

# ผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินและการพ่นทางใบต่อปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าว และการสูญเสียของสังกะสีจากกระบวนการขัดสีข้าว

## Effects of Soil and Foliar Zinc Fertilizer Application on Grain Zinc Concentration and Its Milling Depression

สิทธิกร บดีรัฐ<sup>1</sup> และ ชนาگانต์ พรหมอุทัย<sup>1,2\*</sup>  
Sitthikorn Bodeerath<sup>1</sup> and Chanakan Prom-u-thai<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup>Department of Plant and Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยข้าวล้านนา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup>Lanna Rice Research Center, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand

\*Corresponding author: Email: chanakan.p@cmu.ac.th

(Received: 21 July 2026; Revised: 21 September 2026 ; Accepted: 28 September 2026)

**Abstract:** Zinc (Zn) is an essential nutrient for cell functioning in plants and animals. Biofortification is a promising strategy for increasing grain Zn concentration in rice, but its loss during milling process to produce polished rice has not yet been evaluated. The objectives of this study were to: 1) evaluate the effectiveness of Zn fertilizer applications on grain Zn concentration and 2) determine the effect of polishing process on milling quality and grain Zn loss in San-Pah-Tawng 1 (SPT1) rice variety. The experiment was laid out in 4 × 2 factorial in a randomized complete block design (RCBD), comprising with four Zn fertilizer treatments, 1) no Zn application (control); 2) soil Zn application; 3) foliar Zn application; and 4) foliar micronutrient cocktails (Zn, I, Fe, and Se) applied at flowering and seven days after flowering grown at two locations, 1) research station, Chiang Mai University and 2) San Sai district in Chiang Mai province. Results showed that foliar Zn and foliar micronutrient cocktail increased Zn concentration in unhusked, unpolished, and polished rice compared with the control. Moreover, concentration and content of Zn in rice grains can be affected by the location. Zn concentration in paddy rice, unpolished rice, and polished rice, as well as grain Zn loss in the research station was higher than the San Sai after the polishing process. This experiment indicated that foliar Zn application effectively enhances grain Zn, but also increases its loss during the polishing process.

**Keywords:** Foliar application, soil application, foliar micronutrient cocktail, zinc accumulation

**บทคัดย่อ:** สังกะสี (Zn) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ทั้งพืชและสัตว์ การขาดธาตุสังกะสีเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญด้านโภชนาการของประชากร ซึ่งการเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวในกลุ่มผู้บริโภคข้าวได้ การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมิน 1) ประสิทธิภาพของกระบวนการจัดการธาตุสังกะสีในรูปแบบต่าง ๆ ต่อการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว และ 2) ผลของการขัดสีต่อคุณภาพการขัดสีและการสูญเสียธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 โดยจัดชุดการทดลองแบบ 4x2 factorial ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (RCBD) ประกอบด้วย การจัดการปุ๋ยสังกะสี 4 กรรมวิธี คือ 1) ไม่ใส่ปุ๋ยสังกะสี (กรรมวิธีควบคุม) 2) ใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน 3) พ่นปุ๋ยสังกะสีทางใบ และ 4) พ่นปุ๋ยสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ๆ (ไอโอดีน เหล็ก และซีลีเนียม) โดยพ่น 2 ครั้งที่ระยะดอกบานและหลังดอกบาน 7 วัน ในพื้นที่ปลูกทดลอง 2 พื้นที่ ได้แก่ 1) แปลงทดลองสถานีวิจัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ 2) แปลงเกษตรกรอำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ผลการทดลองพบว่า การพ่นสังกะสีทางใบและการพ่นสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ๆ ทำให้ความเข้มข้นและปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่าสถานที่ปลูกมีผลต่อความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว โดยข้าวที่ปลูกแปลงทดลองสถานีวิจัยมีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว รวมไปถึงการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีสูงกว่าแปลงสันทรายหลังจากผ่านกระบวนการขัดสี ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การพ่นสังกะสีทางใบช่วยเพิ่มความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเพิ่มขึ้นของธาตุสังกะสีอาจต้องสูญเสียไปจากกระบวนการขัดสีในปริมาณมากเช่นเดียวกัน

**คำสำคัญ:** การพ่นปุ๋ยทางใบ การใส่ปุ๋ยทางดิน การพ่นปุ๋ยทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น การสะสมธาตุสังกะสี

## คำนำ

ปัญหาการขาดจุลธาตุอาหาร เช่น สังกะสี ไอโอดีน เหล็ก และซีลีเนียม ส่งผลต่อประชากรโลกมากกว่า 2,000 ล้านคน โดยการขาดสังกะสีเป็นหนึ่งในปัญหาหลักที่ส่งผลกระทบต่อประชากรโลกถึงร้อยละ 31 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนา (Kumera *et al.*, 2015; Prom-u-thai *et al.*, 2020) เนื่องจากสังกะสีมีความสำคัญต่อร่างกายทั้งด้านการเจริญเติบโต การพัฒนาของระบบภูมิคุ้มกัน การทำงานของสมองและเอนไซม์ต่าง ๆ รวมไปถึงภาวะเครียดออกซิเดชัน (Prasad, 2017) โดยร่างกายต้องการสังกะสีที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 9 ถึง 14 มิลลิกรัม/วัน ขึ้นอยู่กับความต้องการที่ต่างกันตามอายุและเพศ (Senguttuvel *et al.*, 2023) ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในพืชอาหารหลัก เช่น ถั่ว ข้าวสาลี ข้าวโพด และโดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าว จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาการขาดสังกะสีในประชากรโลกได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Khampuang *et al.*, 2021; Sheibanirad *et al.*, 2023; Suganya *et al.*, 2020) รายงานก่อนหน้าพบว่า ข้าวเจ้าพันธุ์ไทย

มีสังกะสีสะสมอยู่ในช่วง 15.5 ถึง 30.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Laenoi *et al.*, 2015) แสดงให้เห็นช่วงกว้างของความแปรปรวนของธาตุสังกะสีในพันธุ์ข้าวไทย โดยข้าวบางสายพันธุ์มีปริมาณสังกะสีค่อนข้างต่ำแต่มีบางสายพันธุ์ที่พบว่ามีสังกะสีสูง ที่สามารถนำมาเป็นแหล่งพันธุกรรมในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวสังกะสีสูงได้ แต่อาจต้องใช้ระยะเวลาและงบประมาณจำนวนมาก การเพิ่มสังกะสีในเมล็ดข้าวด้วยวิธีการอื่น ๆ เช่น การจัดการปุ๋ย จึงเป็นวิธีการที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและประหยัดงบประมาณ (Khampuang *et al.*, 2023)

กระบวนการไบโอฟอร์ติฟิเคชัน (biofortification) เป็นกระบวนการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและปริมาณของสารอาหารให้สูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุสังกะสี (Senguttuvel *et al.*, 2023) โดยการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินและการพ่นทางใบเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถส่งเสริมการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวที่สามารถเป็นประโยชน์ทางโภชนาการต่อผู้บริโภคได้ ซึ่งพบว่าเป็นวิธีการเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวที่สามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพ่นปุ๋ยทางใบที่

มีรายงานว่าสามารถเคลื่อนย้ายไปเพิ่มการสะสมสังกะสีในเมล็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการใส่ปุ๋ยทางดิน (Tuiwong *et al.*, 2015; Utasee *et al.*, 2022) รายงานล่าสุดพบว่า การพ่นปุ๋ยสังกะสีในข้าวทางใบสามารถเพิ่มธาตุสังกะสีจาก 21.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็น 28.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในการพ่นสังกะสีเพียงอย่างเดียว และ 26.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากการพ่นสังกะสีร่วมกับธาตุชนิดอื่น ได้แก่ ไอโอดีน เหล็ก และซิลิเนียม (Prom-u-thai *et al.*, 2020) และมีรายงานการให้สังกะสีในข้าวสารีพบว่า การให้สังกะสีทางใบสามารถเพิ่มธาตุสังกะสีจาก 28.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เป็น 46.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในการพ่นสังกะสีเพียงอย่างเดียว และ 47.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จากการพ่นสังกะสีร่วมกับธาตุชนิดอื่น ได้แก่ ไอโอดีน เหล็ก และซิลิเนียม (Zou *et al.*, 2019) แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวจากกระบวนการใบโอฟอดิพีเคชันส่วนมากรายงานในส่วนของข้าวกล้อง ยังไม่มีรายงานแน่ชัดในส่วนของข้าวสารขัดขาว ที่ผ่านการขัดสี ซึ่งเป็นที่นิยมในกลุ่มผู้บริโภคข้าว รวมถึงความเข้มข้นสังกะสีในส่วนของรำข้าวที่เป็นผลพลอยได้จากการขัดสีข้าวกล้องเป็นข้าวสาร ที่สามารถนำไปใช้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ ได้ด้วย

การขัดสีเพื่อให้ได้ข้าวสารขัดขาว เริ่มจากการทำความสะอาดเมล็ดข้าวเปลือกและกะเทาะเมล็ดเอาเปลือกออก เพื่อให้ได้ข้าวกล้องและแกลบ หลังจากนั้นข้าวกล้องจะถูกขัดสีต่อเพื่อนำส่วนของรำออกและได้เป็นข้าวสารขัดขาว (Paul *et al.*, 2019) มีรายงานว่าสังกะสีมีการสะสมอยู่ในแต่ละส่วนของเมล็ดข้าวแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว โดยการขัดสีทำให้เกิดการสูญเสียสังกะสีในเมล็ดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับรูปร่างของเมล็ด เวลาและรูปแบบของเครื่องขัดสี (Saenchai *et al.*, 2012) สังกะสีสะสมเป็นจำนวนมากในส่วนของเอ็มบริโอ (embryo) เนื้อเยื่ออะลิวโรน (aleurone layer) และเอนโดสเปิร์ม (endosperm) ตามลำดับ การขัดสีส่วนของรำข้าวที่ประกอบด้วยเอ็มบริโอ และเนื้อเยื่ออะลิวโรน จึงทำให้เกิดการสูญเสียสังกะสีในข้าวสารขัดขาวเป็นจำนวนมาก (Saha *et al.*, 2017) ดังนั้น การบริโภคข้าวสารขัดขาวทำให้ร่างกายได้รับธาตุสังกะสีในปริมาณที่ต่ำกว่าการบริโภคข้าวกล้อง และอาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของ

ร่างกายในแต่ละวัน ในขณะที่มีรายงานว่ากระบวนการใบโอฟอดิพีเคชันสามารถเพิ่มการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานว่ามีการสูญเสียอย่างไรในระหว่างการขัดสีข้าว ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมิน 1) ประสิทธิภาพของกระบวนการจัดการธาตุสังกะสีในรูปแบบต่าง ๆ ต่อการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว และ 2) ผลของการขัดสีต่อคุณภาพการขัดสีและการสูญเสียธาตุสังกะสีในเมล็ด ในข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 ที่ปลูกใน 2 พื้นที่ คือ แปลงทดลองสถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และแปลงเกษตรกรอำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยผลจากการทดลองนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการจัดการเพื่อเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวให้มีธาตุสังกะสีสูงทั้งในส่วน of ข้าวกล้องและข้าวขาว ซึ่งจะทำให้สามารถแก้ปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในประชากรที่บริโภคข้าวได้ต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

### วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยและรวบรวมข้อมูลโดยจัดชุดการทดลองแบบ 4x2 factorial ในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (RCBD) มี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 กรรมวิธีการจัดการปุ๋ยสังกะสี จำนวน 4 กรรมวิธี คือ 1) ไม่ใส่ธาตุสังกะสี (กรรมวิธีควบคุม) 2) ให้สังกะสีทางดิน ( $ZnSO_4$ ) 3) ให้สังกะสีทางใบ ( $0.5\% ZnSO_4$ ) และ 4) การให้สังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ๆ ( $0.5\% ZnSO_4 \cdot 7H_2O + 0.05\% KIO_3 + 0.02\% Fe-EDTA + 0.001\% Na_2SeO_4$ ) และปัจจัยที่ 2 คือ พื้นที่ปลูก จำนวน 2 แปลงทดลอง ได้แก่ แปลงที่ 1 ทดลองที่แปลงทดลองสถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (CMU) และแปลงที่ 2 ทดลองที่แปลงเกษตรกร อำเภอสันทราย (SSF) จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งแต่ละแปลงทดลองมีขนาดแปลงทดลองประมาณ 20 x 30 เมตร (600 ตารางเมตร) ทดลองกรรมวิธีละ 4 ซ้ำ เหมือนกันทั้งสองแปลง พันธุ์ข้าวที่ใช้ทดสอบ คือ สันป่าตอง 1 (SPT1) ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์ปรับปรุงสมัยใหม่ ชนิดข้าวเหนียวต้นเตี้ย วัฏจักรแสงมีอายุการเก็บเกี่ยว 130-135 วัน การปลูกและดูแลรักษาดำเนินการเหมือนกันในแปลงที่ 1 และ 2 โดยปลูกข้าวใน

ฤดูนาปี ช่วงเดือนมิถุนายน-ธันวาคม พ.ศ. 2563 โดยปริมาณธาตุอาหารของแต่ละแปลงทดลอง คือ 1) แปลงทดลองสถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 5.5 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 66.0, 246.0 และ 1.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ และ 2) แปลงเกษตรกร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.6 และปริมาณความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ เท่ากับ 113.0, 32.0 และ 0.7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ (ห้องปฏิบัติการปฐพีศาสตร์ ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) เตรียมกล้าข้าวในแปลงปลูกโดยนำเมล็ดข้าวไปเพาะในแปลงเพาะกล้า และย้ายต้นกล้าข้าวที่มีอายุ 21 วันลงในแปลงทดลองที่มีขนาด 2 x 3 เมตรต่อกรรมวิธี ด้วยระยะปลูก 25 x 25 เซนติเมตร โดยใช้ต้นกล้าจำนวน 1 ต้น/หลุม ใส่ปุ๋ยสังกะสี ( $ZnSO_4$ ) ทางดินในอัตรา 50 กิโลกรัม/เฮกตาร์ ก่อนการปักดำ 1 วัน ส่วนกรรมวิธีพ่นสังกะสีทางใบ ใช้ปุ๋ยสังกะสีความเข้มข้น 0.5%  $ZnSO_4$  อัตราการพ่นที่ 500 ลิตร/เฮกตาร์ ในระยะดอกบานและหลังดอกบาน 7 วัน โดยทุกกรรมวิธีมีการใส่ปุ๋ยธาตุอาหารหลักทางดินเหมือนกันทั้งหมด คือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ในรูป 15-15-15 อัตรา 60 กิโลกรัม/เฮกตาร์ จำนวน 4 ครั้ง คือ 1) ปุ๋ยรองพื้น 2) ข้าวอายุ 40 วันหลังงอก 3) ระยะแตกกอสูงสุด และ 4) ระยะตั้งท้อง ปลูกข้าวในสภาพนาส่วนมีน้ำขังตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโตจนถึงเก็บเกี่ยว และเก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่อถึงระยะสุกแก่

#### การเก็บบันทึกข้อมูล

สุ่มเก็บตัวอย่างรวงข้าวจากพื้นที่ 1 ตารางเมตร จากนั้นสุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก (unhusked) 125 กรัม นำไปกะเทาะเปลือกด้วยเครื่องกะเทาะ ได้แกลบและข้าวกล้อง (unpolished rice) โดยนำข้าวกล้องไปขัดข้าวด้วยเครื่องขัดข้าว เป็นเวลา 40 วินาที เพื่อขัดเอาเยื่อหุ้มเมล็ดออกจะได้รำข้าว (bran fractions) และข้าวสารขัดขาว (polished rice) จากนั้น นำข้าวสารขัดขาวเข้าเครื่องแยกแบบตะแกรงกลม เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว และข้าวหัก และคำนวณหาคุณภาพการสีข้าว

ได้แก่ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของแกลบ รำ และต้นข้าว (Department of Foreign Trade, 2016)

สุ่มตัวอย่างข้าวเปลือก 50 กรัม นำไปกะเทาะเมล็ดและขัดสีแยกส่วนที่เป็นข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว จากนั้นนำแต่ละส่วนของเมล็ดไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตัวอย่างจำนวน 0.20 กรัม วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีโดยใช้วิธีการ dry-ashing เผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 535 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และนำสารละลายที่ได้ไปวัดความเข้มข้นของธาตุสังกะสีด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนคลื่นแสงของอะตอม (atomic absorption spectrophotometer) และเปรียบเทียบความเข้มข้นจากสารละลายมาตรฐานของธาตุสังกะสี จากนั้น คำนวณปริมาณธาตุสังกะสีในแต่ละส่วนด้วยผลคูณระหว่างน้ำหนักแห้งของแต่ละส่วน (น้ำหนัก 100 เมล็ดของข้าวกล้องและข้าวสารขัดขาว) และความเข้มข้นธาตุสังกะสี (Tuiwong *et al.*, 2015) และคำนวณการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสี (Zn loss) จากความแตกต่างระหว่างปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้องและปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวสารขัดขาวส่วนปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้องในหน่วยร้อยละ (%) ดังสมการ

การสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสี (%) =

$$\frac{\text{ปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้อง} - \text{ปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวสารขัดขาว}}{\text{ปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้อง}} \times 100$$

#### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกรรมวิธี โดยวิธี least significant difference (LSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SX for Window เวอร์ชัน 9.0

#### ผลการทดลอง

#### ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสี และพื้นที่ปลูกต่อ

ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีทั้งในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวสารขัดขาวในข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อความเข้มข้นของธาตุสังกะสี (Table 1) โดยการพ่นสังกะสีทางใบส่งผลให้มีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 30.1, 19.7 และ 11.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งมากกว่ากรรมวิธีการควบคุมร้อยละ 42.3, 18.8 และ 9.7 ตามลำดับ การพ่นสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ๆ ส่งผลให้มีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 32.9, 19.1 และ 10.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากรรมวิธีการควบคุมร้อยละ 45.6, 16.2 และ 5.6 ตามลำดับ ในขณะที่ไม่พบความแตกต่างของการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินต่อความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม นอกจากนี้

ยังพบความแตกต่างของสถานที่ปลูกต่อความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว โดยข้าวที่ปลูกแปลงทดลองสถานีวิจัยมีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 27.6, 19.8 และ 11.1 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ สูงกว่าแปลงสันทรายที่มีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 21.3, 15.8 และ 9.8 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ

**ปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว**

พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 ในส่วนของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ด (Table 2) โดยการพ่นสังกะสีทางใบส่งผลให้พันธุ์สันป่าตอง 1 มีปริมาณธาตุ

Table 1. Zn concentration in unhusked, unpolished, and polished rice of SPT1 variety with four Zn treatments (control, soil Zn, foliar Zn, and foliar cocktails) grown at two locations (CMU and SSF)

| Treatment        | Zn concentration (mg/kg) |        |        |                 |        |        |               |       |         |
|------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|---------------|-------|---------|
|                  | Unhusked rice            |        |        | Unpolished rice |        |        | Polished rice |       |         |
|                  | CMU                      | SSF    | Mean   | CMU             | SSF    | Mean   | CMU           | SSF   | Mean    |
| Control          | 20.2                     | 15.5   | 17.9 b | 17.6            | 14.5   | 16.0 b | 11.6          | 8.8   | 10.2 ab |
| Soil Zn          | 19.1                     | 12.8   | 15.9 b | 19.0            | 13.5   | 16.2 b | 10.4          | 8.7   | 9.5 b   |
| Foliar Zn        | 35.8                     | 26.3   | 30.1 a | 22.2            | 17.3   | 19.7 a | 11.7          | 10.9  | 11.3 a  |
| Foliar cocktails | 35.4                     | 30.6   | 32.9 a | 20.4            | 17.8   | 19.1 a | 10.9          | 10.7  | 10.8 a  |
| Mean             | 27.6 A                   | 21.3 B |        | 19.8 A          | 15.8 B |        | 11.1 A        | 9.8 B |         |

Effects by analysis of variance

| Variable      | Unhusked rice | Unpolished rice | Polished rice |
|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| Treatment (T) | **            | **              | *             |
| Location (L)  | **            | **              | **            |
| T × L         | ns            | ns              | ns            |

The lowercase and uppercase letters indicate the comparison among Zn treatment and location, respectively. Statistical significance: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; and ns, not significant.

Table 2. Zn content in unhusked, unpolished, and polished rice of SPT1 variety with four Zn treatments (control, soil Zn, foliar Zn, and foliar cocktails) grown at two locations (CMU and SSF)

| Treatment                       | Zn content (mg/100 grains) |        |        |                 |        |        |               |      |        |
|---------------------------------|----------------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|---------------|------|--------|
|                                 | Unhusked rice              |        |        | Unpolished rice |        |        | Polished rice |      |        |
|                                 | CMU                        | SSF    | Mean   | CMU             | SSF    | Mean   | CMU           | SSF  | Mean   |
| Control                         | 56.4                       | 46.7   | 51.6 b | 39.9            | 34.4   | 36.9 b | 22.1          | 18.9 | 20.5 b |
| Soil Zn                         | 54.6                       | 39.3   | 46.9 b | 41.8            | 32.1   | 36.9 b | 20.7          | 18.0 | 19.4 b |
| Foliar Zn                       | 103.6                      | 77.3   | 90.4 a | 50.3            | 41.1   | 45.7 a | 24.1          | 23.3 | 23.7 a |
| Foliar cocktails                | 100.5                      | 89.4   | 94.9 a | 45.7            | 42.5   | 44.1 a | 22.4          | 23.2 | 22.9 a |
| Mean                            | 78.8 A                     | 63.2 B |        | 44.3 A          | 37.5 B |        | 22.3          | 20.9 |        |
| Effects by analysis of variance |                            |        |        |                 |        |        |               |      |        |
| Variable                        | Unhusked rice              |        |        | Unpolished rice |        |        | Polished rice |      |        |
| Treatment (T)                   | **                         |        |        | **              |        |        | *             |      |        |
| Location (L)                    | **                         |        |        | **              |        |        | ns            |      |        |
| T × L                           | ns                         |        |        | ns              |        |        | ns            |      |        |

The lowercase and uppercase letters indicate the comparison among Zn treatment and location, respectively. Statistical significance: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; and ns, not significant.

สังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 90.4, 45.7 และ 23.7 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากรรมวิธีการควบคุมร้อยละ 48.1, 19.3 และ 13.5 ตามลำดับ และการพ่นสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ๆ ส่งผลให้ข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 มีปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว เท่ากับ 94.9, 44.1 และ 22.9 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากรรมวิธีการควบคุมร้อยละ 50.6, 16.3 และ 10.5 ตามลำดับ ในขณะที่ไม่พบความแตกต่างปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว ภายใต้การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินเมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของสถานที่ปลูกต่อปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว โดยข้าวที่ปลูกแปลงทดลองสถานีวิจัยมีปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก และข้าวกล้อง เท่ากับ 78.8 และ 44.3 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแปลงสันทรายที่มีปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเปลือก และข้าวกล้อง เท่ากับ 63.2 และ 37.5 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ตามลำดับ ในขณะที่ไม่พบความแตกต่างของสถานที่ปลูกต่อปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวสารขัดขาว ( $P < 0.05$ )

### การสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในระหว่างการขัดสี

พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวเหนียวพันธุ์สันป่าตอง 1 ระหว่างการขัดสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ด (Figure 1) โดยการพ่นสังกะสีทางใบ และการพ่นปุ๋ยสังกะสีร่วมกับธาตุอื่น ส่งผลให้พันธุ์สันป่าตอง 1 มีการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในระหว่างการขัดสี เท่ากับ 22.2 และ 23.0 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ากรรมวิธีการควบคุมร้อยละ 33.6 และ 38.4 ตามลำดับ แต่ไม่พบความแตกต่างของการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของสถานที่ปลูกต่อการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในระหว่างการขัดสี โดยข้าวที่ปลูกแปลงทดลองสถานีวิจัยมีการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในระหว่างการขัดสี เท่ากับ 21.3 มิลลิกรัม/100 เมล็ด ซึ่งสูงกว่าแปลงสันทรายที่มีการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในระหว่างการขัดสี เท่ากับ 17.5 มิลลิกรัม/100 เมล็ด

### คุณภาพการขัดสี

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อร้อยละโดยน้ำหนักของแกลบ และข้าวหักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วม

ระหว่างการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อร้อยละโดยน้ำหนักของแกลบ และข้าวหัก (Table 3) โดยการพ่นสังกะสีทางใบ และการพ่นปุ๋ยสังกะสีร่วมกับธาตุอื่น ส่งผลให้พันธุ์สันป่าตอง 1 มีร้อยละโดยน้ำหนักของแกลบ และข้าวหัก เท่ากับ 19.7 และ 7.6 ตามลำดับ ในแปลงทดลอง

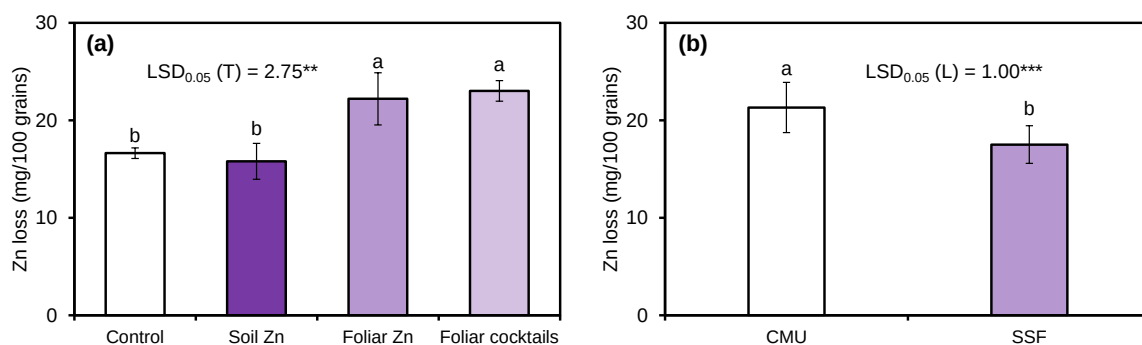


Figure 1. Zn loss under milling process in unpolished to polished rice in Zn treatment (a) and location (b). The lowercase and uppercase letters indicate the comparison among Zn treatment and location, respectively. Statistical significance: \*\*,  $P < 0.01$ ; and \*\*\*,  $P < 0.001$ .

Table 3. Milling quality of SPT1 variety with four Zn treatments (control, soil Zn, foliar Zn, and foliar cocktails) grown at two locations (CMU and SSF)

| Treatment                       | Husk (%) |        |        | Bran (%) |     |        | Head rice yield (%) |      |      | Broken rice (%) |       |        |
|---------------------------------|----------|--------|--------|----------|-----|--------|---------------------|------|------|-----------------|-------|--------|
|                                 | CMU      | SSF    | Mean   | CMU      | SSF | Mean   | CMU                 | SSF  | Mean | CMU             | SSF   | Mean   |
| Control                         | 20.7     | 21.1   | 20.9 a | 9.0      | 7.3 | 8.2 ab | 63.7                | 64.6 | 64.2 | 6.7             | 7.0   | 6.9 bc |
| Soil Zn                         | 22.8     | 19.6   | 21.2 a | 7.6      | 9.2 | 8.4 a  | 64.0                | 63.4 | 63.7 | 5.0             | 7.0   | 6.0 c  |
| Foliar Zn                       | 21.6     | 17.8   | 19.7 b | 6.6      | 8.1 | 7.4 bc | 64.4                | 64.4 | 64.4 | 6.7             | 8.5   | 7.6 b  |
| Foliar cocktails                | 21.2     | 18.4   | 19.8 b | 6.1      | 7.6 | 6.9 c  | 64.5                | 64.5 | 64.2 | 8.8             | 9.4   | 9.1 a  |
| Mean                            | 21.6 A   | 19.2 B |        | 7.4      | 8.0 |        | 64.0                | 64.2 |      | 6.8 B           | 8.0 A |        |
| Effects by analysis of variance |          |        |        |          |     |        |                     |      |      |                 |       |        |
| Variable                        | Husk (%) |        |        | Bran (%) |     |        | Head rice yield (%) |      |      | Broken rice (%) |       |        |
| Treatment (T)                   | *        |        |        | *        |     |        | ns                  |      |      | **              |       |        |
| Location (L)                    | **       |        |        | ns       |     |        | ns                  |      |      | *               |       |        |
| T × L                           | ns       |        |        | ns       |     |        | ns                  |      |      | ns              |       |        |

The lowercase and uppercase letters indicate the comparison among Zn treatment and location, respectively. Statistical significance: \*,  $P < 0.05$ ; \*\*,  $P < 0.01$ ; and ns, not significant.

สถานีวิจัย และแปลงสันทราย เท่ากับ 19.8 และ 9.1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสีต่อร้อยละโดยน้ำหนักของรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ด (Table 3) โดยการพ่นปุ๋ยสังกะสีร่วมกับธาตุอื่น ส่งผลให้พันธุ์สันป่าตอง 1 มีน้ำหนักของรำข้าวร้อยละ 6.9 แต่ไม่พบความแตกต่างของการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน และการพ่นปุ๋ยสังกะสี เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม ในขณะเดียวกัน ไม่พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยสังกะสีและสถานที่ปลูกต่อร้อยละโดยน้ำหนักของรำข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) (Table 3) โดยพบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของต้นข้าวมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 64.1

## วิจารณ์

ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า การจัดการปุ๋ยสังกะสีแบบต่าง ๆ มีผลต่อการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวพันธุ์สันป่าตอง 1 โดยการพ่นธาตุสังกะสีทางใบและการพ่นธาตุสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุไอโอดีน เหล็ก และซีลีเนียม มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก เมล็ดข้าวกล้อง และเมล็ดข้าวขาว ในขณะที่ การใส่ธาตุสังกะสีทางดินไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Boonchuay *et al.* (2013) พบว่า การพ่นสังกะสีทางใบ ( $0.5\% \text{ ZnSO}_4$ ) ส่งผลให้ปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 55 งานวิจัยของ Phattarakul *et al.* (2012) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง พบว่า การพ่นสังกะสีทางใบส่งผลให้ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ในขณะที่ การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินส่งผลให้ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2 เช่นเดียวกับการทดลองเปรียบเทียบวิธีการให้ปุ๋ยสังกะสีในข้าวสาลี พบว่า การใส่ปุ๋ยทางดินมีการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวสาลีที่ระยะเก็บเกี่ยว 18 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วนการพ่นปุ๋ยทางใบมีการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวสาลีที่ระยะเก็บเกี่ยว 27 มิลลิกรัม/

กิโลกรัม (Yilmaz *et al.*, 1997) โดยธาตุสังกะสีส่วนใหญ่ที่สะสมอยู่ในเมล็ดได้รับมาจากส่วนต่าง ๆ ของข้าว เช่น ใบและลำต้น แต่ไม่ได้รับมาโดยตรงจากราก แสดงให้เห็นว่าธาตุสังกะสีถูกขนส่งและลำเลียงจากใบไปสู่เมล็ดได้โดยตรง (Wu *et al.*, 2010) ในขณะที่การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่า โดยเฉพาะในสภาพดินที่ไม่ขาดสังกะสีเช่นดินจากทั้ง 2 ที่ปลูกที่มีความเข้มข้นสังกะสี 1.3 และ 0.7 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในแปลงทดลองสถานีวิจัยและแปลงทดลองอำเภอสันทรายตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตของสังกะสีในดินปลูกข้าวที่มีค่า 0.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม เนื่องจากธาตุสังกะสีมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ช้าทั้งในดินและพืช รวมไปถึงมีปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนระหว่างดินที่จำกัดการดูดซึมธาตุสังกะสีผ่านทางรากพืช (Phuphong *et al.*, 2018; Younas *et al.*, 2023) นอกจากนี้มีรายงานว่า การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินทำให้สังกะสีเป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของธาตุสังกะสีในดินกับสมบัติต่าง ๆ ของดิน ตัวอย่างเช่น 1) อนุภาคดินเหนียวที่จะไปจับกับไอออนสังกะสีที่มีประจุบวก ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ซึ่งตามธรรมชาติของอนุภาคดินเหนียวที่มีพื้นผิวขนาดใหญ่และมีประจุลบ (Sriprachote *et al.*, 2014) 2) การลดลงของปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีในดินลดลง เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีสารฮิวมิก (humic substances) ที่ประกอบประกอบอินทรีย์ที่มีความเสถียรสูงในดิน เช่น กรดฮิวมิก (humic acid) และกรดฟุลวิก (fulvic acid) ซึ่งสารเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชัน (เช่น -OH, -COOH และ -SH) อยู่เป็นจำนวนมาก ที่มีความสามารถสูงในการจับกับไอออนของสังกะสี ในขณะเดียวกันพบว่า กรดฟุลวิกสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบคีเลต (chelate) กับสังกะสีได้ในช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง ซึ่งจะเป็นประโยชน์กับความสามารถในการละลายและการเคลื่อนที่ของสังกะสีในดิน (Suganya *et al.*, 2020) 3) อัตราส่วนแมกนีเซียมต่อแคลเซียมสูง พบว่า หากค่าอัตราส่วนนี้ในดินมีค่าสูงกว่า 1 จะสามารถบ่งชี้ได้ว่าดินมีการขาดสังกะสี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีหินปูนเป็นองค์ประกอบสูงที่ส่งผลต่อการละลายของสังกะสี โดยสังกะสีจะถูกดูดซับ

เข้าไปในโครงสร้างผลึกแร่โดโลไมต์ (dolomite) และ แมกนีไซต์ (magnesite) บริเวณตำแหน่งในโครงสร้างผลึก ผ่านกระบวนการแทนที่แมกนีเซียม (Suganya *et al.*, 2020) 4) การชะล้างของสังกะสีในดินที่ทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นประโยชน์ของสังกะสี (zinc availability) (Kannan, 2010) และ 5) ความเป็นประโยชน์ของ ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในดิน ที่เป็นปัจจัยจำกัดความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีในดินไปสู่พืช (Nadeem *et al.*, 2024) ซึ่งสภาพแวดล้อม ลักษณะดินและสมบัติทางเคมีของดินข้างต้นที่แตกต่างกัน จึงมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีในดิน การดูดใช้ และเคลื่อนย้าย ธาตุสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของข้าว ที่ส่งผลต่อความแตกต่างในการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวของแปลงปลูกข้าวทั้งสองแหล่ง โดยปัจจัยที่อาจเป็นสาเหตุของความแตกต่างในการดูดใช้ธาตุสังกะสีไปสู่เมล็ดของการทดลองครั้งนี้ คือ ความแตกต่างของความเป็นประโยชน์ของธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในดิน ซึ่งพบว่าแปลงเกษตรกร อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 113.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าแปลงทดลองที่สถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (32.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) จากรายงานก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่า การจัดการปุ๋ยที่ช่วยปรับปรุงความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีสู่พืช ซึ่งไปลดความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินและเมล็ด (Nadeem *et al.*, 2024) เช่นเดียวกันพบว่า การจัดการปุ๋ยฟอสฟอรัสปริมาณสูงส่งผลต่อความเข้มข้นในรากและส่วนเหนือดิน รวมไปถึงการยับยั้งรากในการดูดซึมสังกะสี เห็นได้จากการที่ฟอสฟอรัสเปลี่ยนแปลงระดับการแสดงออกของยีน *OsZIPs* ให้สูงขึ้นบริเวณราก ซึ่งยีนกลุ่มนี้จะมีการแสดงออกสูงขึ้นเมื่อข้าวเกิดการขาดธาตุสังกะสี (Ding *et al.*, 2021) ในทางกลับกันพบว่า แปลงทดลองที่สถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน 246.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งสูงกว่าแปลงเกษตรกร อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ (32 มิลลิกรัม/กิโลกรัม) ซึ่งข้าวที่ปลูกในแปลงทดลองสถานีวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดมากกว่าข้าวที่ปลูกแปลงทดลองอำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้า

พบว่าระดับปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่สูงขึ้น ช่วยส่งเสริมการดูดใช้ธาตุสังกะสีสู่ส่วนเหนือดินในข้าว (Carmeis Filho *et al.*, 2017) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มผลผลิตและความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดให้สูงขึ้น เช่น ข้าว และข้าวสาลี (Hussain *et al.*, 2020; Yamuangmorn *et al.*, 2022)

นอกจากนี้ ผลการทดลองในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการพ่นปุ๋ยสังกะสีและการพ่นปุ๋ยสังกะสีร่วมกับธาตุอาหารอื่น ส่งผลต่อความแตกต่างของการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดที่ผ่านการขัดสี โดยการสูญเสียธาตุสังกะสีจากการขัดสีเกิดได้จากหลายปัจจัย เช่น พันธุกรรม (Maganti *et al.*, 2020; Saenchai *et al.*, 2012) ขนาดและรูปร่างของเมล็ด (Liang *et al.*, 2008; Prom-u-thai *et al.*, 2006) การจัดการปุ๋ย (Jaksomsak *et al.*, 2018; Saha *et al.*, 2013) รวมไปถึงระยะเวลาในการขัดสี (Liu *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม การสูญเสียธาตุสังกะสีส่วนใหญ่เกิดจากการขัดสีส่วนของเอมบริโอ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณธาตุสังกะสีมากที่สุด (Ning *et al.*, 2023) เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเป็นแหล่งกักเก็บสังกะสี (sink) ที่ธาตุสังกะสีจับกับสารประกอบอื่น เช่น โปรตีน ได้แก่ ซิสเทอีน (cysteine) ฮิสทิดีน (histidine) กรดแอสปาร์ติก (aspartic acid) และกรดกลูตามิก (glutamic acid) และไฟเตท (phytate) อีกทั้งสังกะสียังมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการงอกของเมล็ด โดยการสะสมธาตุสังกะสีพบในบริเวณเนื้อเยื่อที่มีการพัฒนามากกว่าใบแก่ถึง 10 เท่า เพื่อรักษาอัตราการสังเคราะห์โปรตีนให้สูง (Broadley *et al.*, 2007; Ozturk *et al.*, 2006) นอกจากนี้การสูญเสียชั้นเนื้อเยื่ออะลิวโรนยังทำให้ปริมาณสังกะสีในข้าวขาวลดลงจากเดิมที่เป็นข้าวกล้องถึง 5 เท่า (Ning *et al.*, 2023) เนื่องจากในช่วงของการเติมเต็มเมล็ด พืชมีการขนส่งธาตุอาหารต่าง ๆ มาทางท่ออาหารเนื้อเยื่อนิวเซลลาร์ (Nucellus) และไปยังส่วนของเมล็ดคือ เนื้อเยื่ออะลิวโรนและเอนโดสเปิร์ม (Lu *et al.*, 2013) สอดคล้องกับผลการทดลองของ Saenchai *et al.* (2012) พบว่า ข้าวขาวมีการสะสมธาตุสังกะสีเฉลี่ย 20.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม คิดเป็นการลดลงร้อยละ 59.7 เมื่อมีการขัดสีส่วนของเนื้อเยื่ออะลิวโรนออก อย่างไรก็ตาม Hansen *et al.* (2012) พบว่า ธาตุสังกะสีมีการกระจาย

อย่างสม่ำเสมอและมีความเข้มข้นลดลงเล็กน้อยแม้ในบริเวณส่วนกลางของเอนโดสเปิร์ม ในขณะที่ธาตุอาหารอื่น เช่น ธาตุเหล็ก แมกนีเซียม แมงกานีส ทองแดง นิกเกิล และซีลีเนียมมีแนวโน้มในการสูญเสียเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเข้าสู่การขัดสี เนื่องจากธาตุดังกล่าวมีการสะสมที่ชั้นนอกของเมล็ด เช่น เอมบริโอ และเนื้อเยื่ออะลิวโรนเป็นส่วนใหญ่ (Liu *et al.*, 2017; Maganti *et al.*, 2020; Prom-u-thai *et al.*, 2006; Yao *et al.*, 2019) เช่นเดียวกันพบการสะสมของธาตุเหล็กที่บริเวณเอมบริโอ เนื้อเยื่ออะลิวโรน และเอนโดสเปิร์ม เท่ากับ 76.7, 76.9 และ 5.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็นการลดลงของธาตุเหล็กร้อยละ 93 เมื่อขัดเนื้อเยื่ออะลิวโรนออก (Saenchai *et al.*, 2012) สอดคล้องกับรายงานของ Prom-u-thai *et al.* (2006, 2007) พบว่าการขัดสีจากข้าวกล้องเป็นข้าวขาวส่งผลให้เกิดการสูญเสียธาตุเหล็กร้อยละ 25 ถึง 84 ซึ่งแนวโน้มการลดลงของความเข้มข้นธาตุเหล็กขึ้นอยู่กับพันธุ์กรรมของข้าว ในขณะเดียวกันรายงานก่อนหน้าของ Persson *et al.* (2009) ที่ศึกษาการย่อยโปรตีนเมล็ดข้าวบาร์เลย์โดยใช้เอนไซม์ protease XIV พบว่า การย่อยดังกล่าวทำให้ปริมาณธาตุสังกะสีเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของธาตุเหล็ก เนื่องจากธาตุสังกะสีส่วนใหญ่มีการจับโปรตีนเปปไทด์ไม่ว่าจะเป็นอัลบูมิน (albumin) โกลบูลิน (globulin) และโพรลามีน (prolamin) ในเอนโดสเปิร์มของข้าว (Persson *et al.*, 2011) ผลการทดลองในครั้งนี้พบว่า การพ่นธาตุสังกะสีทางใบและการพ่นธาตุสังกะสีทางใบร่วมกับธาตุอาหารอื่น ส่งผลให้มีปริมาณสังกะสีในเมล็ดข้าวขาวเพิ่มขึ้นร้อยละ 13.5 และ 10.5 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับกรรมวิธีควบคุม แสดงให้เห็นว่าการพ่นสังกะสีทางใบที่ระยะการเจริญพันธุ์สามารถเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้ โดยนอกจากช่วยเพิ่มธาตุสังกะสีในเนื้อเยื่ออะลิวโรนแล้ว ยังช่วยเพิ่มธาตุสังกะสีในเอนโดสเปิร์มด้วย เนื่องจากการพ่นสังกะสีที่ระยะออกดอกและก่อนระยะนํ้านม ส่งผลให้ธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง และข้าวขาวให้สูงขึ้น (Jaksomsak *et al.*, 2018) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพ่นสังกะสีทางใบ ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินได้ 3-5 เท่า (Amoah and Tetteh, 2022)

เช่นเดียวกัน การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินร่วมกับการพ่นสังกะสีทางใบช่วยเพิ่มการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวในดินที่มีการขาดธาตุสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินอย่างเดียว (Saha *et al.*, 2013) อีกทั้งการพ่นสังกะสีทางใบส่งผลให้มีการคืนกลับสังกะสี (Zn recovery) สูงเมล็ดได้สูงกว่าการใส่สังกะสีทางดิน (Wang *et al.*, 2012) ทำให้เมื่อทำการขัดสีแล้ว ความเข้มข้นสังกะสีในข้าวขาวยังคงอยู่ในปริมาณสูง แม้ว่าจะสูญเสียทั้งเอนบริโอและเนื้อเยื่ออะลิวโรน (Phattarakul *et al.*, 2012) และการพ่นธาตุสังกะสียังช่วยเพิ่มขนาดเมล็ดทำให้มีพื้นที่กักเก็บสังกะสีมากขึ้นด้วย (Tuiwong and Prom-u-thai, 2021) ทำให้ลดการสูญเสียสังกะสีจากการขัดสีได้

## สรุป

การพ่นสังกะสี และการพ่นสังกะสีร่วมกับธาตุอาหารไอโอดีน ซีลีเนียม และธาตุเหล็กทางใบ เป็นกรรมวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการเพิ่มธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาว แต่ทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณธาตุสังกะสี เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างของสภาพแวดล้อมของแปลงปลูกมีผลต่อการสะสมสังกะสีในเมล็ดแตกต่างกัน โดยข้าวที่ปลูกในแปลงทดลองสถานีวิจัยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขาวมากกว่าข้าวที่ปลูกในแปลงเกษตรกร อำเภอสนทราย อาจเนื่องมาจากสถานที่ปลูกทั้งสองสถานที่มีสภาพแวดล้อม ลักษณะดินและสมบัติทางเคมีของดินที่แตกต่างกัน จึงมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีในดิน การดูดใช้ และเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของข้าว อย่างไรก็ตาม การพ่นสังกะสีทางใบให้แก่ข้าว สามารถเพิ่มความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่การเพิ่มขึ้นของธาตุสังกะสีอาจต้องสูญเสียไปจากกระบวนการขัดสีในปริมาณมากเช่นเดียวกัน ดังนั้น การบริโภคข้าวที่ไม่ขัดสีหรือมีการขัดสีน้อยที่สุดอาจจะเป็นแนวทางในการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการสำหรับผู้บริโภคข้าวต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสรีรวิทยาและธาตุอาหารพืช สาขาวิชาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และปฐพีศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## เอกสารอ้างอิง

- Amoah, A.A. and C.K. Tetteh. 2022. Effect of soil-applied and foliar fertilizer on rice (*Oryza sativa*). African Journal of Agricultural Research 18(8): 657-663.
- Boonchuay P., I. Cakmak, B. Rerkasem and C. Prom-u-thai. 2013. Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice. Soil Science and Plant Nutrition 59: 180-188.
- Broadley, M.R., P.J. White, J.P. Hammond, I. Zelko and A. Lux. 2007. Zinc in plants. New Phytologist 173(4): 677-702.
- Carmeis Filho, A.C.D.A., C.A.C. Crusciol, A.S. Nascente, M. Mauad and R.A. Garcia. 2017. Influence of potassium levels on root growth and nutrient uptake of upland rice cultivars. Revista Caatinga 30(1): 32-44.
- Department of Foreign Trade. 2016. Thailand Standards for Rice. Ministry of Commerce, Bangkok. 247 p. (in Thai)
- Ding, J., L. Liu, C. Wang, L. Shi, F. Xu and H. Cai. 2021. High level of zinc triggers phosphorus starvation by inhibiting root-to-shoot translocation and preferential distribution of phosphorus in rice plants. Environmental Pollution 277: 116778, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116778.
- Hansen, T.H., E. Lombi, M. Fitzgerald, K.H. Laursen, J. Frydenvang, S. Husted, C. Boulalphanh, A. Resurreccion, D.L. Howard, M.D. Jonge, D. Peterson and J.K. Schjoerring. 2012. Losses of essential mineral nutrients by polishing of rice differ among genotypes due to contrasting grain hardness and mineral distribution. Journal of Cereal Science 56: 307-315.
- Hussain, S., M.A.A. Shah, A.M. Khan, F. Ahmad and M. Hussain. 2020. Potassium enhanced grain zinc accumulation in wheat grown on a calcareous saline-sodic soil. Pakistan Journal of Botany 52(1): 69-74.
- Jaksomsak, P., P. Tuiwong, B. Rerksem, G. Guild, L. Palmer, J. Stangoulis and C. Prom-u-thai. 2018. The impact of foliar applied zinc fertilizer on zinc and phytate accumulation in dorsal and ventral sections of four thai rice varieties with different grain zinc. Journal of Cereal Science 79: 6-12.
- Kannan, S. 2010. Foliar fertilization for sustainable crop production. pp. 371-402. In: E. Lichtfouse (ed.). Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming. Sustainable Agriculture Reviews 4. Springer, Dordrecht.
- Khampuang, K., N. Chaiwong, A. Yazici, B. Demirel, I. Cakmak and C. Prom-u-thai. 2023. Effect of sulfur fertilization on productivity and grain zinc yield of rice grown under low and adequate soil zinc applications. Rice Science 30(6): 632-640.
- Khampuang, K., S. Lordkaew, B. Dell and C. Prom-u-thai. 2021. Foliar zinc application improved grain zinc accumulation and

- bioavailable zinc in unpolished and polished rice. *Crop Physiology* 24(1): 94-102.
- Kumera, G., T. Awoke, T. Melees, S. Eshetie, G. Mekuria, F. Mekonnen, T. Ewunetu and D. Gedle. 2015. Prevalence of zinc deficiency and its association with dietary, serum albumin and intestinal parasitic infection among pregnant women attending antenatal care at the University of Gondar Hospital, Gondar, Northwest Ethiopia. *BMC Nutrition* 1(31), doi: 10.1186/s40795-015-0026-6.
- Laenoi, S., C. Prom-u-thai, B. Dell and B. Rerkasem. 2015. Iron and zinc variation along the grain length of different Thai rice varieties. *ScienceAsia* 41(6): 386-391.
- Liang, J., Z. Li, K. Tsuji, K. Nakano, M.J.R. Nout and R.J. Hamer. 2008. Milling characteristics and distribution of phytic acid and zinc in long- medium- and short-grain rice. *Journal of Cereal Science* 48: 83-91.
- Liu, K., J. Zheng and F. Chen. 2017. Relationships between degree of milling and loss of vitamin B, minerals, and change in amino composition of brown rice. *LWT – Food Science and Technology* 82: 429-436.
- Lu, L., S. Tian, H. Liao, J. Zhang, X. Yang, J.M. Labavitch and W. Chen. 2013. Analysis of metal element distributions in rice (*Oryza sativa* L.) seeds and relocation during germination based on X-ray fluorescence imaging of Zn, Fe, K, Ca, and Mn. *PLoS ONE* 8(2): e57360, doi: 10.1371/journal.pone.0057360.
- Maganti, S., R. Swaminathan and A. Parida. 2020. Variation in iron and zinc content in traditional rice genotypes. *Agricultural Research* 9(3): 316-328.
- Nadeem, F., S. Abbas, F. Waseem, N. Ali, R. Mahmood, S. Bibi, L. Deng, R. Wang, Y. Zhong and X. Li. 2024. Phosphorus (P) and Zinc (Zn) nutrition constraints: A perspective of linking soil application with plant regulations. *Environmental and Experimental Botany* 226: 105875, doi: 10.1016/j.envexpbot.2024.105875.
- Ning, M., S.J. Liu, F. Deng, L. Huang, H. Li, J. Che, N. Yamaji, F. Hu and G.J. Lei. 2023. A vacuolar transporter plays important roles in zinc and cadmium accumulation in rice grain. *New Phytologist* 239(5): 1919-1934.
- Ozturk, L., M.A. Yazici, C. Yucel, A. Torun, C. Cekic, A. Bagci, H. Ozkan, H. Braun, Z. Sayers and I. Cakmak. 2006. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. *Physiologia Plantarum* 128: 144-152.
- Paul, H., B.C. Nath, M.G.K. Bhuiyan, S. Paul, S. Islam, M.D. Huda and H.B. Shosib. 2019. Effect of degree of milling on rice grain quality. *Journal of Agricultural Engineering* 42(4): 69-76.
- Persson, D.P., T.H. Hansen, K.H. Laursen, J.K. Schjoerring and S. Husted. 2009. Simultaneous iron, zinc, sulfur and phosphorus speciation analysis of barley grain tissues using SEC-ICP-MS and IP-ICP-MS. *Metallomics* 1(5): 418-426.
- Persson, D.P., T.H. Hansen, S. Husted and J.K. Schjoerring. 2011. Exploring the Zn-binding properties of the storage proteins in rice. pp. 10-14. *In*: 3<sup>rd</sup> International Symposium on

- “Improving Crop Production and Human Health”, Hyderabad.
- Phattarakul, N., B. Rerkasem, L.J. Li, L.H. Wu, C.Q. Zou, H. Ram, V.S. Sohu, B.S. Kang, H. Surek, M. Kalayci, A. Yazici, F.S. Zhang and I. Cakmak. 2012. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant Soil* 361: 131-141.
- Phuphong, P., I. Cakmak, B. Dell and C. Prom-u-thai. 2018. Effects of foliar application of zinc on grain yield and zinc concentration of rice in farmers’ fields. *CMU Natural and Life Sciences Communications* 17(3): 181-190.
- Prasad, A.S. 2017. Chapter 20 - Discovery of zinc for human health and biomarkers of zinc deficiency. pp. 241-260. *In*: J.F. Collins (ed.). *Molecular, Genetic, and Nutritional Aspects of Major and Trace Minerals*. Academic press, Massachusetts.
- Prom-u-thai, C., A. Rashid, H. Ram, C. Zou, L.R.G. Guiherme, A.P.B. Corguinha, S. Guo, C. Kaur, A. Naeem, S. Yamuangmorn, M.Y. Ashraf, V.S. Sohu, Y. Zhang, F.A.D. Martins, S. Jumrus, Y. Tutus, M.A. Yazici and I. Cakmak. 2020. Simultaneous biofortification of rice with zinc, iodine, iron and selenium through foliar treatment of a micronutrient cocktail in five countries. *Frontiers in Plant Science* 11: 589835, doi: 10.3389/fpls.2020.589835.
- Prom-u-thai, C., L. Huang, R.P. Glahn, R.M. Welch, S. Fukai and B. Rerkasem. 2006. Iron (Fe) bioavailability and the distribution of anti-Fe nutrition biochemicals in the unpolished, polished grain and bran fraction of five rice genotypes. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86: 1209-1215.
- Prom-u-thai, C., S. Fukai, I.D. Godwin and L. Huang. 2007. Genotypic variation of iron partitioning in rice grain. *Journal of Science of Food and Agriculture* 87: 2049-2054.
- Saenchai, C., C. Prom-u-thai, S. Jamjod, B. Dell and B. Rerkasem. 2012. Genotypic variation in milling depression of iron and zinc concentration in rice grain. *Plant Soil* 361: 271-278.
- Saha, B., S. Saham P.D. Roy, G.C. Hazra and A. Das. 2013. Zinc fertilization effects on agromorphological and quality parameters of commonly grown rice. *SAARC Journal of Agriculture* 11(1): 105-120.
- Saha, S., M. Chakraborty, D. Padhan, B. Saha, S. Murmu, K. Batabyal, A. Seth, G.C. Hazra, B. Mandal and R.W. Bell. 2017. Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability. *Field Crops Research* 210: 52-60.
- Senguttuvel, P., G. Padmavathi, C. Jasmine, R.D. Sanjeeva, C.N. Neeraja, V. Jaldhani, P. Beulah, R. Gobinath, K.J. Aravind, P.S.V. Sai, R.L.V. Subba, A.S. Hariprasad, K. Sruthi, D. Shivani, R.M. Sundaram and M. Govindaraj. 2023. Rice biofortification: breeding and genomic approaches for genetic enhancement of grain zinc and iron contents. *Frontiers in Plant Science* 14: 1138408, doi: 10.3389/fpls.2023.1138408.
- Sheibanirad, A., M. Haghghi, S.A.H. Jalali and L. Abbey. 2023. Effect of different zinc

- fertilizer on green bean nutraceutical values. *Journal of Crops Science and Biotechnology* 26: 301-315.
- Sriprachote, A., S. Pengprecha, P. Pengpreecha, P. Kanyawongha and K. Ochiai. 2014. Assessment of cadmium and zinc contamination in the soils around Pha Te Village, Mae Sot District, Tak Province, Thailand. *Applied Environmental Research* 36(4): 67-79.
- Suganya, A., A. Saravanan and N. Manivannan. 2020. Role of zinc nutrition for increasing zinc availability, uptake, yield, and quality of maize (*Zea mays* L.) grains: An overview. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 51(15): 2001-2021.
- Tuiwong, P. and C. Prom-u-thai. 2021. Improving grain yield and zinc accumulation by zinc fertilizer management in wetland and upland rice varieties. *Khon Kaen Agriculture Journal* 49(4): 799-809. (in Thai)
- Tuiwong, P., P. Jaksomsak, B. Rerkasem and C. 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(4): 605-612. (in Thai)
- Utasee, S., S. Jamjod, S. Lordkaew and C. Prom-u-thai. 2022. Improved anthocyanin and zinc concentration in purple rice by nitrogen and zinc fertilizer application. *Rice Science* 29(5): 435-450.
- Wang, J., H. Mao, H. Zhao, D. Huang and Z. Wang. 2012. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China. *Field Crops Research* 135: 89-96.
- Wu, C., L. Lu, X. Yang, Y. Feng, Y. Wei, H. Hao, P.J. Stoffella and Z. He. 2010. Uptake, translocation, and remobilization of zinc absorbed at different growth stages by rice genotypes of different Zn densities. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(11): 6767-6773.
- Yamuangmorn, S., S. Jumrus, S. Jamjod, and C. Prom-u-thai. 2022. Promoting seedling vigour and grain zinc accumulation in rice by priming seeds and foliar application with zinc and potassium fertiliser. *Crop & Pasture Science* 73(5): 437-448.
- Yao, B., P. Chen and G. Sun. 2019. Distribution of elements and their correlation in bran, polished rice, and whole grain. *Food Science & Nutrition* 8: 982-992.
- Yilmaz, A., H. Ekiz, B. Torun, I. Gultekin, S. Karanlik, S.A. Bagci and I. Cakmak. 1997. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition* 20(4-5): 461-471.
- Younas, N., I. Fatima, I.A. Ahmad, and M.K. Ayyaz. 2023. Alleviation of zinc deficiency in plants and humans through an effective technique; biofortification: A detailed review. *Acta Ecologica Sinica* 43(3): 419-425.
- Zou, C., Y. Du, A. Rashid, H. Ram, E. Savasli, P. J. Pieterse, I. Ortiz-Monasterio, A. Yazici, C. Kaur, K. Mahmood, S. Singh, M.R. Le Roux, W. Kuang, O. Onder, M. Kalayci and I. Cakmak. 2019. Simultaneous

biofortification of wheat with zinc, iodine, selenium, and iron through foliar treatment of a micronutrient cocktail in six countries. Journal of agricultural and food chemistry 67(29): 8096-8106.

---