns" indicates "no significant difference"

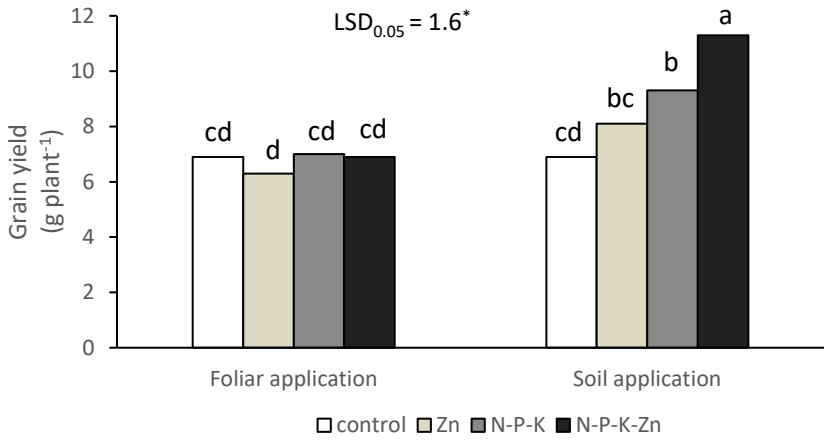

Figure 1 Grain yield as affected by four fertilizer treatments (control, Zn, N-P-K and N-P-K-Zn) and two application methods (foliar and soil applications). The data are mean of four independent replications. The lowercase letters above the bars indicate significant difference between the treatment by $LSD_{0.05}$, least significant difference at $P < 0.05$

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างวิธีการใส่ปุ๋ยและพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ยและพันธุ์ข้าว และพบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว วิธีการใส่ปุ๋ยและวิธีการจัดการปุ๋ย ต่อความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง (**Figure 2**) ข้าวพันธุ์กำหอม มช. เมื่อจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี Zn, N-P-K, N-P-K-Zn โดยการใส่ทางดินและฉีดพ่นทางใบ มีความเข้มข้นสังกะสีมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 34.4 มิลลิกรัม สังกะสี ต่อกิโลกรัม และข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เมื่อฉีดพ่นปุ๋ยด้วยกรรมวิธี Zn, N-P-K, N-P-K-Zn ทางใบ และใส่ปุ๋ย Zn โดยการใส่ทางดิน มีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับกรรมวิธีที่ได้รับการจัดการปุ๋ยแบบ control ของพันธุ์ชัยนาท 1 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 18.5 มิลลิกรัม สังกะสี ต่อกิโลกรัม และพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างผลผลิตเมล็ดข้าวและความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 ($r = 0.78$, $p< 0.05$) (**Figure** 3)

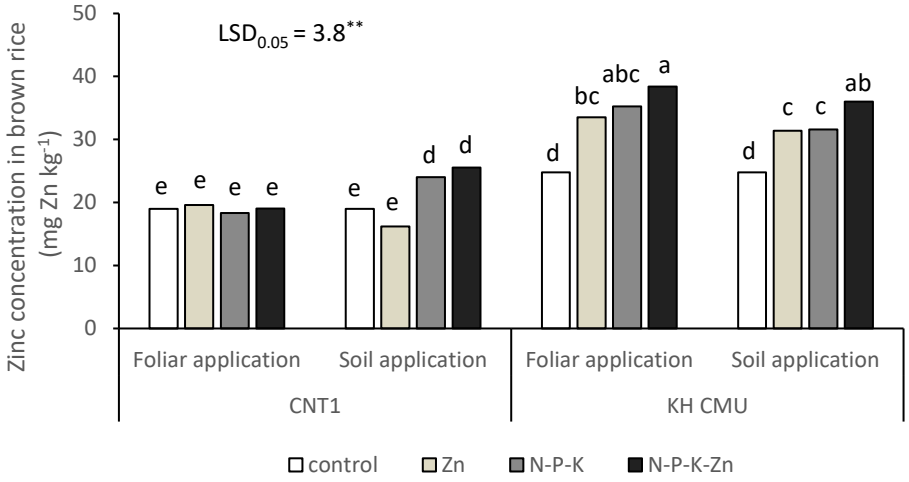

Figure 2 Zinc concentration in brown rice of two rice varieties grown under different fertilizer managements. The significance different between rice varieties, fertilizer treatments and fertilizer applications were indicated by LSD at $P < 0.05$

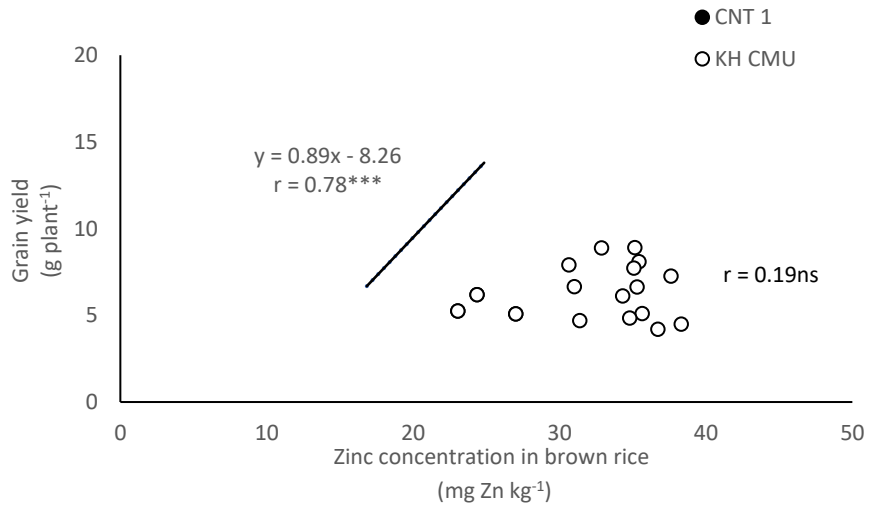

Figure 3 Relationship between grain yields and Zn concentration in brown rice of two rice varieties grown under different fertilizer managements and application methods

วิจารณ์

ความแตกต่างระหว่างผลผลิตข้าวนาสวนและข้าวไร่พบว่า ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 (ข้าวนาสวน) ให้ผลผลิตสูงกว่าข้าวพันธุ์กำหอม มช. (ข้าวไร่) แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการแตกกอและให้ผลผลิตสูงของข้าวนาสวน (Pongprasert et al., 2018) ในขณะที่ข้าวไร่แตกกอและให้ผลผลิตต่ำกว่าข้าวนาสวน และเมื่อปลูกข้าวไร่ในสภาพนาสวน พบว่า ผลผลิตข้าวไร่ลดลง (Oonyu, 2011) มีรายงานว่าความแตกต่างทางสรีระวิทยาของข้าวนาสวนและข้าวไร่ส่งผลให้ความสามารถในการปรับตัวต่อการจัดการปุ๋ยในแต่ละกรรมวิธีแตกต่างกัน (Rinsinjoy et al., 2019) จากการทดลองนี้พบว่า วิธีการใส่ปุ๋ยทางดินสามารถเพิ่มผลผลิตเมล็ดได้มากกว่าวิธีฉีดพ่นปุ๋ยทางใบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบผลการทดลองในลักษณะเดียวกัน (Hussain et al., 2018) และผลการศึกษาบ่งชี้ว่าการจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี N-P-K-Zn โดยการใส่ทางดินสามารถเพิ่มผลผลิตข้าวมากที่สุด โดยเพิ่มขึ้น 18 – 44% ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวยังไม่มีรายงานในข้าว แต่พบรายงานในการเพิ่มผลผลิตข้าวโพดด้วย (Abrol et al., 2007; Ashoka and Sunitha, 2011) และพบว่าการใส่ปุ๋ย N-P-K-Zn ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ทางดินสามารถเพิ่มผลผลิตได้เช่นกัน (Khan et al., 2007) ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นจากการจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี N-P-K-Zn โดยการใส่ทางดินสามารถอธิบายได้จากประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันระหว่างธาตุสังกะสีกับไนโตรเจนที่เป็นกลไกหลักในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวให้ดียิ่งขึ้น โดยทั่วไปปุ๋ยไนโตรเจนมีอิทธิพลต่อการเจริญของรากและลำต้น การดูดซับธาตุอาหารทางราก การเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากรากไปยังลำต้น และการแบ่งปันสังกะสีไปยังส่วนต่าง ๆ ของข้าว (Erenoglu et al., 2011) ในดินที่มีสภาพน้ำขังไนโตรเจนเพิ่มการละลายสังกะสี เมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปยูเรีย (Urea) ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน NH_3 – Zn ซึ่งอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซับได้ดี และส่งผลให้ค่า pH ในดินลดลงซึ่งเป็นผลดีต่อการปลูกข้าวในดินที่มีสภาพเป็นด่าง (Gao et al., 2012; Hakoomat et al., 2014) ในขณะเดียวกันสังกะสีก็มีอิทธิพลต่อการดูดซับและการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนในข้าว (Guo et al., 2016) โดยการดูดซับไนโตรเจนทางระบบรากท้ายที่สุดจะส่งผลต่อการเพิ่มเปอร์เซ็นต์โปรตีนในเมล็ดข้าว (Bhutto and Anwar, 2017; Duhan and Singh, 2002) การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีส่งผลให้น้ำหนัก 1000 เมล็ดเพิ่มขึ้น เนื่องจากไนโตรเจนเพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในเมล็ดโดยมีสังกะสีเป็นส่วนประกอบสำคัญของ DNA-binding protein ที่เป็นตัวกระตุ้น (activating region) การเกิดปฏิกิริยาในกลไกการลอกรหัสสร้างโปรตีน (Naik and Das, 2008; Verma et al., 2018) และเพิ่มผลผลิตข้าวสาลี 10 – 18% ด้วยเช่นกัน (Shivay et al., 2008) นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีส่งผลให้อาการเป็นพิษจากธาตุเหล็กในใบข้าวลดลงและปรับปรุงผลผลิตข้าวให้ดีขึ้น (Audebert and Sahrawat, 2000) ดังนั้นการทำงานร่วมกันของไนโตรเจนและสังกะสีนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของกิจกรรมทางสรีระวิทยาและการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบผลผลิตที่ดีขึ้นในที่สุด (Cakmak et al., 2010) นอกจากการทำงานร่วมกับไนโตรเจน โพแทสเซียมเป็นอีกธาตุหนึ่งมีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับสังกะสี มีรายงานว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีร่วมกับโพแทสเซียมช่วยชลอการเสื่อมสภาพของใบ ส่งผลให้ระยะเวลาการสังเคราะห์แสงและการเติมเต็มเมล็ดยาวนานขึ้น (Arif et al., 2017)

โดยธรรมชาติพันธุ์ข้าวไร่ส่วนใหญ่จะมีความเข้มข้นของสังกะสีในข้าวกล้องสูงกว่าพันธุ์ข้าวนาสวน (Jaksomsak et al., 2018) จากการทดลองนี้พันธุ์กำหอม มช. (พันธุ์ข้าวไร่) ทุกสภาพกรรมวิธีการจัดการปุ๋ยมีความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องมากกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 (พันธุ์ข้าวนาสวน) แสดงให้เห็นถึงความสามารถของพันธุ์ข้าวไร่ในการเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีในลำต้นต่อการสะสมธาตุสังกะสีในข้าวกล้องและกลไกการรักษาสภาวะสมดุลของธาตุอาหารในเมล็ดที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งกลไลดังกล่าวควบคุมการดูดซับและเคลื่อนย้ายธาตุอาหารกลุ่มโลหะตลอดจนเก็บรักษาธาตุอาหารไว้ใน phloem sap (Hao et al., 2007; Welch, 1986) จากการทดลองนี้สังเกตได้ว่าปุ๋ย N-P-K ส่งผลต่อการเพิ่มสังกะสีในข้าวกล้องในพันธุ์ข้าวไร่และนาสวนทั้งในกรรมวิธี N-P-K และ N-P-K-Zn ทั้งนี้อาจเนื่องจากไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบในปุ๋ย N-P-K มีอิทธิพลต่อการสะสมสังกะสีในเมล็ด ซึ่งจากการทดลองก่อนหน้านี้พบว่า เมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดจะเพิ่มขึ้น 16 – 20% (Hao et al., 2007) เป็นที่ทราบดีว่าไนโตรเจนส่งเสริมการสังเคราะห์โปรตีนซึ่งเป็นแหล่งในการสะสมสังกะสีและส่งเสริมการแสดงออกของโปรตีนที่ทำหน้าที่ขนส่งสังกะสีผ่านเข้าออกเซลล์ เช่น ZIP family transporter เป็นต้น นอกจากนี้ยังยืดระยะเวลาการเจริญทางลำต้น ราก ใบ และการเติมเต็มเมล็ดเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสะสมธาตุสังกะสี (Gao and Xiong, 2018) มีรายงานว่าปริมาณของการดูดซับและการนำไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ไปใช้ประโยชน์เป็น

ความสัมพันธ์เชิงบวกที่ส่งเสริมการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารอื่นๆ ในระหว่างขั้นตอนการเติมเต็มเมล็ด (Sun et al., 2017) การทดลองก่อนหน้านี้พบว่าการพ่นสังกะสีทางใบเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องในพันธุ์ข้าวไร่ 17.7% (Jaksomsak et al., 2018) แต่จากการทดลองนี้ความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องพันธุ์กำหอม มช. เพิ่มขึ้นจาการจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี Zn, N-P-K, N-P-K-Zn ทั้งโดยการฉีดพ่นทางใบและการใส่ทางดิน แสดงให้เห็นว่าพันธุ์กำหอม มช. ซึ่งเป็นพันธุ์ข้าวไร่ ตอบสนองต่อกรรมวิธีการใช้ปุ๋ยหลากหลายรูปแบบในการสะสมสังกะสีในข้าวกล้อง ซึ่งแตกต่างจากข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ต้องจัดการปุ๋ยแบบกรรมวิธี N-P-K และ N-P-K-Zn ทางดินเท่านั้น จึงจะสามารถเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องได้ ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีที่เพิ่มขึ้นในข้าวกล้องพันธุ์ชัยนาท 1 มีแนวโน้มที่จะทำให้ผลผลิตข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 สูงไปด้วย ความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีและผลผลิต ชี้ให้เห็นว่าการสะสมสังกะสีและการสร้างผลผลิตเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกันในข้าวนาสวน และสอดคล้องกับผลงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Tuiwong et al., 2015) ซึ่งกลไกการเคลื่อนย้าย ลำเลียง และสะสมสังกะสีที่แตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ควรได้รับการศึกษาเพิ่มเติมเพื่ออธิบายว่าเหตุใดการสะสมสังกะสีในข้าวกล้องแต่ละพันธุ์จึงแตกต่างกัน นอกจากนี้ควรศึกษาวิธีการเพิ่มผลผลิตด้วยกรรมวิธีการฉีดพ่นทางใบเพิ่มเติมเพื่ออธิบายว่าเหตุใดวิธีการเพิ่มผลผลิตจึงถูกจำกัดหรือตอบสนองเพียงกรรมวิธีการใส่ปุ๋ยทางดิน

สรุป

การตอบสนองของผลผลิตข้าวนาสวน (พันธุ์ชัยนาท 1) และข้าวไร่ (พันธุ์กำหอม มช.) ต่อวิธีการจัดการปุ๋ยและกรรมวิธีการใส่ปุ๋ยไม่มีความแตกต่างกัน กรรมวิธีการใส่ปุ๋ย N-P-K-Zn ทางดินส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตมากที่สุดโดยเพิ่มขึ้น 38.9% เมื่อเปรียบเทียบกับการจัดการปุ๋ยแบบควบคุม (control) พันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่ตอบสนองต่อการจัดการปุ๋ยและกรรมวิธีการใส่ปุ๋ยในการสะสมธาตุสังกะสีในข้าวกล้องที่แตกต่างกัน พันธุ์กำหอม มช. เมื่อจัดการกรรมวิธี Zn, N-P-K, N-P-K-Zn ทั้งแบบใส่ทางดินและฉีดพ่นทางใบมีความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดการปุ๋ยแบบควบคุม มีค่าเฉลี่ย 34.4 มิลลิกรัม สังกะสี ต่อกิโลกรัม ส่วนพันธุ์ชัยนาท 1 เมื่อจัดการกรรมวิธี N-P-K และ N-P-K-Zn ทางดินมีผลให้ความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการจัดการปุ๋ยแบบควบคุม มีค่าเฉลี่ย 24.8 มิลลิกรัม สังกะสี ต่อกิโลกรัม ดังนั้นหากต้องการปรับปรุงผลผลิตควบคู่กับคุณภาพทางโภชนาการโดยเฉพาะความเข้มข้นสังกะสีในข้าวกล้องพันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่ให้สูงขึ้นควรจัดการปุ๋ยกรรมวิธี N-P-K-Zn ทางดิน ในอัตรา 100 – 100 – 100 – 50 กิโลกรัม N-P_2O_5-K_2O-Zn ต่อเฮกตาร์ ข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปใช้ในการจัดการปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตและปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้องที่จะสามารถเป็นประโยชน์ต่อการโภชนาการของผู้บริโภคข้าว และเป็นแนวทางในการเลือกใช้ปุ๋ยกรรมวิธีการใช้ปุ๋ยอย่างเหมาะสมต่อลักษณะทางพันธุกรรมของข้าวต่อไป แต่อย่างไรก็ตามควรเพิ่มจำนวนพันธุ์ข้าวแต่ละชนิดจากการศึกษานี้ และศึกษาสรีรวิทยาเชิงลึกของกลไกในการทำงานร่วมกันของปุ๋ยสังกะสีและไนโตรเจนจึงจะทำให้สามารถยืนยันผลได้แม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Abrol, V., G.R. Sankar, M. Singh, and J.S. Jamwal. 2007. Optimization of fertilizer requirement for maize based on yield and rainfall variations from permanent manorial trials under dry-sub humid inceptisols. Indian Journal Of Dryland Agricultural Research and Development. 22: 15–21.

Amiri, A., B. Baninasab, C. Ghobadi, and A.H. Khoshgoftarmanesh. 2016. Zinc soil application enhances photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in almond seedlings affected by salinity stress. Photosynthetica. 54: 267–274.

Arif, M., M. Tasneem, F. Bashir, G. Yaseen, and A. Anwar. 2017. Evaluation of different levels of potassium and zinc fertilizer on the growth and yield of wheat. International Journal of Biosensors and Bioelectronics. 3: 1–5.

Ashoka, P., and N.H. Sunitha. 2011. Effect of different nutrient management practices on yield, economics and nutrient uptake of baby corn (*Zea mays* L.). Research on Crops. 12: 368–371.

Audebert, A., and K.L. Sahrawat. 2000. Mechanisms for iron toxicity tolerance in lowland rice. Journal of Plant Nutrition. 23: 1877–1885.

Bandyopadhyay, T., P. Mehra, S. Hairat, and J. Giri. 2017. Morpho-physiological and transcriptome profiling reveal novel zinc deficiency-responsive genes in rice. Functional and Integrative Genomics. 17: 565–581.

Bhutto, M.A., and F. Anwar. 2017. Assessment of total fat content and yield increase in some rice cultivars upon addition of Zn and B. FUUAST. Journal of Biology. 7: 105–112.

Cakmak, I. 2000. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. New Phytologist. 146: 185–205.

Cakmak, I., M. Kalayci, Y. Kaya, A.A. Torun, N. Aydin, Y. Wang, Z. Arisoy, H. Erdem, A. Yazici, O. Gokmen, L. Ozturk, and W.J. Horst. 2010. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. Journal of Agriculture and Food Chemistry. 58: 9092–9102.

Cakmak, I., M.J. McLaughlin, and P. White. 2017. Zinc for better crop production and human health. Springer.

Doolette, C., T. Read, N. Howell, T. Cresswell, and E. Lombi. 2020. Zinc from foliar-applied nanoparticle fertiliser is translocated to wheat grain: a 65Zn radiolabelled translocation study comparing conventional and novel foliar fertilisers. Science Of The Total Environment. 749: 142369.

Dore, V., R.V. Koti, and K.K. Math. 2018. Response of zinc application on growth, zinc content and grain yield of rice genotypes and correlation between zinc content and yield attributes of rice genotypes. Indian Journal of Animals Research. 52: 625–630.

Duhan, B.S., and M. Singh. 2002. Effect of green manuring and nitrogen on yield of and uptake of micronutrients by rice. Journal of the Indian Society of Soil Science. 50: 178–180.

Erenoglu, E.B., U.B. Kutman, Y. Ceylan, B. Yildiz, and I. Cakmak. 2011. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc (65Zn) in wheat. New Phytologist. 189: 438–448.

Filipovic, A., G. Stanić, N. Kajić, A. Mandić, and V. Vasilj. 2019. Production of forage maize yield under the zinc foliar fertilization and irrigation system. Agriculturae Conspectus Scientificus. 84: 159–164.

Fu, X.Z., F. Xing, L. Cao, C.P Chun, L.L Ling, C.L Jiang, and L.Z. Peng. 2016. Effects of foliar application of various zinc fertilizers with organosilicone on correcting citrus zinc deficiency. HortScience. 51: 422–426.

Gao, L., and J. Xiong. 2018. Improving rice grain quality by enhancing accumulation of iron and zinc while minimizing cadmium and lead. Rice Crop- Current Developments. 45.

Gao, X., E. Hoffland, T. Stomph, C.A. Grant, C. Zou, and F. Zhang. 2012. Improving zinc bioavailability in transition from flooded to aerobic rice. A review. Agronomy for Sustainable Development. 32: 465–478.

Ghasemi, M., N. Ghorban, H. Madani, H. Mobasser, and M. Nouri. 2017. Effect of foliar application of zinc nano oxide on agronomic traits of two varieties of rice (*Oryza sativa* L.). Crop Research. 52: 195–201.

Givens, D.I. 2018. Dairy foods, red meat and processed meat in the diet: implications for health at key life stages. Animal. 12: 1709–1721.

Guo, J.X., X.M. Feng, X.Y. Hu, G.L. Tian, N. Ling, J.H. Wang, Q.R. Shen, and S.W. Guo. 2016. Effects of soil zinc availability, nitrogen fertilizer rate and zinc fertilizer application method on zinc biofortification of rice. Journal of Agricultural Science. 154: 584–597.

Hakoomat, A.L.I., Z. Hasnain, A.N. Shahzad, N. Sarwar, M.K. Qureshi, S. Khaliq, and M.F. Qayyum. 2014. Nitrogen and zinc interaction improves yield and quality of submerged basmati rice (*Oryza sativa* L.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca. 42: 372–379.

Hao, H.L., Y.Z. Wei, X.E. Yang, F. Ying, and C.Y. Wu. 2007. Effects of different nitrogen fertilizer levels on Fe, Mn, Cu and Zn concentrations in shoot and grain quality in rice (*Oryza sativa*). Rice Science. 14: 289–294.

Hussain, S., K. Sahar, A. Naeem, M. Zafar-ul-Hye, and M. Aon. 2018. Combined zinc and nitrogen applications at panicle initiation for zinc biofortification in rice. Periodicum Biologorum. 120: 105–110.

Jaksomsak, P., P. Tuiwong, B. Rerkasem, G. Guild, L. Palmer, and J. Stangoulis. 2018. The impact of foliar applied zinc fertilizer on zinc and phytate accumulation in dorsal and ventral grain sections of four Thai rice varieties with different grain zinc. Journal of Cereal Science. 79: 6–12.

Kaya, C., and D. Higgs. 2002. Response of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) cultivars to foliar application of zinc when grown in sand culture at low zinc. Scientia Horticulturae. 93: 53–64.

Khan, M.U., M. Qasim, and I.U. Khan. 2007. Effect of integrated nutrient management on crop yields in rice-wheat cropping system. Sarhad Journal of Agriculture. 23: 1019.

Krithika, S., G. Prasad, and D. Balachandar. 2016. Zinc solubilizing potential of enterobacter cloacae strain ZSB14 in three different semi-arid tropical soils. International Journal of Plant Soil Science. 11: 1–12.

Kumar, B., V. Yadav, N. Ramawat, and K. Singh. 2018. Effect of zinc fertilization on yield and grain zinc concentration of rice under field conditions. Research Crops. 19: 182–190.

Lee, J.S., M. Wissuwa, O.B. Zamora, and A.M. Ismail. 2017. Biochemical indicators of root damage in rice (*Oryza sativa*) genotypes under zinc deficiency stress. Journal of Plant Research. 130: 1071–1077.

Maret, W. 2013. Zinc biochemistry: from a single zinc enzyme to a key element of life12. Advance in Nutrition. 4: 82–91.

Marschner, H. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.

Mel, V.C., V.B. Bado, S. Ndiaye, K. Djaman, D.A.B. Nati, B. Manneh, and K. Futakuchi. 2019. Suitable management options to improve the productivity of rice cultivars under salinity stress. Archives of Agronomy and Soil Sci. 65: 1093–1106.

Naik, S.K., and D.K. Das. 2008. Relative performance of chelated zinc and zinc sulphate for lowland rice (*Oryza sativa* L.). Nutrient Cycling in Agroecosystems. 81: 219–227.

Noulas, C., M. Tziouvalekas, and T. Karyotis. 2018. Zinc in soils, water and food crops. Journal of Trace Element in Medicine and Biology. 49: 252–260.

Oonyu, J. 2011. Upland rice growing: A potential solution to declining crop yields and the degradation of the Doho wetlands, Butaleja district-Uganda. African Journal of Agricultural Research. 6: 2774–2783.

Phattarakul, N., B. Rerkasem, L.J. Li, L.H. Wu, C.Q. Zou, H. Ram, V.S. Sohu, B.S. Kang, H. Surek, and M. Kalayci. 2012. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. Plant and Soil. 361: 131–141.

Pongprasert, W., S. Tanasinchayakul, S. Buranapanichpan, J. Kotcharerk, and K. Kerdsuk. 2018. Reactions of backcross rice lines BC4F3-4 (KDML105/Abhaya) x Chai Nat 1 on whitebacked planthopper. Journal of Agriculture. 33: 21–30.

Ranjbar, G.A., and M.A. Bahmaniar. 2007. Effects of soil and foliar application of Zn fertilizer on yield and growth characteristics of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Asian Journal of Plant Science. 6: 1000–1005.

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: 425–434.

Rose, I.A., W.L. Felton, and L.W. Banks. 1981. Responses of four soybean varieties to foliar zinc fertilizer. Australian Journal of Experimental Agriculture. 21: 236–240.

Saenchai, C., C. Prom-u-thai, S. Jamjod, B. Dell, and B. Rerkasem. 2014. Iron and zinc partitioning in rice grain. Khon Kaen Agriculture Journal. 43: 409–418.

Saito, H., Y. Cherasse, R. Suzuki, M. Mitarai, F. Ueda, and Y. Urade. 2017. Zinc-rich oysters as well as zinc-yeast-and astaxanthin-enriched food improved sleep efficiency and sleep onset in a randomized controlled trial of healthy individuals. Molecular Nutrition and Food Research. 61: 1600882.

Shaoxia, W., L. Meng, Z. Xiaoyuan, F. Peiwen, C. Yanlong, S. Jianglan, and T. Xiaohong. 2019. Impact of foliar and root application of phosphorus on zinc concentration of winter wheat grown in China. Crop and Pasture Science. 70: 499–508.

Shivay, Y.S., R. Prasad, and A. Rahal. 2008. Relative efficiency of zinc oxide and zinc sulphate-enriched urea for spring wheat. Nutrient Cycling and Agroecosystems. 82: 259–264.

Shu, N., T. Zhou, and S. Hovmoller. 2008. Prediction of zinc-binding sites in proteins from sequence. Bioinformatics. 24: 775–782.

Sun, Y., H. Zheng, Z. Yang, H. Wang, S. Zhang, and J. Ma. 2017. Effects of mechanical dry direct-sowing modes on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in rice. Nongye Gongcheng XuebaoTransactions Chinese Society of Agricultural Engineerings. 33: 73–80.

Tuiwong, P., P. Jaksomsak, B. Rerkasem, and C.T. Prom-U-Thai. 2015. Effect of foliar zinc application on grain yield and zinc accumulation in brown rice of local and improved varieties. Khon Kaen Agriculture Journal. 43: 605–612.

Verma, D.K., P.P. Srivastav, and A.B. Nadaf. 2018. Agronomic rice practices and postharvest processing: production and quality improvement. CRC Press.

Wani, A.L., N. Parveen, M.O. Ansari, M.D.F. Ahmad, S. Jameel, and G.G.H.A. Shadab. 2017. Zinc: An element of extensive medical importance. Current Medicine Research and Practice. 7: 90–98.

Welch, R.M. 1986. Effects of nutrient deficiencies on seed production and quality. Advance in Plant Nutrition. 2: 205–247.

White, P.J., J.A. Thompson, G. Wright, and S.K. Rasmussen. 2017. Biofortifying Scottish potatoes with zinc. Plant and Soil. 411: 151–165.

Xie, M., M.A. Alsina, J. Yuen, A.I. Packman, and J.F. Gaillard. 2019. Effects of resuspension on the mobility and chemical speciation of zinc in contaminated sediments. Journal of Hazardous Materials. 364: 300–308.