

ผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีและไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุสังกะสี
ในเมล็ดข้าวพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวน
ที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก



รรินทร์ รินสินจ้อย

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มีนาคม 2562

ผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีและไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุสังกะสี
ในเมล็ดข้าวพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวน
ที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก



รรินทร์ รินสินจ้อย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อมหาวิทยาลัยเชียงใหม่เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สาขาวิชาพืชไร่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มีนาคม 2562

ผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีและไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุสังกะสี
ในเมล็ดข้าวพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวน
ที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก

รรินธร รินสิน้อย

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่

คณะกรรมการสอบ

คณะกรรมการที่ปรึกษา

.....
ประธานกรรมการ
(อ. ดร. เพ็ญภา จักรสมศักดิ์)

.....
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(รศ. ดร. ชนาگانต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย)

.....
กรรมการ
(รศ. ดร. ชนาگانต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย)

.....
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รศ. ดร. ศันสนีย์ จำจด)

.....
กรรมการ
(รศ. ดร. ศันสนีย์ จำจด)

13 มีนาคม 2562

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก รศ. ดร. ชนาگانต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาอันมีค่าในการรับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือในการตรวจปรับปรุงแก้ไขและเพิ่มเติมข้อบกพร่อง ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ อ. ดร. เพ็ญภา จักรสมศักดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. สันสนีย์ จำจด กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องวิทยานิพนธ์นี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษา

ขอขอบคุณ ทนุอุดหนุนการศึกษาเพื่อปฏิบัติหน้าที่ผู้ช่วยสอนและผู้ช่วยวิจัย (TA&RA) ประจำปีการศึกษา 2559 ที่ช่วยแบ่งเบาภาระค่าใช้จ่ายในการศึกษา ซึ่งทำให้ข้าพเจ้ามีเวลาอดสูหาอย่างเต็มที่ในการศึกษาและสร้างผลงานวิจัย ตลอดระยะเวลา 1 ปี จนทำให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสเรียนรู้และมีประสบการณ์ในการเป็นผู้ช่วยสอนซึ่งเป็นประโยชน์ต่อข้าพเจ้าโดยตรง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ พี่ เพื่อน น้องใน CMUPN Lab รวมทั้งเจ้าหน้าที่ และนักวิชาการส่งเสริมการเกษตร สังกัดสำนักงานเกษตรอำเภอ และสำนักงานเกษตรจังหวัดเลย กรมส่งเสริมการเกษตรที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้กำลังใจกันด้วยดีในระหว่างการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้อบรมเลี้ยงดู สนับสนุนให้ข้าพเจ้าเห็นความสำคัญของการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจอย่างดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนงานวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

รรินธร รินสินจ้อย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีและไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวนที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก	
ผู้เขียน	นางสาวรณิธร รินสินจ้อย	
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (พืชไร่)	
คณะกรรมการที่ปรึกษา	รศ. ดร. ชนาคนัด เต โบลต์ พรหมอุทัย รศ. ดร. ศันสนีย์ จำจด	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

สังกะสี (Zn) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ทั้งพืชและสัตว์ การขาดธาตุสังกะสีเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญด้านโภชนาการของประชากร ซึ่งการเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว น่าจะเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวในกลุ่มผู้บริโภคข้าวได้ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนที่มีต่อผลผลิต และความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว ในพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวนที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก โดยวางแผนการทดลองแบบ 2x2x3 factorial in CRD ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง ประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่ 1 ระดับการจัดการปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจน 3 ระดับ คือ ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว (Adequate N) ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี (Adequate N+Zn) และปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมสังกะสี (High N+Zn) ปัจจัยที่ 2 การจัดการน้ำ 2 แบบ คือสภาพการปลูกแบบขังน้ำ (Flooded) และแบบสภาพไม่ขังน้ำหรือแอโรบิก (Aerobic) ปัจจัยที่ 3 พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือข้าวไร่พันธุ์กำหอม มข. (KH CMU) และข้าวนาสวนพันธุ์ชัยนาท 1 (CNT 1) ทดลอง ณ แปลงทดลองพืชไร่ ศูนย์วิจัยสาธิตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหิระ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศึกษาระหว่างเดือนสิงหาคม – ธันวาคม 2559 เก็บบันทึกข้อมูล ผลผลิต องค์กรประกอบผลผลิต และเก็บตัวอย่างพืชวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุสังกะสีและไนโตรเจน

ผลการทดลองพบว่าการจัดการน้ำและปุ๋ยมีผลต่อผลผลิตและปริมาณสังกะสีในเมล็ดแตกต่างกันในระหว่างข้าวทั้ง 2 พันธุ์ โดยพบว่าข้าวนาสวนพันธุ์ชัยนาท 1 เมื่อปลูกในสภาพแอโรบิกส่งผลให้ผลผลิตลดลงจากสภาพน้ำขังร้อยละ 28 ซึ่งเป็นผลมาจากการลดลงของจำนวนหน่อต่อกอ และจำนวนรวงต่อกอ ในขณะที่ข้าวไร่พันธุ์กำหอม มข. เมื่อปลูกในสภาพน้ำขังทำให้องค์ประกอบผลผลิตลดลง

ในหลายลักษณะ เช่น น้ำหนักแห้งฟาง จำนวนหน่อต่อกอ จำนวนรวงต่อกอ และน้ำหนัก 1,000 เมล็ด แต่ไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตเมล็ดโดยรวม การจัดการน้ำส่งผลต่อผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าวทั้ง 2 พันธุ์แตกต่างกัน เนื่องมาจากความสามารถในการปรับตัว และการตอบสนองต่อการจัดการน้ำที่ต่างกัน นอกจากการจัดการน้ำ การจัดการปุ๋ยก็มีอิทธิพลต่อผลผลิตในข้าวทั้งสองพันธุ์แตกต่างกัน โดยพันธุ์กำหอม มข. ซึ่งเป็นข้าวไร่พันธุ์พื้นเมืองพบว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีสามารถเพิ่มผลผลิตได้ร้อยละ 48 และเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องได้ร้อยละ 46 เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวในสภาพการปลูกแบบน้ำขัง แต่ไม่พบความแตกต่างของผลผลิตและความเข้มข้นสังกะสีในการปลูกแบบแอโรบิก ขณะที่พันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นข้าวนาสวนพันธุ์ปรับปรุงสมัยใหม่เมื่อใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้นร้อยละ 98 ในสภาพน้ำขังและร้อยละ 95 ในสภาพแอโรบิก เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว

การสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นในพันธุ์กำหอม มข. บ่งชี้ได้จากความสัมพันธ์เชิงบวก แต่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในพันธุ์ชัยนาท 1 ในขณะ ที่ความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดและผลผลิตพบได้ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน การทดลองนี้บ่งชี้ว่าการสะสมไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นในเมล็ดทำให้สังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้นด้วยในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ แม้ว่าอัตราการเพิ่มขึ้นจะต่างกัน แสดงว่ามีกลไกในการทำงานร่วมกันระหว่างธาตุไนโตรเจนและสังกะสี ซึ่งการตอบสนองที่ต่างกันนี้ในข้าวทั้ง 2 พันธุ์อาจจะเป็น ความแตกต่างของกลไกการดูดใช้ การเคลื่อนที่ และการสะสมในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าว ที่แสดงให้เห็นจากผลการทดลองถึงความแตกต่างในการเคลื่อนย้ายและการสะสมในระยะการเจริญเติบโตและ ส่วนต่าง ๆ ของเนื้อเยื่อในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ การเพิ่มจำนวนพันธุ์ข้าวในการศึกษาจึงมีความจำเป็นเพื่อยืนยันผลความแตกต่างในการตอบสนองในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีปริมาณและคุณภาพผลผลิตสูงสุดต่อผู้บริโภคต่อไป

Thesis Title	Effects of Applying Zinc and Nitrogen Fertilizers on Grain Yield and Zinc Concentration of Upland and Wetland Rice Varieties Grown in Waterlogged and Aerobic Conditions.	
Author	Miss Rarithorn Rinsinjoy	
Degree	Master of Science (Agronomy)	
Advisory Committee	Assoc. Prof. Dr. Chanakan Thebault Prom-u-thai	Advisor
	Assoc. Prof. Dr. Sansanee Jamjod	Co-advisor

ABSTRACT

Zinc (Zn) plays an important role in the metabolism in both plant and animal. Zinc deficiency is one of the major problems among the world population. Increasing Zn concentration in rice grain is suggested as a way to solve the problem. The objective of this study was to evaluate the effect of Zn and Nitrogen (N) fertilizers on grain yield and Zn concentration of upland and wetland rice varieties grown in waterlogged and aerobic conditions. The experiment was arranged in 3x2x2 factorial in Completely Randomized Design (CRD) with three independent replications. The experiment factors consisted of three levels of N and Zn fertilizers (Adequate N, Adequate N+Zn and High N+Zn), two different water conditions (flooded and aerobic) and two different varieties of the upland rice (Kum Hom CMU, KH CMU) and wetland rice (Chai Nat 1, CNT 1). A pot experiment was conducted during the period from August to December 2016 at Mae Hia Agricultural research, demonstrative and training center, Faculty of Agriculture Chiang Mai University. The data of grain yield and yield components were evaluated, and the samples of different plant parts were analyzed for Zn and N concentrations.

The results showed that water and fertilizer managements affected yield and Zn concentrations differently between the 2 rice varieties. The wetland rice variety, CNT 1, had decreased 28% grain yield when grown in the aerobic conditions compared with the flooded condition due to the decreasing of no. of tillers/hill and no. of panicles/hill. While, the upland rice variety KH CMU

had reduced some of their yield components e.g., straw dry weight, no. of tillers/hill, no. of panicles/hill and 1,000 grain weight when grown in the flooded condition compared with the aerobic condition, but it was not affected on the grain yield. The difference responses were probably due to their ability to adapt and response between the 2 rice varieties to different water management conditions. Beside water condition, fertilizer management had also affected differently to the yield between the 2 rice varieties. In KH CMU, the local upland rice variety had increased grain yield by 48% and grain Zn concentration in brown rice by 46% when applied with adequate N+Zn compared with only adequate N in the flooded condition, but no significant difference of grain yield and Zn concentration were found in the aerobic condition. On the other hand, CNT 1, the improved wetland rice variety had increased grain yield by 10% and Zn concentration by 98% in flooded condition and 95% in aerobic condition when applied with high N+Zn compared with only adequate N fertilizer.

The higher grain Zn concentration in brown rice resulted in high grain yield in KH CMU was indicated by the positive correlation between grain Zn and yield, but such the correlation was not found in CNT1. While, increasing grain N concentration increased yield in both varieties were observed. This study also indicated that increasing of grain N concentrations resulted in increasing grain Zn concentration in both varieties, indicating the integrate mechanisms between these 2 elements which could be uptake, transport and accumulation in different plant parts which was shown by the results in this study. There were differences in those mechanisms at each growing stage in different plant tissues between the 2 rice varieties. This study should be further confirmed by increasing the number of rice varieties which would be very useful information for improving both grain yield and quality for rice consumer

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
สารบัญภาพภาคผนวก	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ตรวจเอกสาร	3
2.1 ปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในประชากรโลกและบทบาทหน้าที่ ของธาตุสังกะสีในร่างกายมนุษย์	3
2.2 บทบาทหน้าที่ของธาตุสังกะสีในพืช	4
2.3 การแก้ไขปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในข้าว	5
2.4 การเคลื่อนย้ายและการสะสมธาตุสังกะสีในพืช	6
2.5 การดูดใช้สังกะสีของพืชในดินในสภาพน้ำขังและแอโรบิก	8
2.6 ความแตกต่างของพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวนต่อการดูดใช้ธาตุอาหาร	10
2.7 การจัดการปลูกที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสังกะสีในพืช	11
2.8 บทบาทของไนโตรเจนต่อการสะสมสังกะสีในพืช	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	15
บทที่ 4 ผลการทดลอง	18
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	54
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	60
เอกสารอ้างอิง	62
ภาคผนวก	72
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การจัดการปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนและสัญลักษณ์ ของแต่ละกรรมวิธีการจัดการ	15
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลผลิต คชนี้การเก็บเกี่ยว องค์ประกอบผลผลิต ในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน	18
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในแต่ละส่วนของพืช (ลำต้น ใบ ใบธง และเมล็ดข้าวกล้อง) ของข้าว 2 พันธุ์	30
ตารางที่ 4.3 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์กำหอม มช. ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพแอโรบิก	43
ตารางที่ 4.4 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์กำหอม มช. ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพน้ำขัง	46
ตารางที่ 4.5 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพน้ำขัง	49
ตารางที่ 4.6 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพแอโรบิก	52

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 4.1 ผลผลิตเมล็ด ในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และชัยนาท 1 ที่ปลูกภายใต้การจัดการปุ๋ยและการจัดการน้ำแตกต่างกัน	19
ภาพที่ 4.2 น้ำหนักแห้งฟางในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน	20
ภาพที่ 4.3 คำนีการเก็บเกี่ยวในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และ ชัยนาท ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน	21
ภาพที่ 4.4 องค์ประกอบผลผลิตในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และ ชัยนาท ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน	
ภาพที่ 4.4.1 จำนวนหน่อตอก	22
ภาพที่ 4.4.2 จำนวนรวงตอก และจำนวนรวงตอก	23
ภาพที่ 4.4.3 เปอร์เซนต์เมล็ดดี	23
ภาพที่ 4.4.4 น้ำหนัก 1,000 เมล็ด	24
ภาพที่ 4.5 ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	25
ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องที่เกิดจากพันธุ์ข้าว และการจัดการปุ๋ยแตกต่างกัน	26
ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง กับผลผลิตเมล็ด และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจน ในเมล็ดข้าวกล้องกับผลผลิตเมล็ด	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับสังกะสี ในเมล็ดข้าวกล้องในพันธุ์กำหอม มช. และพันธุ์ชัยนาท 1	28
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสี ในใบธง ที่ระยะตั้งท้อง ระยะ 15 วันหลังออกดอก และระยะสุกแก่	29
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม และใบ YEB ที่ระยะแตกกอ ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	32
ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม และใบธง ที่ระยะตั้งท้อง ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	34
ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม และใบธง ที่ระยะ 15 วันหลังออกดอก ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	36
ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม และใบธง ที่ระยะสุกแก่ ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	38
ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นไนโตรเจนในใบธง ที่ระยะตั้งท้อง ระยะ 15 วันหลังออกดอก ระยะสุกแก่ ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน	41

สารบัญภาพภาคผนวก

หน้า

ภาพที่ 1 อัตราส่วน โมลาร์ของกรดไฟติกต่อสังกะสีในข้าว 2 พันธุ์
ที่มีการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน

72



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 1

บทนำ

สังกะสี (Zinc; Zn) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ทั้งพืชและสัตว์ โดยธาตุสังกะสีเป็นธาตุอาหารที่มีความจำเป็นในการเจริญเติบโตของร่างกาย การพัฒนาของอวัยวะสืบพันธุ์ รวมไปถึงการรับรู้รสและระบบภูมิคุ้มกัน การขาดธาตุสังกะสีเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญด้านโภชนาการของประชากรโลก (Ishimaru et al. 2011) ทำให้ทารกคลอดก่อนกำหนด ส่งผลต่อน้ำหนักทารกแรกเกิด (< 2,500 กรัม) และมีอัตราการเจริญเติบโตในช่วงอายุ 4-9 เดือนต่ำ (Walravens et al. 1992) ทารกที่มีน้ำหนักตัวน้อยจากการคลอดก่อนกำหนด มีความต้องการธาตุสังกะสี (2-5 มิลลิกรัมต่อวัน) มากกว่าทารกที่คลอดตามปกติ (Lira et al. 1998) สำหรับผู้ใหญ่พบการลดลงของธาตุสังกะสีในเพศหญิงในช่วงของการมีประจำเดือน หญิงตั้งครรภ์ปัญหาการคลอดก่อนกำหนด ความดันโลหิตสูง ในเพศชายมีความต้องการธาตุสังกะสีมากกว่าเพศหญิง เนื่องจากร่างกายมีการเสริมสร้างกล้ามเนื้อ และมีอัตราการเจริญเติบโตมากกว่า และการพัฒนาการด้านการเจริญเติบโต น้ำหนัก ส่วนสูง การพัฒนาการของกระดูก รวมถึงมีการพัฒนาด้านการสืบพันธุ์ที่ช้ากว่าปกติ โดยพบว่าถ้าขาดธาตุสังกะสีมีผลทำให้มีจำนวนสเปิร์มและระดับฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (testosterone) ลดลง (Abbasi et al. 1980) โดยปริมาณธาตุสังกะสี ที่เหมาะสมในร่างกายมนุษย์จะอยู่ที่ประมาณ 2 กรัม ขณะที่ปริมาณธาตุสังกะสีที่ควรได้รับต่อวันต่อคนเฉลี่ยที่ 10-15 มิลลิกรัม (Weiss et al. 2005) ซึ่งแม้จะเป็นปริมาณเพียงเล็กน้อยที่ร่างกายต้องการ แต่พบว่ายังมีประชากรเป็นจำนวนมากที่ได้รับธาตุสังกะสีไม่เพียงพอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มผู้บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก เนื่องจากข้าวมีปริมาณสังกะสีในเมล็ดน้อยมากเมื่อเทียบกับพืชอาหารหลักอย่างอื่น (เป็ดมากรณ์ และคณะ 2553) ปริมาณสังกะสีในข้าวกล้องมีความแปรปรวนเป็นช่วงกว้างอยู่ในช่วง 15.9-58.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Hemalatha et al. 2007) และนอกจากนี้ผู้บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักโดยทั่วไปยังขาดโอกาสในการบริโภคอาหารที่เป็นแหล่งของธาตุสังกะสีสูง เช่น เนื้อสัตว์และถั่วเมล็ดแห้ง เป็นต้น

นอกจากความสำคัญของธาตุสังกะสีในร่างกายมนุษย์ ยังพบว่าธาตุสังกะสีมีบทบาทสำคัญในพืช โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์กว่า 70 ชนิด กระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน อีกทั้งยังจำเป็นต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และการสร้างเมล็ดของพืช (Broadley et al. 2012) มีรายงานว่า การใส่ปุ๋ยสังกะสีช่วยเพิ่มผลผลิตของธัญพืช และเพิ่มความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้ถึง 4 เท่า

เปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยสังกะสี (Yilmaz et al. 1997) นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยสังกะสีสามารถเพิ่มผลผลิตและเพิ่มการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวสาลีได้ (Ranjbar and Bahmaniar 2007) ในขณะที่การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบสำคัญของโปรตีน และโปรตีนก็เป็นส่วนประกอบสำคัญในโครงสร้างของโพรโตพลาสม (protoplasm) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในเซลล์พืช นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ และฮอร์โมน ในโตรเจนจึงเป็นธาตุที่มีบทบาทต่อการเจริญของพืชมากที่สุด รวมถึงการสร้างผลผลิตของพืช (วีรวัฒน์ 2558) ดังนั้นเป็นไปได้ว่าการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีน่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวและสามารถเพิ่มผลผลิตได้ด้วย มีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับผลการใช้ปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนในข้าวสาลี พบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อพืช โดยทำให้ธาตุสังกะสีเพิ่มขึ้นทั้งในส่วนของเมล็ดข้าวสาลีและส่วนของเอนโดสเปิร์ม ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ไนโตรเจนที่สูงขึ้นส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีเข้าสู่เมล็ดข้าวสาลีได้ถึงร้อยละ 240 เทียบกับต้นข้าวสาลีที่ได้รับไนโตรเจนต่ำ (Kutman et al. 2011) สอดคล้องกับ Zhao et al. (2009) ที่บ่งชี้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลผลิต การสะสมธาตุสังกะสี และความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในส่วนของเนื้อเยื่อพืชของข้าวสาลีฤดูหนาว (winter wheat) เป็นผลมาจากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับปุ๋ยสังกะสี

อย่างไรก็ตาม การศึกษาปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีในข้าวต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวยังมีข้อมูลอยู่จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพการปลูกและพันธุ์ข้าวที่มีความแตกต่างกันซึ่งน่าจะมีกลไกในการตอบสนองที่แตกต่างกัน อย่างเช่นในพันธุ์ข้าวนาสวนและข้าวไร่ ที่ปกติจะมีสภาพการปลูกที่แตกต่างกัน โดยข้าวนาสวนจะปลูกในสภาพน้ำขัง ในขณะที่ข้าวไร่จะปลูกในสภาพแอโรบิกหรือไม่มีการขังน้ำแต่จะอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก ซึ่งลักษณะความแตกต่างของพันธุกรรมและสภาพการปลูกที่มีสภาพน้ำและดินแตกต่างกัน น่าจะทำให้มีความแตกต่างในการตอบสนองของการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนและสังกะสีที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว ในพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวนที่ปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก ผลการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษากลไกการเคลื่อนย้ายและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวรวมทั้งการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดสูง ซึ่งน่าจะเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาจำนวนประชากรที่ขาดธาตุสังกะสีได้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในประชากรโลกและบทบาทหน้าที่ของธาตุสังกะสีในร่างกายมนุษย์

การขาดธาตุสังกะสี เป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประชากรจำนวนหนึ่งในสามของโลก โดยพบประชากรป่วยเป็นโรคขาดธาตุสังกะสีตั้งแต่ร้อยละ 4-73 (Hotz and Brown 2004) ซึ่งเป็นประชากรในแถบทวีปเอเชียและแอฟริกาถึงร้อยละ 10-60 (de Benoist et al. 2008) ในร่างกายของคนมี ปริมาณของสังกะสีสะสมอยู่ประมาณ 2 กรัม โดยร้อยละ 60 ของสังกะสีทั้งหมดจะสะสมอยู่ทั่วร่างกาย และร้อยละ 30 (ประมาณ 100-200 มิลลิกรัมต่อกรัม) สะสมอยู่บริเวณกระดูก ปกติร่างกาย ต้องการธาตุสังกะสีอยู่ในช่วงวันละ 5-15 มิลลิกรัม (Li et al. 2013) และการสูญเสียธาตุสังกะสีของร่างกายเกิดขึ้นทางลำไส้เล็กและปัสสาวะ โดยทางลำไส้เล็กจะมีการสูญเสียสังกะสีในปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึงมากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อวัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของสังกะสีที่สะสมอยู่ในร่างกาย ทั้งนี้ธาตุสังกะสีที่ไม่เพียงพอต่อร่างกายเป็นสาเหตุที่ทำให้เด็กอายุต่ำกว่า 5 ปี เสียชีวิต จำนวน 800,000 คนต่อปี โดยมีอาการท้องร่วง (176,000) โรคปอดบวม (406,000) และมาลาเรีย (207,000) จากสาเหตุดังกล่าวทำให้เด็กเกือบ 16 ล้านคนทั่วโลกต้องกลายเป็นผู้พิการ (Hotz and Brown 2004) สาเหตุของการขาดธาตุสังกะสีส่วนใหญ่เกิดจากการบริโภคธาตุสังกะสีไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ซึ่งธาตุสังกะสีเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเอนไซม์ มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาและเปลี่ยนสภาพของเนื้อเยื่อเจริญส่วนต่างๆ ของร่างกาย รวมถึงระบบภูมิคุ้มกันและระบบทางเดินอาหาร (Brown et al. 2002) ซึ่งธาตุสังกะสีมีความสำคัญเป็นพิเศษต่อทารกในครรภ์ที่กำลังเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว การกระตุ้นการเจริญเติบโต การพัฒนาส่วนสูง น้ำหนัก และกระดูกในทารก รวมทั้งเด็กและวัยรุ่น สำหรับสตรีมีครรภ์ควรได้รับสังกะสีให้เพียงพอตั้งแต่เดือนที่ 5 ของครรภ์ และช่วงและกระดูกในทารก รวมทั้งเด็กและวัยรุ่น สำหรับสตรีมีครรภ์ควรได้รับสังกะสีให้เพียงพอตั้งแต่เดือนที่ 5 ของครรภ์ และช่วงให้นมบุตร เพื่อให้ทารกสมบูรณ์แข็งแรง ไม่เกิดภาวะแคระแกร็น รวมทั้งช่วยให้เด็กทารกเกิดออกจาครรภ์ลดลง (สิริพันธ์ 2541) ในแถบตะวันออกกลางพบว่าผู้ที่ได้รับธาตุสังกะสีไม่เพียงพอส่วนใหญ่จะมีลักษณะแคระแกร็นและมีชีวิตอยู่ได้ไม่เกิน 25 ปี ซึ่งสาเหตุของการเสียชีวิตมาจากการจะติดเชื้อไวรัสและแบคทีเรีย เนื่องจากมีปัญหาด้านระบบภูมิคุ้มกัน (Prasad 2008)

ในประเทศไทย พบการขาดธาตุสังกะสีซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดภาวะเตี้ย (shortness and stunting) หรือการมีความสูงที่ต่ำกว่าเกณฑ์ของเด็กวัยประถมศึกษา (ช่วงอายุ 6-13 ปี) ในแถบชนบทของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย โดยเทียบการบริโภคพลังงาน โปรตีนและสารอาหารที่ใช้ในการเจริญเติบโต กับปริมาณสารอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโต คำนวณจากค่าสารอาหารที่เด็กไทยบริโภคใน 1 วันและค่าการวิเคราะห์ทางเคมี พบความสัมพันธ์ที่สอดคล้องกันระหว่างความสูงที่ต่ำกว่าเกณฑ์กับลักษณะพื้นฐานทางสังคมประชากร (sociodemographic) ภาวะทางโภชนาการ (anthropometric; การวัดสัดส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย) และตัวแปรทางชีวเคมี (biochemical variable) โดยตัวแปรชีวเคมีที่ใช้ในการตรวจสอบคือ อัลบูมิน(albumin) สังกะสี (zinc) เฟอรัรีติน (ferritin) ทรานสเฟอรัรีน (transferrin) และ เรตินอล (retinol; หรือ วิตามินเอ (vitamin A)) ในเลือด และการตรวจไอโอดีน (Iodine) ในตัวอย่างปัสสาวะ ผลจากการตรวจพบภาวะเตี้ยในเพศชายมากกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบเพศชายมีการบริโภคพลังงาน โปรตีน แคลเซียม ฟอสฟอรัส และสังกะสี ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐานมากกว่าเพศหญิง ดังนั้นการขาดสังกะสีเป็นปัจจัยหนึ่งจำกัดการเจริญเติบโตของร่างกาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มเด็กเพศชายในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย (Gibson et al. 2007)

2.2 บทบาทหน้าที่ของธาตุสังกะสีในพืช

การขาดธาตุสังกะสีในดินและพืชเป็นปัญหาการขาดจุลธาตุที่พบมากในหลายประเทศ (Alloway 2004) และเกือบร้อยละ 50 ของพื้นที่เพาะปลูกพืชอาหารหลักในโลกเป็นพื้นที่ที่มีธาตุสังกะสีต่ำ (Cakmak 2002) ซึ่งเกิดจากความสามารรถในการละลายของสังกะสีในดินที่ต่ำจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาการขาดธาตุสังกะสีในพืชส่วนใหญ่ ธาตุสังกะสีในพืชมีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์หลายชนิด ซึ่งเอนไซม์ในพืชชั้นสูงจำนวนมากต้องการสังกะสีมาช่วยกระตุ้นกิจกรรม ดีไฮโดรจีเนส (dehydrogenase) แอลโดเลส (aldolases) ไอโซเมอเรส (isomerases) และทรานส์ฟอสฟอริเลส (transphosphorylases) รวมทั้งมีบทบาทในเมแทบอลิซึมของดีเอ็นเอ การสังเคราะห์โปรตีนและการแบ่งเซลล์ (Coleman 1992) โดยพืชที่มีการขาดสังกะสีจะมีการสังเคราะห์โปรตีนลดลง จึงมีกรดอะมิโนและอะไมด์ (amides) เหลือตกค้างและสะสมอยู่มากกว่าปกติ และพบการสลายตัวของ RNA เร็วกว่าปกติ เนื่องจากการขาดธาตุสังกะสีทำให้มีเอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส (ribonuclease, RNase) เพิ่มขึ้น ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้จะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของอาร์เอ็นเอ (Johnson and Simons 1979) นอกจากนี้สังกะสียังมีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเชื้อหุ้มเซลล์ของพืช โดยจับกับฟอสโฟลิพิด และหมู่ซัลไฟดริล (sulfhydryl group) ที่เป็นองค์ประกอบของเยื่อ ดังนั้นเมื่อขาดสังกะสีจึงพบการรั่วซึมของอินทรีย์สารโม

กุลเล็ก และมีโครงสร้างบางส่วนซ้ำและสภาพซึมของเนื้อเยื่อสูงกว่าปกติ เนื่องจากมีซูเปอร์ออกไซด์ มากเกินไป โดยพบว่าพืชมีอาการเหลืองซีด และเนื้อเยื่อใบตายบางบริเวณ รวมถึงการแคระแกร็นของต้น พืช (ยงยุทธ 2543) Fu et al. (2016) ระบุว่าสังกะสีมีความสำคัญในการสังเคราะห์แสงและการหายใจ ซึ่ง การขาดธาตุสังกะสีจะลดอัตราการสังเคราะห์แสง ปริมาณคลอโรฟิลล์ การสังเคราะห์โปรตีน และลด กิจกรรมของคาร์บอนิกแอนไฮไดเรส (carbonic anhydrase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีส่วนประกอบของธาตุ สังกะสีที่เกิดขึ้นในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต โดยมีหน้าที่ช่วยรักษาสมดุลของกรดต่างในเนื้อเยื่อต่างๆ และธาตุสังกะสียังเกี่ยวข้องกับกระบวนการปฏิกิริยา โดยปกติเอนไซม์จะมีความเข้มข้นของสังกะสีสูง และมีการเคลื่อนย้ายไปในเมล็ดขณะที่เมล็ดมีการพัฒนา ซึ่งพบว่าพืชที่ขาดสังกะสีน้ำหนักเมล็ดลดลง มากกว่าน้ำหนักแห้งส่วนอื่นของพืช (Polar 1975) Cakmak et al. (2010) ระบุว่ากรดไขมันธาตุสังกะสี ทางใบส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญ โดยเพิ่มขึ้นเมื่อพ่นใน ระยะที่การเจริญเติบโตเป็นไปอย่างช้าๆ เช่น ในระยะน้ำนม และระยะที่มีการสร้างแป้งของเมล็ดข้าวโพด

2.3 การแก้ไขปัญหาคาดธาตุสังกะสีในข้าว

จากปัญหาคาดธาตุสังกะสีในประชากรโลกที่เป็นสาเหตุของโรคและอาการผิดปกติในมนุษย์ การเพิ่มความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในพืชอาหารหลักเป็นสิ่งสำคัญที่จะสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ (Welch and Graham 2004) จากการสำรวจของศูนย์วิจัยข้าวนานาชาติ (IRRI) ประเทศฟิลิปปินส์ พบ ปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องมีความแปรปรวนเป็นช่วงกว้างระหว่างพันธุกรรมข้าว และจากการ วิเคราะห์จำนวน 939 พันธุ์ มีความแปรปรวนของธาตุสังกะสี อยู่ที่ 13.5-58.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ พบว่าพันธุ์ข้าวส่วนมากมีปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดต่ำ (Welch et al. 2000) วิธีการในการเพิ่มปริมาณ ธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการจัดการในการปลูกโดยการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินหรือ การพ่นสารละลายปุ๋ยให้แก่พืชทางใบ และการแช่เมล็ดด้วยสารละลายสังกะสี (seed primer) พบว่า สามารถเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้เป็นอย่างดี (Cakmak et al. 2010) การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน และพ่นสารละลายทางใบ สามารถเพิ่มผลผลิตข้าวสาลีอย่างมีนัยสำคัญ โดยการฉีดพ่น $ZnSO_4$ ความ เข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร) ทางใบ ทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 และ 19 ตามลำดับ ในขณะที่การใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินในอัตรา 0.8, 1.6 และ 2.4 กิโลกรัมต่อไร่ ทำให้ผลผลิต เพิ่มขึ้นร้อยละ 18, 32 และ 41 เมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีควบคุม (Khattak et al. 2015) นอกจากนี้งาน ทดลองของสุพรรณิ (2553) ทดลองเติมธาตุสังกะสีในระหว่างกระบวนการนึ่งข้าว ทำให้ความเข้มข้นของ ธาตุสังกะสีเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหนึ่งที่ไม่ได้เติมธาตุสังกะสี ซึ่งมีความเข้มข้นธาตุสังกะสี 15.3

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และข้าวหนึ่งที่มีการเพิ่มธาตุสังกะสีมีความเข้มข้นของสังกะสี 22.6-71.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราการเติมธาตุอาหารและพันธุ์ข้าว สอดคล้องกับ Hotz et al. (2015) ที่ระบุว่า ปริมาณสังกะสีในข้าวเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารละลายสังกะสี ($ZnSO_4$) ที่ใช้ในการแช่ข้าวหนึ่ง ในข้าวขาวที่ไม่แช่สารละลายมีค่าความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดอยู่ในช่วง 9.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับข้าวขาวที่แช่สารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณธาตุสังกะสีสูงสุดที่ 44.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวขาวจะเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ หากแช่สารละลายที่ความเข้มข้นสังกะสี 300 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

นอกจากนี้การปรับปรุงพันธุ์ข้าว เป็นอีกวิธีการที่พบว่ามีความเป็นไปได้ในการเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวได้ แม้ว่าจะต้องใช้เวลานานและต้องการแหล่งพันธุกรรมข้าวที่มีปริมาณธาตุสังกะสีสูง ข้าวพันธุ์ปรับปรุงที่มีปริมาณธาตุสังกะสีสูง ยกตัวอย่างเช่น ในประเทศอินเดียพบว่ามีสายพันธุ์ข้าวพื้นเมืองบางพันธุ์ที่มีสังกะสีในเมล็ดต่ำ (<14 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) จึงทำการปรับปรุงพันธุ์เพื่อให้ได้พันธุ์ข้าวที่มีธาตุสังกะสีในเมล็ดเฉลี่ย 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ พันธุ์ Chhattisgarh Zinc Rice-1 BRR1 Dhan-72 และ IET 23832 (Singh et al. 2017) เทคนิคการตัดต่อยีนขั้นสูงได้เริ่มนำมาใช้ในการเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว แม้ว่าจะยังไม่ได้รับการยอมรับในกลุ่มผู้บริโภค เนื่องจากผลในระยะยาวที่อาจจะเกิดขึ้น แต่พบว่ามีพันธุ์ข้าวหลายพันธุ์ที่มีปริมาณธาตุสังกะสีสูงและเกิดจากการตัดต่อยีน โดยมีการศึกษาลักษณะทางพันธุกรรมที่ระบุถึง ชุดของดีเอ็นเอที่ประกอบด้วยลำดับของยีนหรือชุดของการเชื่อมโยงของยีนหลายตัวซึ่งทำให้เกิดลักษณะถ่ายทอดเชิงปริมาณ (Quantitative Trait Loci ;QTLs) ของเมล็ดที่มีปริมาณสังกะสีสูง ที่สามารถคัดเลือกพันธุ์ใช้เป็นเครื่องหมายทางพันธุกรรม สำหรับการปรับปรุงพันธุ์ ที่มียีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและสะสมธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวเพื่อพัฒนาเป็นสายพันธุ์ที่มีธาตุสังกะสีสูงต่อไป ในการปรับปรุงพันธุ์ระหว่างข้าวพันธุ์ IR64 และ Jalamagna พบ QTLs บ่งชี้ว่าส่งผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีในรากและลำต้น บางตำแหน่งของ QTLs ยังเป็นตัวกำหนดสังกะสีในเมล็ด ความทนทานต่อพิษสังกะสี และความทนทานต่อการขาดสังกะสี (Dong et al. 2006; Wissuwa et al. 2006) เช่นเดียวกับ การปรับปรุงพันธุ์ข้าวระหว่าง พันธุ์ Sasanishiki กับพันธุ์ Habataki - BIL พบ QTLs 2 ตำแหน่ง คือ qSZn2 และ qSZn12 ที่มีผลต่อความแปรปรวนความเข้มข้นสังกะสีในส่วนลำต้น ที่ร้อยละ 16 และ 21 ตามลำดับ (Ishikawa et al. 2010) งานวิจัยในปัจจุบันทำให้เข้าใจเกี่ยวกับโมเลกุลสังกะสีที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของสังกะสีในข้าว และการผสมพันธุ์ข้าวสามารถเพิ่มระดับสังกะสี 6-8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (HarvestPlus 2014) ขณะที่ข้าวที่ตัดต่อยีน (transgenic plant) สามารถเพิ่มระดับสังกะสีได้ ถึง 15-30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Johnson et al. 2011; Masuda et al. 2012; Slamet-Loedin et al. 2015)

2.4 การเคลื่อนย้ายและการสะสมธาตุสังกะสีในพืช

ธาตุสังกะสีเป็นจุลธาตุที่มีความจำเป็นในกระบวนการต่าง ๆ ของพืช โดยทั่วไปธาตุสังกะสีมีประจุไอออน Zn^{2+} (divalent cation) แต่ในสภาพที่มี pH สูง พืชอาจมีการดูดใช้ในรูป $ZnOH^+$ (monovalent cation) (Marschner 1995) พืชดูดซึมธาตุสังกะสี ผ่านกลไกการไหลมวลสาร (mass flow) และการแพร่ (diffusion) ของราก ซึ่งเป็นกลไกแบบ passive เกี่ยวข้องกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายกับความเข้มข้นของธาตุสังกะสีที่เคลื่อนผ่านผนังเซลล์ของราก (Lee et al. 2010) นอกจากนี้ยังมีส่วนของสารอินทรีย์ที่ออกมาจากเนื้อเยื่อชั้นนอกของเซลล์ราก (epidermal cell) ประกอบด้วย กรดซิตริก (citric acid) กรดมาลิก (malic acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) และอื่น ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อย phytosiderophores ของพืชซึ่งเป็นการที่มีความเสถียรกับธาตุสังกะสีและเกี่ยวข้องกับการดูดซึมธาตุสังกะสีของพืช ภายในรากพืชนั้นธาตุสังกะสีต้องผ่านชั้นเนื้อเยื่อต่าง ๆ ก่อนถึงไซเลมเพื่อส่งต่อไปในยังส่วนของลำต้นเหนือดิน โดยผ่านชั้นเนื้อเยื่อ (1) epidermis (2) cortex (3) endodermis และ pericycle ในระหว่างการขนส่ง Zn^{2+} (mineral ions) เข้าสู่ไซเลม 2 เส้นทางหลัก คือ (1) symplastic (2) apoplastic (Steudle 1994) ส่วนในท่อลำเลียงอาหารโฟลอม (phloem) มีธาตุสังกะสีค่อนข้างสูง เนื่องจากความเข้มข้นที่มากขึ้นจากสารประกอบต่าง ๆ ในสารละลายในท่อโฟลอม (phloem sap) โดยขนส่งในรูปไอออนิกต่างๆ เช่น Zn nicotianamine, Zn-malate และ สารประกอบเชิงซ้อนของ Zn-histidine และสารอาหารที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงจะถูกส่งต่อไปยังเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของพืชโดยผ่านทางท่อโฟลอม (Gupta et al. 2016) Herren and Feller (1994) กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างไซเลมและโฟลอมที่มีบทบาทในการขนส่งธาตุสังกะสีไปยังเมล็ดในระยะสุกแก่ทางสรีระวิทยา ในข้าวมีการขนส่งธาตุสังกะสี จากต้น ไปยังแกนกลางของช่อดอก (rachis) และท่อลำเลียงของเมล็ด (grain vascular bundle) ในระยะเต็มเต็มเมล็ด และการขนส่งธาตุอาหารต่าง ๆ ไปยังส่วนของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) จะผ่านวิถี apoplast จากชั้นของนิวเคลลัส (nucellus layer) ผ่านเข้าสู่ชั้นเยื่ออาลิวโรน (aleurone layer) และไปสู่เอนโดสเปิร์ม

งานทดลองของ Jiang et al. (2008) ชี้ให้เห็นว่าในช่วงการเจริญเติบโตหากพืชได้รับธาตุสังกะสีในอัตราที่ต่ำ (0.15-1.65 ไมโครโมลต่อลิตร) พบความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ด (rice bran; pericarp, seed coat, nucellus and aleurone layer) (60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) มากกว่าในส่วนของลำต้น (stem) แกนกลางช่อดอก (rachis) และเอนโดสเปิร์ม ที่มีสัดส่วนใกล้เคียงกัน (20-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และในกรณีที่พืชได้รับธาตุสังกะสีในอัตราที่สูง (150-750 ไมโครโมลต่อลิตร) พบความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในส่วนของลำต้นมากกว่าเยื่อหุ้มเมล็ดและแกนกลางช่อดอก นอกจากนี้

Barua และ Saikia (2018) รายงานว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินร่วมกับพ่นสังกะสีทางใบพืชสามารถดูดซึมได้ผ่านชั้นผิวใบ (epidermis) ซึ่งธาตุอาหารจะถูกหมุนเวียนและเคลื่อนย้ายเข้าสู่เมล็ดผ่านทางท่อลำเลียงอาหาร โพลเอม ขณะที่การใส่ปุ๋ยสังกะสีในดินร่วมกับการแช่เมล็ดในสารละลายสังกะสี สามารถเพิ่มการดูดซึมสังกะสีได้มากขึ้น เนื่องจากปริมาณสังกะสีในสารละลายดินมีมากขึ้น อีกทั้งการแพร่กระจายของรากที่มีมากขึ้นช่วยให้การดูดซึมธาตุสังกะสีมากขึ้น งานทดลองของสุพรรณิ (2556) แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนย้ายของธาตุอาหารเข้าออกภายในเมล็ดข้าว การเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุอาหาร ในระหว่างกระบวนการนึ่งข้าว โดยพบว่าระยะเวลาเก็บเกี่ยว พันธุ์ข้าวและสภาพการนึ่ง มีผลต่อปริมาณธาตุสังกะสีที่ลดลง โดยข้าวที่เก็บเกี่ยวที่ระยะ 45 วันหลังดอกบาน และไม่แช่น้ำก่อนนึ่งมีความเข้มข้นธาตุสังกะสีสูงสุด (12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งงานทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่านอกจากกระบวนการลำเลียงธาตุอาหารภายในต้นพืช ยังมีปัจจัยแวดล้อมภายนอกที่มีบทบาทสำคัญในการขนส่งธาตุสังกะสีไปเก็บสะสมไว้ยังเอนโดสเปิร์มของเมล็ดพืช

2.5 การดูดใช้สังกะสีของพืชในดินในสภาพน้ำขังและแอโรบิก

การเจริญเติบโตและผลผลิตของพืช ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ร่วมระหว่างชนิดของพืช (พันธุกรรม) กับสภาพแวดล้อม โดยมีปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพ (physical factors) ได้แก่ สภาพดินฟ้าอากาศ (แสง อุณหภูมิ ความชื้น) มีน้ำและดินเป็นปัจจัยหลัก (เฉลิมพล 2542) พืชที่มีการเจริญเติบโตภายใต้ดินที่มีความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีต่ำ โดยทั่วไปจะมีผลผลิตและคุณภาพผลผลิตที่ลดลง (Welch and Graham 1999) ยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดพืชจะลดลง ร้อยละ 80 จากการเจริญเติบโตในดินที่มีความเป็นประโยชน์ของสังกะสีต่ำ (Cakmak et al. 1997) การขาดธาตุสังกะสีโดยทั่วไป เกิดจากดินที่มีสภาพเป็นด่าง (alkaline soils) เนื่องจากความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืชมีความสัมพันธ์กับค่า pH ของดิน (Srinivasa Rao et al. 2008) งานวิจัยของ Khattak et al. (2015) ระบุว่าดินที่เป็นด่างมักจะขาดธาตุสังกะสีในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แม้ว่าในดินจะมีธาตุสังกะสีอยู่ในช่วงที่เพียงพอแล้วก็ตาม (>0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) งานวิจัยของ Qadar (2002) รายงานว่าพบการขาดธาตุสังกะสีในดินที่มีค่า pH >8.0 รวมไปถึงดินพรุและดินเค็มตามชายฝั่งทะเล ซึ่งความอึดตัวของน้ำในดินเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการขาดธาตุสังกะสี (Quijano-Guerta et al. 2002) จึงควรปรับปรุงดินให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมและชนิดของดิน การเพาะปลูกข้าวในหลายพื้นที่ของโลกมีการเปลี่ยนแปลงจากข้าวนาสวนในสภาพน้ำขังเป็นการเพาะปลูกในสภาพแอโรบิก หรือระบบการเพาะปลูกแบบเปียกสลับแห้งมากขึ้น (alternate wetting and drying; AWD) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อปริมาณการใช้น้ำและความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสี

ต่อพืช (Gao et al. 2006) ระบบการเพาะปลูกหรือสภาพดินที่แตกต่างกันส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน งานทดลองของ Graham et al. (1999) พบว่าพันธุ์ข้าวชนิดเดียวกันเมื่อปลูกในดินที่แตกต่างกัน มีความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวแตกต่างกันถึง 90 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ Wisuwa et al. (2008) ที่บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (8-47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยเป็นผลมาจากการปลูกในดินที่ต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมมีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดข้าว

พันธุ์ข้าวที่ปลูกในพื้นที่ลุ่มส่วนมากเป็นข้าวที่ปลูกภายใต้สภาพน้ำขัง และในเอเชียมีการผลิตข้าวลักษณะนี้คิดเป็นร้อยละ 70 ของการเพาะปลูกข้าวทั้งหมด (Farooq et al. 2007) โดยทั่วไปในสภาพดินต่างและดินปนที่มีน้ำขัง ค่า pH จะถูกลดลงพร้อมกับธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองในดินที่ลดลง (Xu et al. 2003) ทั้งนี้ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายดินจะลดลงหลังจากการขังน้ำ และความเข้มข้นของสังกะสีจะเพิ่มขึ้นชั่วคราวหลังจากการระบายน้ำออก แต่จะอยู่ในช่วงสมดุลประมาณ 0.3-0.5 ไมโครโมลาร์ (Forno et al. 1975) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เกิดขึ้นบริเวณรอบรากพืช (rhizosphere) (Mikkelsen and Kuo 1977) ขณะที่สารประกอบซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ในดินกรด (Kittrick 1976) และสารประกอบซิงค์คาร์บอเนต (ZnCO₃) ในดินปูน (Bostick et al. 2001) มีการดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้น โดยแร่ออกไซด์ (oxide minerals) เช่น sesquioxides อินทรีย์วัตถุในดินและแร่ดินเหนียว ทำให้ลดการดูดซึมธาตุอาหารของรากข้าว ใน 2-3 สัปดาห์หลังจากปักดำ ต้นกล้าจึงแสดงอาการอ่อนแอต่อการขาดธาตุสังกะสี และหยุดชะงักการเจริญเติบโต เมื่อมีการฟื้นตัว ต้นกล้าจะแคระแกร็นและให้ผลผลิตที่ลดลง จึงพบว่าการขาดธาตุสังกะสีในข้าวเกิดขึ้นหลังจากการปักดำ ซึ่งพบโดยทั่วไปจากการเพาะปลูกในพื้นที่ลุ่ม (Neue and Lantin 1994) หลังจากการขังน้ำของแปลงข้าว ดินจะมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งถือเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความเป็นประโยชน์ของดินในการสร้างผลผลิตข้าว (de Datta 1981) Kozlowski (1984) กล่าวถึงการกระจายของระบบรากพืชที่เป็นผลมาจากสภาวะน้ำขัง เช่น การเพาะปลูกข้าวสาธิตในพื้นที่ที่มีการระบายน้ำไม่ดี จะมีรากน้อยกว่า ถึง 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีการระบายน้ำดี และพบว่าระบบรากส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวดินเท่านั้น เป็นผลให้เกิดการดูดธาตุอาหารและผลผลิตข้าวสาธิตลดลง สอดคล้องกับ Lockard et al. (1972) ที่กล่าวว่าสภาพน้ำขังส่งผลต่อการขาดธาตุสังกะสีในดิน รากพืชมีการเจริญเติบโตน้อยลง ส่งผลต่อการสะสมของสังกะสีในเมล็ดข้าว

การปลูกพืชใช้น้ำน้อยหรือการปลูกสภาพแอโรบิก เป็นระบบการปลูกพืชที่เหมาะสมกับพืชไร่ เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี (Prasad 2011) โดยเน้น การใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพในการผลิตพืช ซึ่งการเพาะปลูกสภาพแอโรบิกอาจส่งผลต่อปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน

โดยเฉพาะบริเวณรอบรากพืช และปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ของเหล็กและกิจกรรมของแบคทีเรียในสภาพแอโรบิกส่งผลต่อความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีในดินอย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มขึ้นของกระบวนการไนตริฟิเคชัน (nitrification) โดยแบคทีเรียบางชนิดใช้แอมโมเนียมในดิน (NH_4^+) เป็นแหล่งพลังงานและทำให้เกิดไนไตรต์ (NO_2^-) ซึ่งเปลี่ยนเป็นไนเตรต (NO_3^-) และพืชสามารถใช้ได้ เป็นผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกไซด์บริเวณรอบราก (ค่า pH สูงขึ้น) ดังนั้นความเป็นประโยชน์ของธาตุสังกะสีจึงลดลง (Gao 2007) นอกจากนี้ Marschner (1995) ยังระบุว่าเมื่อน้ำในดินลดลงอาจจำกัดการขนส่งสังกะสีไปยังรากเนื่องจากสังกะสีในดินส่วนใหญ่เคลื่อนที่โดยวิธีการแพร่ และการอัตราการคายน้ำที่ลดลงส่งผลต่อการไหลของมวลทำให้การขนส่ง และการเคลื่อนที่เข้าสู่เมล็ดของสังกะสีลดลง เปรียบเทียบการปลูกข้าวในสภาพน้ำขังและสภาพแอโรบิกพบว่า ที่ระยะสุกแก่ในสภาพแอโรบิกมีความเข้มข้นของสังกะสีต่ำกว่าสภาพน้ำขัง รวมทั้งข้าวที่ปลูกในสภาพแอโรบิกมีผลผลิตและดัชนีเก็บเกี่ยว (harvest index) ต่ำกว่าการปลูกในสภาพน้ำขัง (Gao et al. 2006) ขณะเดียวกันการศึกษาในข้าว 2 สายพันธุ์ พบว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีภายใต้การจัดการน้ำแบบเปียกสลับแห้ง สามารถเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดได้ แต่การใส่ปุ๋ยสังกะสีแบบเดียวกันนั้น ไม่มีประสิทธิภาพหรือไม่ได้ผลลัพธ์ที่ดีภายใต้การปลูกแบบน้ำขัง (Wang et al. 2014)

2.6 ความแตกต่างของพันธุ์ข้าวไร่และข้าวนาสวนต่อการดูดใช้ธาตุอาหาร

ข้าว (*Oryza sativa*) เป็นพืชที่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเด่นตามแต่ละสภาพพื้นที่ ซึ่งความแตกต่างของสภาพพื้นที่ส่งผลต่อการปรับตัวและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพันธุ์ข้าวแต่ละชนิด โดยสามารถแบ่งตามสภาพพื้นที่ได้เป็น ข้าวไร่ (upland rice) และ ข้าวนาสวน (wetland rice, lowland rice) ซึ่งข้าวเป็นพืชที่มีลักษณะของรูปแบบตามนิเวศ (ecotype) แตกต่างกันอย่างชัดเจน (Xia et al. 2015) ทั้ง 2 กลุ่ม มีช่วงของการพัฒนาหรือการเปลี่ยนแปลงจากพืชป่า (wild) เป็นพืชปลูก (crop) ภายใต้ระบบนิเวศทางการเกษตรที่แตกต่างกัน ส่วนใหญ่ข้าวไร่จะถูกเพาะปลูกในพื้นที่ที่มีการจัดการและปริมาณน้ำไม่มากนัก เนื่องจากดินมีสภาพไม่อุ้มน้ำและเป็นพื้นที่ที่มีความลาดชัน แต่ยังคงพบว่าข้าวไร่ครอบคลุมพื้นที่การเพาะปลูกมากขึ้น ทั้งในพื้นที่ที่มีฝนตกชุก จนกระทั่งพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำน้อย จึงอาจกล่าวได้ว่าการเพาะปลูกข้าวไร่ในบางพื้นที่อาจไม่ได้จำเป็นจะต้องสะท้อนถึงสภาพทางอุทกวิทยาที่กำหนดการใช้น้ำในการเพาะปลูกพืช (Moorman and van Breemen 1978) แต่ในขณะเดียวกัน ปริมาณน้ำที่จำกัดหรือปริมาณน้ำที่ไม่เหมาะสมจะเป็นตัวจำกัดปริมาณผลผลิตข้าวไร่ในหลายพื้นที่

ข้าวไร่มีความแปรปรวนทางพันธุกรรม ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการต้านทานต่อการขาดน้ำ ได้มากกว่าข้าวนาสวน ซึ่งพบความแตกต่างของความกว้างใบ จำนวนหน่อ และความยาวของรากลระหว่างข้าว 2 พันธุ์ (IRRI 1975) ข้าวที่มีความทนทานต่อการขาดน้ำหรือสภาพแห้งแล้งได้ดีจะมีระบบรากลึก แม้ว่าการกระจายของรากจะน้อยกว่าข้าวนาสวน แต่ข้าวไร่มีความยาวของรากที่มากกว่าข้าวนาสวน ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งที่สำคัญของข้าวไร่สำหรับการดูดใช้น้ำในชั้นดินลึกภายใต้สภาวะแห้งแล้ง ซึ่งรากบางส่วนอาจมีความยาวถึง 70-80 เซนติเมตร (Abe et al. 1994) แตกต่างจากข้าวนาสวนที่ระบบรากค่อนข้างตื้นและมีลักษณะรวมเป็นกระจุก กระจายตัวอยู่ในระดับชั้นดินบนที่ 15-30 เซนติเมตร คุณลักษณะดังกล่าว เป็นผลเนื่องมาจากการตอบสนองและการปรับตัวของสรีรวิทยาของพืช (Serraj et al. 2011) ระดับน้ำในดินที่ท่วมขังส่งผลให้เกิดสภาพที่ไม่มีอากาศ (anoxia) หรือมีออกซิเจนละลายในน้ำเพียงเล็กน้อย (hypoxia) ในขณะที่ดินที่ไม่มีน้ำท่วมขังมีปริมาณอากาศหรือออกซิเจนในระดับที่ใกล้เคียงกับบรรยากาศเหนือดิน (oxia) จากการทดลองพบว่ารากข้าวแสดงการตอบสนองต่อการขาดออกซิเจนอย่างชัดเจนในด้านการยืดขยายความยาวราก โดยรากข้าวที่เจริญในสภาพขาดออกซิเจนมีความยาวน้อยกว่ารากที่ได้รับออกซิเจนในระดับปกติถึงร้อยละ 40 ซึ่งลักษณะทางสัณฐานที่แตกต่างกันมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ข้าวนาสวนมี aerenchyma ที่เป็นลักษณะของการมีช่องอากาศมากของราก (ลักษณะการมีช่องอากาศมากจะขึ้นอยู่กับชนิดของราก) เพื่อช่วยให้มีการแพร่กระจายของแก๊สภายในรากเข้าไปในส่วนของ cortex พบในบริเวณ 3-4 เซนติเมตร ถัดจากปลายรากของข้าวที่อยู่ในสภาพน้ำขัง (Kludze et al 1993) ซึ่งคุณสมบัตินี้มีผลต่อความทนทานในการเจริญเติบโตของพืชสำหรับการดูดใช้ธาตุอาหารในสารละลายดินที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Colmer 2003)

อย่างไรก็ตามพบว่า ข้าวไร่มีช่องอากาศบริเวณรากที่เป็นลักษณะ aerenchyma ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับข้าวนาสวน งานทดลองของ Gao et al. (2005) ระบุว่าข้าวไร่มีลักษณะจีโนมโทป์ของรากที่มีความสามารถในการดูดใช้ธาตุสังกะสีในดินได้ดี ซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจากรากไปยังลำต้นส่วนเหนือดิน โดยที่ภายใต้สภาพแอโรบิกบริเวณไรโซสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและทางชีวภาพที่ได้รับอิทธิพลจากพืช การปลดปล่อยสารเมแทบอลิต์จากกระบวนการเมแทบอลิซึมออกจากรากพืชสู่ดินรอบรากพืช รวมทั้งไมคอร์ไรซ่า และจุลินทรีย์อื่น ๆ บริเวณรอบรากพืช มีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลง pH ซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมธาตุสังกะสีของพืชในสภาพแอโรบิก

2.7 การจัดการปลูกที่มีอิทธิพลต่อปริมาณสังกะสีในพืช

ระบบการเพาะปลูกมีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืช ในงานทดลองของ Veeresh et al. (2011) ระบุว่า ข้าวไร่ส่วนใหญ่มีการหวานเมล็ดลดลงแปลงในฤดูฝน มีการเจริญเติบโตและความสมบูรณ์ของ seminal root เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวนาสวนที่ระบบรากจะได้รับผลกระทบจากการย้ายปลูก ซึ่งการปักดำส่งผลโดยตรงต่อ seminal root การตั้งตรงของต้นกล้า ความยาวของรากและการดูดซับธาตุอาหารของพืช เช่นเดียวกับ Mitchell et al. (2012) ทดลองปลูกข้าวในสภาพน้ำขังและสภาพแอโรบิกพบว่า ข้าวที่ปลูกในสภาพแอโรบิกมีความยาวของปลายรากร้อยละ 322 และปริมาตรของรากในดิน (135 ตารางเซนติเมตร) มากกว่าข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำขัง (75 ตารางเซนติเมตร) นอกจากการปลูกในสภาพน้ำขังและสภาพแอโรบิก ปัจจุบันยังมีระบบการเพาะปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง ซึ่งเป็นวิธีการประหยัดน้ำในการเพาะปลูก โดยจะปลูกต้นกล้าในดินที่มีน้ำท่วมขัง 3-5 วัน และปล่อยให้แห้ง 2-3 วัน หลังจากนั้นจึงปล่อยน้ำเข้าแปลงที่ระดับน้ำ 15-20 เซนติเมตรจากหน้าดิน ดินที่มีความอึดด้วยน้ำจะส่งผลต่อการลดลงของความเข้มข้นธาตุสังกะสีที่เป็นประโยชน์ในดิน ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งอาจมาจากอินทรียสารในดินที่ลดลง (Farooq et al. 2009)

การใส่ปุ๋ยเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยในการปรับปรุงปริมาณและคุณภาพของผลผลิตพืช ในการวิเคราะห์แป้งจากเมล็ดข้าวกล้องที่มีการใส่ปุ๋ยสังกะสี จะมีปริมาณสังกะสี 13-45 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับเมล็ดข้าวกล้องที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยสังกะสี (Jiang et al. 2008) ซึ่ง Slaton et al. (2005) ได้ทำการทดลองเพื่อประเมินผลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดิน (1.8 กิโลกรัมสังกะสีต่อไร่) และฉีดพ่นทางใบ (0.18-0.35 กิโลกรัมสังกะสีต่อไร่) ที่ส่งผลต่อผลผลิตเมล็ดข้าว พบว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีมีผลทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 12-180 เปรียบเทียบกับกรรมวิธีที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยสังกะสี และการฉีดพ่นธาตุสังกะสีทางใบในระดับ 0.18-0.35 กิโลกรัมสังกะสีต่อไร่ ให้ผลผลิตใกล้เคียงกับการใส่ปุ๋ยทางดินที่ 1.8 กิโลกรัมสังกะสีต่อไร่ และผลการทดลองของ Yin et al. (2016) ซึ่งให้เห็นว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินมีประสิทธิภาพต่อการเพิ่มผลผลิตข้าวมากกว่าการฉีดพ่นทางใบ แต่ปริมาณของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวมีแนวโน้มมาจากวิธีการใส่ปุ๋ยทางดินร่วมกับฉีดพ่นทางใบ > การฉีดพ่นทางใบ > การใส่ปุ๋ยทางดิน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Phattarakul et al. (2012) ที่รายงานว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีส่งผลต่อผลผลิตของข้าว ซึ่งผลผลิตเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 โดยเฉลี่ยในทุกการทดลอง และการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดมาจากการใส่ปุ๋ยสังกะสีฉีดพ่นทางใบ โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องเพิ่มขึ้นร้อยละ 32, 25 และ 2 จากการใส่ปุ๋ยสังกะสีทางดินร่วมกับฉีดพ่นทางใบ การฉีดพ่นทางใบ และการใส่ปุ๋ยทางดิน ตามลำดับ และแม้ว่าการใส่ปุ๋ยสังกะสีรองพื้นอาจมีผลตกค้าง แต่ในดินบางแห่งธาตุสังกะสีถูกตรึงไว้ในดิน พืชจึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นในบางกรณีการใส่ปุ๋ยทางใบจึงเป็นวิธีที่

ดีกว่าในการปรับปรุงความเป็นประโยชน์ของสังกะสีให้กับพืช (Liu et al. 2016) ซึ่งสาเหตุส่วนหนึ่งของความแตกต่างของการเจริญเติบโต ปริมาณผลผลิต และธาตุอาหารในพืช มาจากการจัดการเพาะปลูกที่เหมาะสมกับลักษณะพืช โดยเป็นวิธีการหนึ่งที่สำคัญที่สามารถเพิ่มปริมาณธาตุอาหารแก่ต้นพืชและผลผลิตได้

2.8 บทบาทของไนโตรเจนต่อการสะสมสังกะสีในพืช

ไนโตรเจนมีบทบาทอย่างมากต่อกระบวนการเมตาบอลิซึมและการเจริญเติบโตของพืช มีผลต่อการขยายขนาดของใบ เพิ่มการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตตลอดจนเพิ่มปริมาณผลผลิต (Arnon 1972) ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของพืช โดยคิดเป็นร้อยละ 7 ของน้ำหนักแห้งพืช โดยเป็นส่วนประกอบขององค์ประกอบของเซลล์ เช่น กรดนิวคลีอิก กรดอะมิโน เอนไซม์ และรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง (Bungard et al. 1999) Ayoub et al. (1994) รายงานว่าการใช้ในโตรเจน เพียงเล็กน้อยสามารถเพิ่มผลผลิตและน้ำหนักเมล็ดข้าวได้ การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีแสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์เชิงบวกอย่างชัดเจนในการเพิ่มผลผลิตและปริมาณธาตุอาหารในข้าว โดยไนโตรเจนช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและเพิ่มการดูดซับธาตุของพืชได้ นอกจากนี้ธาตุสังกะสีสามารถเพิ่มการดูดซับธาตุอาหารอื่น ๆ และเพิ่มการดูดซับธาตุสังกะสีในภาวะที่ขาดธาตุสังกะสีได้ดีขึ้น ซึ่งผลการศึกษามากมายชี้ให้เห็นว่าไนโตรเจนส่งผลต่อการเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีในพืช พืชสามารถสังเคราะห์โปรตีนหลายชนิดเพิ่มขึ้น จากปริมาณไนโตรเจนในเนื้อเยื่อที่มากขึ้น อันเนื่องจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และมีรายงานทางสรีรวิทยาที่แสดงให้เห็นว่าสังกะสีส่งผลต่อการสังเคราะห์โปรตีน ความสมบูรณ์ของโครงสร้างและการทำงานของโปรตีนอย่างมีนัยสำคัญ (Cakmak 2000) งานวิจัยเดียวกันของ Cakmak et al. (2010) รายงานถึงปฏิสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างปริมาณธาตุสังกะสีและไนโตรเจนในเมล็ดในข้าวสาลี เนื่องจากในสถานะที่มีธาตุสังกะสีที่เพียงพอ โปรตีนในเมล็ดจะเป็นที่เก็บสะสมของธาตุสังกะสี และพบว่าความเข้มข้นของธาตุสังกะสีและธาตุเหล็กสามารถเพิ่มขึ้นได้จากการใช้ในโตรเจนที่เพิ่มขึ้น และการใช้ในโตรเจนร่วมกับสังกะสีส่งผลต่อความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดของข้าวสาลี

นอกจากนี้งานทดลองของ Hosseiny and Maftoun (2008) แสดงให้เห็นว่า การใช้ปุ๋ยสังกะสีสามารถเพิ่มความเข้มข้น และการดูดซับไนโตรเจนของรากข้าว รวมถึงรากมีการดูดซับไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพบปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับไนโตรเจนและสังกะสี เนื่องจากพบว่าในดินที่มีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนและสังกะสีร่วมกัน สามารถเพิ่มความเข้มข้นและการดูดซับทั้งสองธาตุได้มากขึ้น

นอกจากนี้พบว่าการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนสามารถเพิ่มปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวนาสวนได้ เนื่องจากไนโตรเจน (Singh and Singh 1981) ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช Shi et al. (2010) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณจุลธาตุในเมล็ดเป็นผลมาจากอัตราการใช้ใน ไโตรเจนที่เพิ่มขึ้น จนกว่าจะถึงระดับที่เป็นจุดวิกฤตที่เป็นพิษกับพืช และพบว่าในเนื้อเยื่อข้าวมีปริมาณ ไนโตรเจนมากขึ้นตามอัตราการใช้ธาตุสังกะสีที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานทดลองของ Khanda และ Dixit (1996) ใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในดินร่วนปนทรายที่มีสังกะสีในดิน 0.84 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในการปลูกข้าวนาสวนพบว่า ผลผลิตข้าวเพิ่มขึ้นตามอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ผลผลิตสูงสุดมาจากการใช้ใน ไโตรเจน 14.4 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในสภาพน้ำขังจะลดการสูญเสียไนโตรเจนและช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินมากขึ้น Broadbent และ Mikkelsen (1968) ระบุว่า การใช้ยูเรียหรือแอม โมเนียมเป็นปุ๋ยรองพื้นมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ในตรงเป็นปุ๋ยรองพื้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการดูดซึมไอออนบวกต่อไอออนลบ และส่งผลให้ค่า pH บริเวณ ไรโซสเฟียร์ลดลง ในสภาพน้ำขังไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะเพิ่มขึ้น จากการที่รากพืชปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนบริเวณ ไรโซสเฟียร์ และดูดซับแอม โมเนียมไอออน (NH_4^+) กลับสู่รากพืช ในกรณีที่เพาะปลูกสภาพแอโรบิกรากพืชจะดูดซึมไนโตรเจนในรูปไนเตรต (NO_3^-) โดยการปลดปล่อยไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บริเวณ ไรโซสเฟียร์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่า pH บริเวณ ไรโซสเฟียร์ที่เกิดจากการดูดใช้ใน ไโตรเจนของพืช จะส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของสังกะสีด้วย อย่างไรก็ตามดินที่มีค่า pH สูง ธาตุสังกะสีและไนโตรเจนจะรวมตัวในรูปของสารประกอบ $Zn-NH_3$ สามารถเพิ่มความสามารถในการละลายของสังกะสีได้โดยตรง (Lindsay 1972) แม้ว่าผลของการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนต่อกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพของสังกะสีต่อข้าวยังไม่ชัดเจนแต่การใช้ปุ๋ยไนโตรเจนช่วยเพิ่มการดูดซับธาตุสังกะสีด้านการพัฒนาของรากและการเจริญเติบโตของต้นข้าว (Giordano 1979) มากกว่าร้อยละ 50 ของข้าวที่ปลูกในโลกจะปลูกในดินที่ขาดแคลนสังกะสีหรือดินต่ำที่เกิดจากธรรมชาติ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในช่วงเวลาและอัตราที่เหมาะสมร่วมกับการใส่ปุ๋ยสังกะสีเพื่อปรับปรุงความเป็นประโยชน์ของสังกะสีในดินและเคลื่อนย้ายเข้าสู่เมล็ดข้าว (Mandal and Mandal 1986) ซึ่งจากผลการตรวจเอกสารทั้งหมดจะเห็นว่าความสมดุลของปริมาณ และการสะสมธาตุสังกะสีในข้าว มีอิทธิพลจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน และการตอบสนองที่แตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด ภายใต้อิทธิพลของการจัดการระบบการเพาะปลูก และสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยครั้งนี้ได้ทดลอง ณ แปลงทดลองพืชไร่ ศูนย์วิจัย สาธิตและฝึกอบรมการเกษตรแม่เหิยะ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ศึกษาระหว่างเดือน สิงหาคม – ธันวาคม 2559 วางแผนการทดลองแบบ 2x2x3 Factorial in Completely Randomized Design (CRD) จำนวน 3 ซ้ำ โดยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ดังนี้

ปัจจัยที่ 1 การจัดการปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจน โดยแบ่งการจัดการเป็น 3 แบบ (ตารางที่ 3.1)

ปัจจัยที่ 2 การจัดการสภาพการปลูกแบบขังน้ำและแบบไม่ขังน้ำ (สภาพแอโรบิก)

ปัจจัยที่ 3 พันธุ์ข้าวที่ปลูก จำนวน 2 พันธุ์ คือ ข้าวไร่ (พันธุ์กำหอม มช.) และข้าวนาสวน (พันธุ์ชัยนาท 1)

ตารางที่ 3.1 การจัดการปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนและสัญลักษณ์ของแต่ละกรรมวิธีการจัดการ

การจัดการปุ๋ย	สัญลักษณ์
ใส่ปุ๋ย N ในอัตรา 30 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ P ในอัตรา 30 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อไร่ K ในอัตรา 30 กิโลกรัมโพแทชต่อไร่ แต่ไม่ใส่ปุ๋ยสังกะสี	Adequate N
ใส่ปุ๋ย N ในอัตรา 30 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ P ในอัตรา 30 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อไร่ K ในอัตรา 30 กิโลกรัมโพแทชต่อไร่ และใส่ปุ๋ยสังกะสี ($ZnSO_4$) 8 กิโลกรัมต่อไร่	Adequate N+Zn
ใส่ปุ๋ย N ในอัตรา 60 กิโลกรัมไนโตรเจนต่อไร่ P ในอัตรา 30 กิโลกรัมฟอสเฟตต่อไร่ K ในอัตรา 30 กิโลกรัมโพแทชต่อไร่ และใส่ปุ๋ยสังกะสี ($ZnSO_4$) 8 กิโลกรัมต่อไร่	High N+Zn

ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนรูปยูเรีย (urea) ฟอสฟอรัสในรูปโซเดียมไดไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต (sodium dihydrogen orthophosphate) และโพแทสเซียมในรูปโพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride)

การปลูกข้าว

ทดลองในกระถางซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระถางคือ 80 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร บรรจุดินแห่งกระถางละ 160 กิโลกรัม โดยเก็บตัวอย่างดินก่อนการทดลองปลูกข้าว ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีดิน ดินที่ใช้ปลูกมีลักษณะดินร่วนปนทราย (sedimentation method) มีค่าปฏิกิริยาดินเป็นกรดปานกลางเท่ากับ 5.82 (ดิน:น้ำ, 1:1) ปริมาณอินทรียวัตถุร้อยละ 1.38 (Walkley-Black method) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 35.06 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Bray 2) โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 39.28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ($(\text{NH}_4\text{OAc}, \text{pH } 7)$ และสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Zn available, DTPA) 0.73 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำการเพาะเมล็ดข้าวทั้งสองพันธุ์เป็นเวลา 7 วัน ก่อนย้ายกล้าลงปลูกในกระถางปลูกกล้าข้าวทั้งสองพันธุ์จำนวนพันธุ์ละ 6 ต้น โดย 1 กระถาง มี 12 ต้น ระยะปลูก 25x25 เซนติเมตร (ปลูกแบบต้นเดี่ยว)

กรรมวิธีมีการจัดการน้ำ 2 แบบคือแบบขังน้ำและไม่ขังน้ำ ในกรรมวิธีที่ขังน้ำ เริ่มขังน้ำในกระถางตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนถึงระยะสุกแก่ โดยรักษาระดับน้ำให้อยู่ในระดับต่ำกว่าขอบกระถาง 2.5 เซนติเมตร ในสภาพไม่ขังน้ำหรือเอโรบิกรักษาความชื้นในดินโดยมีการให้น้ำวันละ 2 ครั้งเช้าและเย็นต่อวัน โดยรักษาระดับความชื้นดินให้อยู่ในระดับความจุความชื้นสนามจนกระทั่งถึงระยะเก็บเกี่ยว แต่ละกรรมวิธีแบ่งใส่ปุ๋ย 3 ครั้ง ครั้งละเท่า ๆ กัน ครั้งแรกใส่ระยะแตกกอ ครั้งที่สองใส่ระยะกำเนิดช่อดอก และครั้งที่สามใส่ระยะออกดอก

การบันทึกข้อมูล

ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต

เก็บบันทึกข้อมูลองค์ประกอบผลผลิต ได้แก่

1. จำนวนหน่อตอก
2. จำนวนรวงตอก
3. จำนวนเมล็ดลีบต่อรวง
4. จำนวนเมล็ดดีต่อรวง
5. น้ำหนัก 1,000 เมล็ด

ตัวอย่างพืช

เก็บตัวอย่างพืช เพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุสังกะสีและวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด จำนวน 4 ระยะได้แก่

1. ระยะแตกกอ
2. ระยะกำเนิดช่อดอก
3. ระยะ 15 วันหลังออกดอก (day after flowering, DAF)
4. ระยะสุกแก่

โดยแยกส่วนของลำต้น ใบ ใบอ่อนสุดที่แผ่ขยายเต็มที่ (youngest emerged leaf blade) ใบธง และ เมล็ด ในส่วนของเมล็ด แกะตัวอย่างเมล็ดข้าวเพื่อแยกส่วนของเปลือกและข้าวกล้อง เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสังกะสี จากนั้นนำแต่ละส่วนของแต่ละพันธุ์ ไปอบลดความชื้นที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ประมาณ 72 ชั่วโมง จากนั้นชั่งน้ำหนักแห้งพร้อมบันทึกข้อมูล ในส่วนของเมล็ดข้าวที่เป็นผลผลิตนำมา ผึ่งแดดลดเพื่อความชื้นให้เหลือร้อยละ 14 ชั่งน้ำหนักแห้งพร้อมบันทึกข้อมูล

การวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี

วิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุสังกะสีที่สะสมในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยวิธีการ dry Ashing เผาตัวอย่างโดยใช้อุณหภูมิ 535 องศาเซลเซียส นาน 8 ชั่วโมง และนำสารละลายตัวอย่างมาอ่านค่าด้วย เครื่อง atomic absorption spectrophotometer (AA) เปรียบเทียบความเข้มข้นจากสารละลายมาตรฐานของสังกะสี (Delhaize et al. 1984)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

วิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นไนโตรเจน (total Kjeldahl nitrogen) ในส่วนต่าง ๆ ของพืช โดยการย่อยตัวอย่าง (digestion) ใน Kjeldahl digestion apparatus จากนั้นกลั่น (distillation) และไทเทรตเพื่อหาปริมาณไนโตรเจน (titration) (Bremner 1965)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละกรรมวิธี โดยหาค่า LSD (least significant difference) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 หาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละคู่โดยวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (coefficient of correlation)

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance) พบว่าพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และน้ำ มีอิทธิพลต่อผลผลิต คชนี้การเก็บเกี่ยวและองค์ประกอบผลผลิตแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ไม่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมของทั้ง 3 ปัจจัย ในขณะที่พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการน้ำ มีผลต่อผลผลิตเมล็ด น้ำหนักแห้งฟาง คชนี้การเก็บเกี่ยว จำนวนหน่อต่อกอ จำนวนรวงต่อกอ และน้ำหนัก 1,000 เมล็ด พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการปุ๋ย มีผลต่อผลผลิตเมล็ด และน้ำหนัก 1,000 เมล็ด และพบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยและการจัดการน้ำ มีผลต่อจำนวนรวงต่อกอ และเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี (ตารางที่ 4.1)

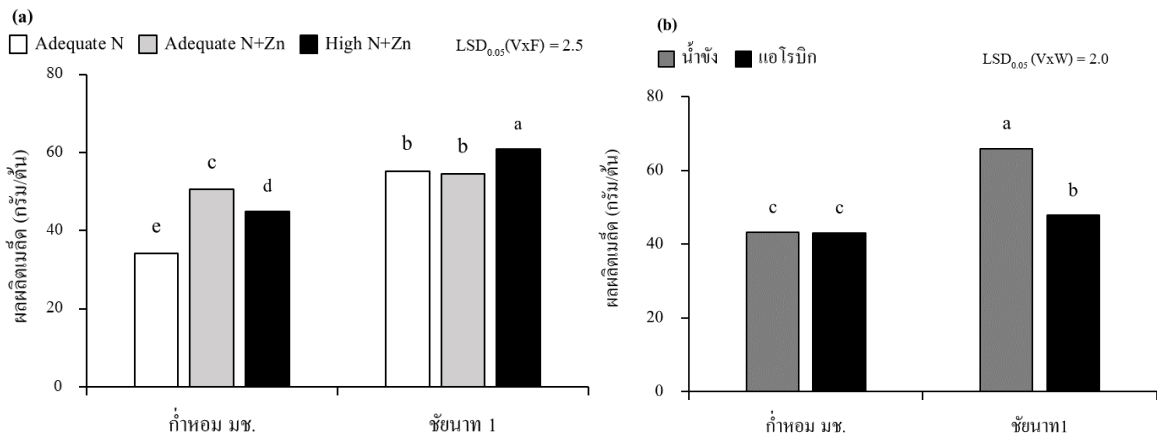
ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลผลิต คชนี้การเก็บเกี่ยว องค์ประกอบผลผลิตในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และพันธุ์ชยันนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน

แหล่งความแปรปรวน	ผลผลิต	น้ำหนักแห้งฟาง	คชนี้การเก็บเกี่ยว	องค์ประกอบผลผลิต			
				จำนวนหน่อต่อต้น	จำนวนรวงต่อต้น	เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี	น้ำหนัก 1,000 เมล็ด
พันธุ์ (V)	**	**	ns	**	**	**	**
การจัดการปุ๋ย (F)	**	**	**	**	*	ns	**
สภาพการปลูก (W)	**	*	ns	**	**	ns	ns
V x W	**	**	**	**	**	ns	**
V x F	**	ns	ns	ns	ns	ns	**
W x F	ns	ns	ns	ns	*	**	ns
V x W x F	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ, * แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$), ** แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$)

4.1 ผลผลิตเมล็ด

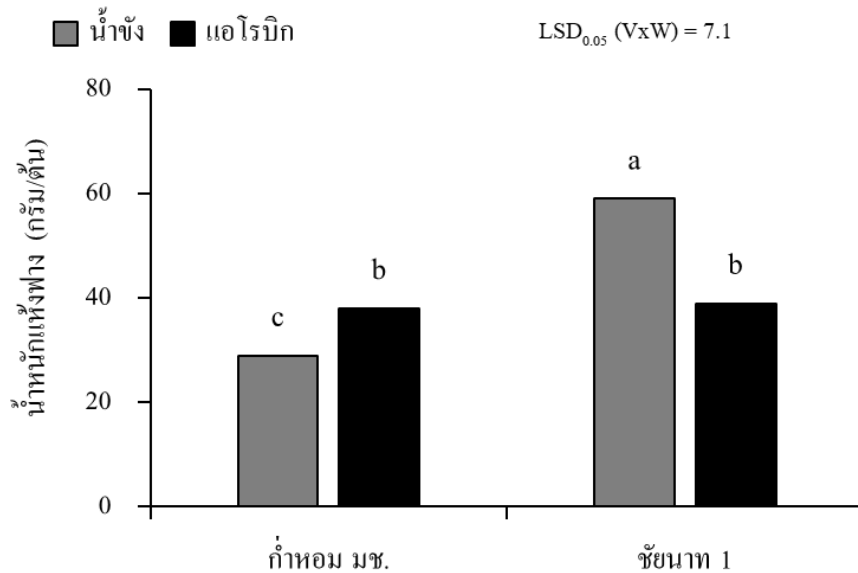
พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการปุ๋ย มีผลต่อผลผลิตเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.1 a) โดยพบว่าพันธุ์ชยันนาท 1 ให้ผลผลิตมากกว่าพันธุ์กำหอม มข. ในการจัดการปุ๋ยทุกกรรมวิธี ซึ่งพันธุ์ชยันนาท 1 เมื่อใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี (High N+Zn) ให้ผลผลิตมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว (Adequate N) ร้อยละ 10 การใส่ปุ๋ยในโตรเจนในอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวและการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี (Adequate N+Zn) มีผลผลิตไม่แตกต่างกัน สำหรับพันธุ์กำหอม มข. พบว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ผลผลิตมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 48 และ 32 ตามลำดับ ในขณะที่พบว่าพันธุ์ชยันนาท 1 ในสภาพแอโรบิกผลผลิตลดลงจากสภาพน้ำขังร้อยละ 28 ขณะที่ไม่พบความแตกต่างระหว่างการปลูกในน้ำขังและแอโรบิก ของพันธุ์กำหอม มข. (ภาพที่ 4.1 b)



ภาพที่ 4.1 ผลผลิตเมล็ด ในข้าวพันธุ์กำหอม มข. และชยันนาท 1 ที่ปลูกภายใต้การจัดการปุ๋ย (a) และการจัดการน้ำ (b) แตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.2 น้ำหนักแห้งฟาง

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว และการจัดการน้ำ ต่อน้ำหนักฟางอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.2) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกแบบแอโรบิกมีน้ำหนักแห้งฟางลดลงร้อยละ 34 เมื่อเทียบกับการปลูกในสภาพน้ำขัง และพันธุ์กำหอม มช. เมื่อนำมาปลูกในสภาพน้ำขัง มีน้ำหนักแห้งฟางลดลงร้อยละ 28 เมื่อเทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก

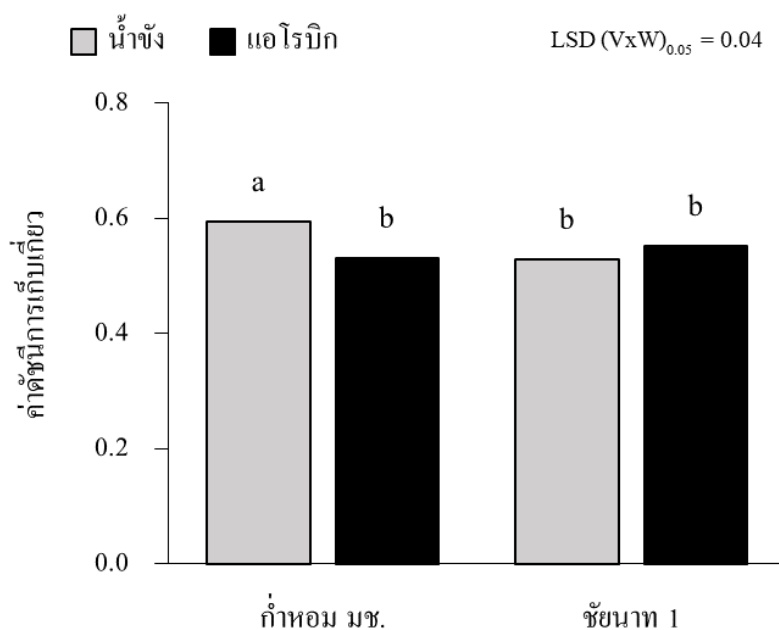


ภาพที่ 4.2 น้ำหนักแห้งฟางในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

4.3 ดัชนีการเก็บเกี่ยว

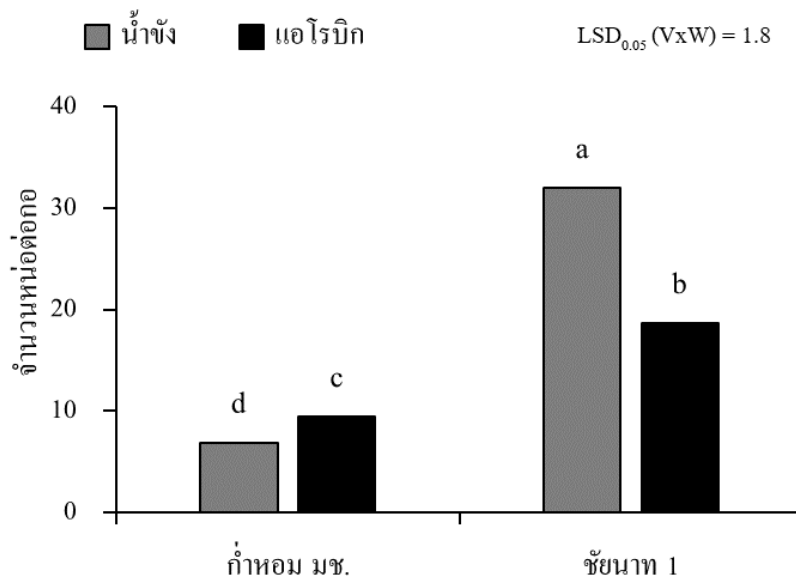
พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว และการจัดการน้ำต่อดัชนีการเก็บเกี่ยวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.3) โดยพันธุ์กำหอม มช. ที่ปลูกแบบน้ำขังมีดัชนีการเก็บเกี่ยวมากกว่าการปลูกแบบแอโรบิก ร้อยละ 12 ขณะที่ไม่พบความแตกต่างระหว่างการปลูกในน้ำขังและแอโรบิกของพันธุ์ชัยนาท 1



ภาพที่ 4.3 ดัชนีการเก็บเกี่ยวในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และ ชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

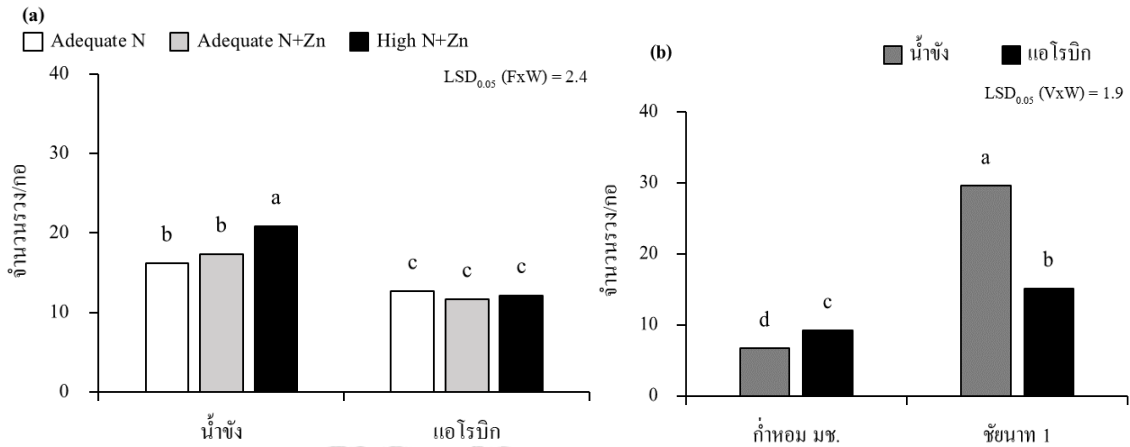
4.4 องค์ประกอบผลผลิต

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการน้ำต่อจำนวนหน่อต่อกออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.4.1) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ให้จำนวนหน่อต่อกอมากกว่าพันธุ์กำหอม มช. ในการจัดการน้ำ ทั้ง 2 สภาพ เมื่อปลูกพันธุ์ชัยนาท 1 ในสภาพแอโรบิกจำนวนหน่อต่อกอลดลง 13 หน่อ เมื่อเทียบกับการปลูกในน้ำขัง ขณะที่พันธุ์กำหอม มช. ที่ปลูกในสภาพน้ำขัง ให้จำนวนหน่อต่อกอลดลง 2 หน่อ เมื่อเทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก



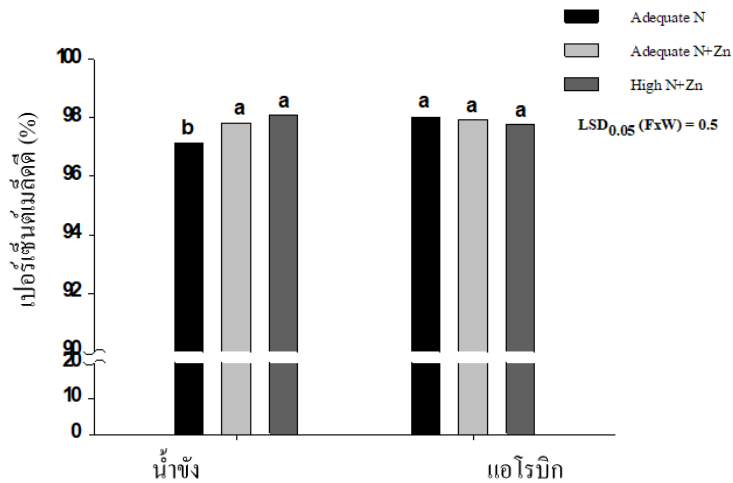
ภาพที่ 4.4.1 จำนวนหน่อต่อกอในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และ ชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการน้ำต่อจำนวนรวงต่อกอ โดยพันธุ์กำหอม มช. ที่ปลูกแบบน้ำขังมีจำนวนรวงลดลง 2 รวง เทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก ขณะที่พันธุ์ชัยนาท 1 ที่ปลูกแบบแอโรบิกให้จำนวนรวงลดลง 15 รวง เทียบกับการปลูกในน้ำขัง (ภาพที่ 4.4.2 a) และพบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำมีผลต่อจำนวนรวงต่อกออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.4.2 b) โดยการใส่ปุ๋ยในโตรเจนในอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในสภาพน้ำขัง มีจำนวนรวงต่อกอเพิ่มขึ้น 5 รวง และ 4 รวง เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว และปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ตามลำดับ แต่ไม่พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยในการปลูกแบบแอโรบิก



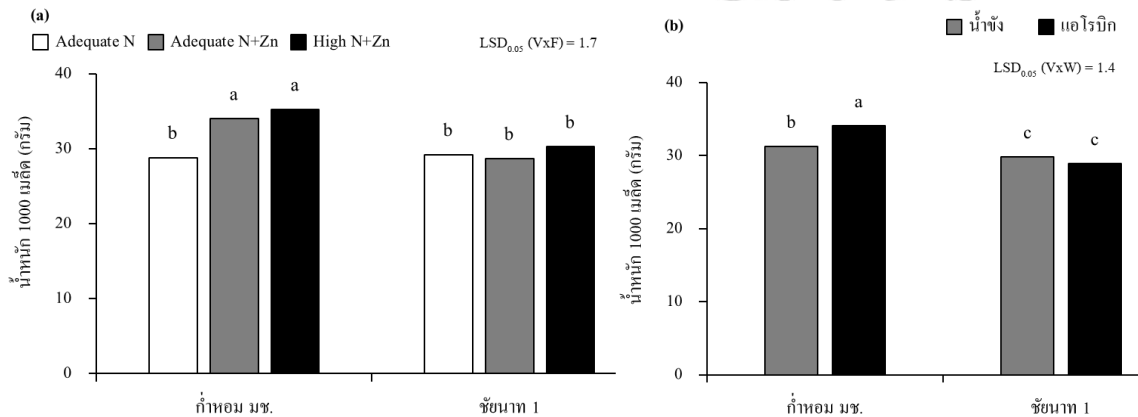
ภาพที่ 4.4.2 จำนวนรวงต่อกอในการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน (a) และ จำนวนรวงต่อกอ ในข้าวพันธุ์กำหอม มข.และชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการน้ำแตกต่างกัน (b) (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ยและการจัดการน้ำต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดดี (ภาพที่ 4.4.3) โดยการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 1 ในการจัดการแบบน้ำขังแต่ไม่พบความแตกต่างในการจัดการแบบแอโรบิก



ภาพที่ 4.4.3 เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีในข้าวที่ปลูกในการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

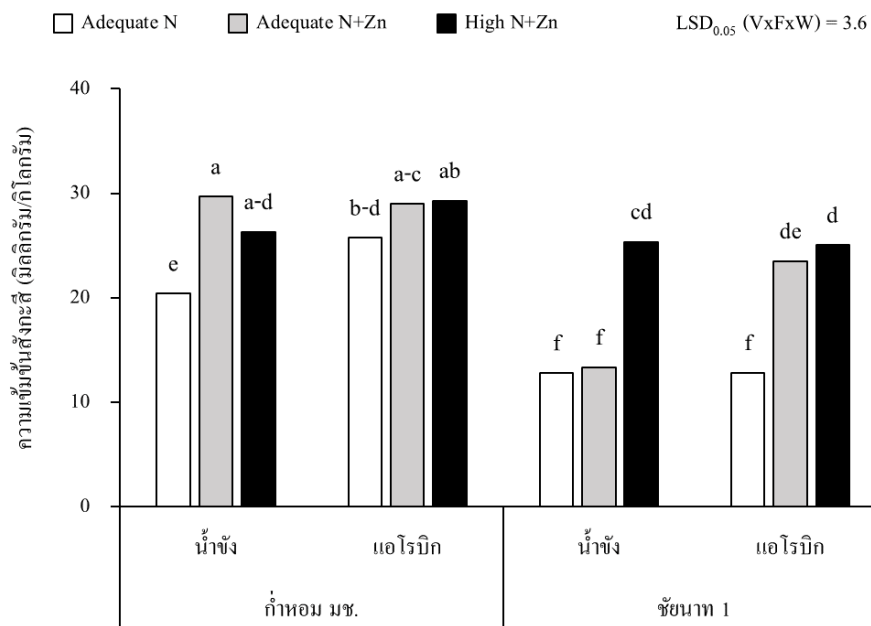
พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการปุ๋ยต่อน้ำหนัก 1,000 เมล็ด โดยพันธุ์กำหอม มช. เมื่อใส่ปุ๋ยใน โตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยใน โตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้น้ำหนักเมล็ดมากกว่าการใส่ปุ๋ยใน โตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 17 และ 21 ตามลำดับ ในขณะที่การใส่ปุ๋ยใน โตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยใน โตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.4.4 a) แต่ไม่พบความแตกต่างของการจัดการปุ๋ยในพันธุ์ชัยนาท 1 และพบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการน้ำต่อน้ำหนัก 1,000 เมล็ด โดยพันธุ์กำหอม มช. เมื่อปลูกแบบน้ำขัง มีน้ำหนัก 1,000 เมล็ดลดลงร้อยละ 9 เทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก แต่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของการจัดการน้ำในพันธุ์ชัยนาท 1 ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.4.4 b)



ภาพที่ 4.4.4 น้ำหนัก 1,000 เมล็ด ในข้าวพันธุ์กำหอม มช. และ ชัยนาท 1 ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย (a) และการจัดการน้ำ แตกต่างกัน (b) (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.5 ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง

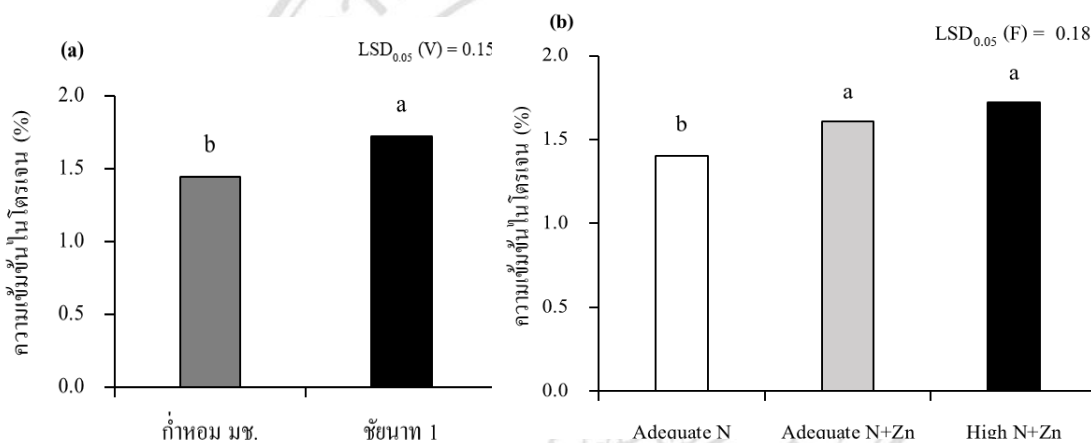
พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ยและการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.5) โดยพันธุ์กำหอม มช. ที่ปลูกแบบน้ำขังและใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร้อยละ 46 และ 29 ตามลำดับ ขณะที่การปลูกแบบแอโรบิก เมื่อใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ พบพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี แบบน้ำขัง ให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงร้อยละ 98 ขณะที่การปลูกแบบแอโรบิก การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีมีความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยมีความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 84 และ 95 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง 2 พันธุ์ (กำหอม มช. และชัยนาท 1) ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.6 ความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้อง

พบอิทธิพลของพันธุ์ข้าวต่อความเข้มข้นไนโตรเจนของเมล็ดข้าวกล้องอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.6 a) โดยพันธุ์ชัชนาท 1 มีความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าพันธุ์กำหอม มช. ร้อยละ 16 และพบอิทธิพลของการจัดการปุ๋ยต่อความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้อง โดยการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี (ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ $P < 0.05$) (ภาพที่ 4.6 b) ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียง ร้อยละ 15 และ 23 ตามลำดับ

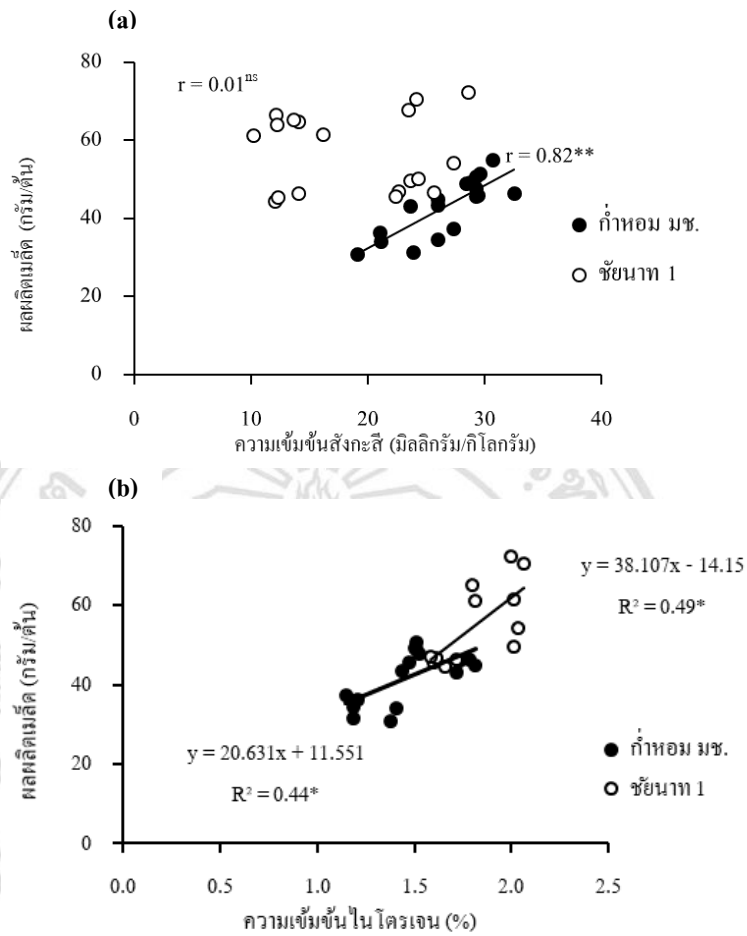


ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องที่เกิดจากพันธุ์ข้าว (a) และการจัดการปุ๋ย (b) ต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นธาตุสังกะสี และไนโตรเจน ในเมล็ดและผลผลิต

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องและผลผลิตเมล็ด ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ที่ปลูกภายใต้การจัดการแบบน้ำขังและแอโรบิก พบความสัมพันธ์เชิงบวกในพันธุ์กำหอม มช. ($r = 0.82^{**}$) โดยผลผลิตเมล็ดเพิ่มตามความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ด แต่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในพันธุ์ชัชนาท 1 (ภาพที่ 4.7 a)

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องและผลผลิตเมล็ด ในพันธุ์ชัชนาท 1 และพันธุ์กำหอม มช. (ภาพที่ 4.8 b)

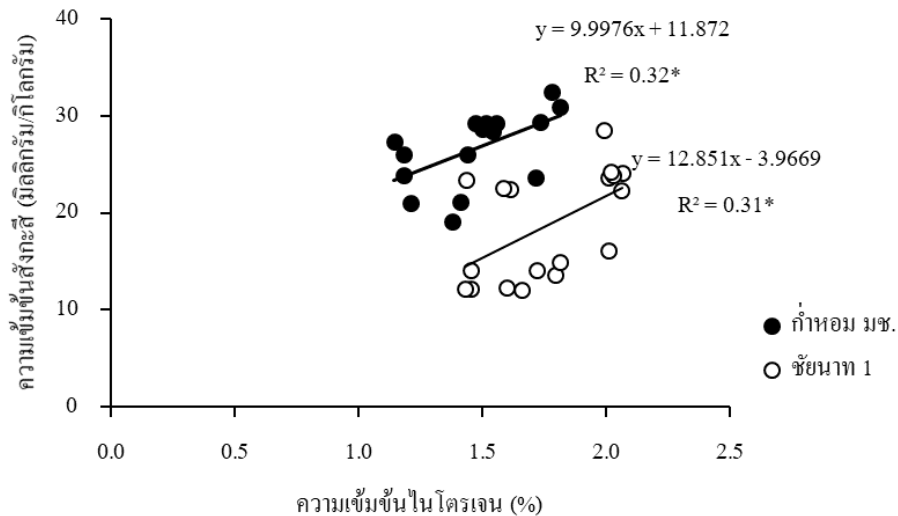


ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องกับความผลิิตเมล็ดของข้าว 2 พันธุ์ (กำหม่อม มช. และชัยนาท 1) (a) ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องกับความผลิิตเมล็ด (b) *แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$), **แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นธาตุไนโตรเจนและสังกะสีในเมล็ด

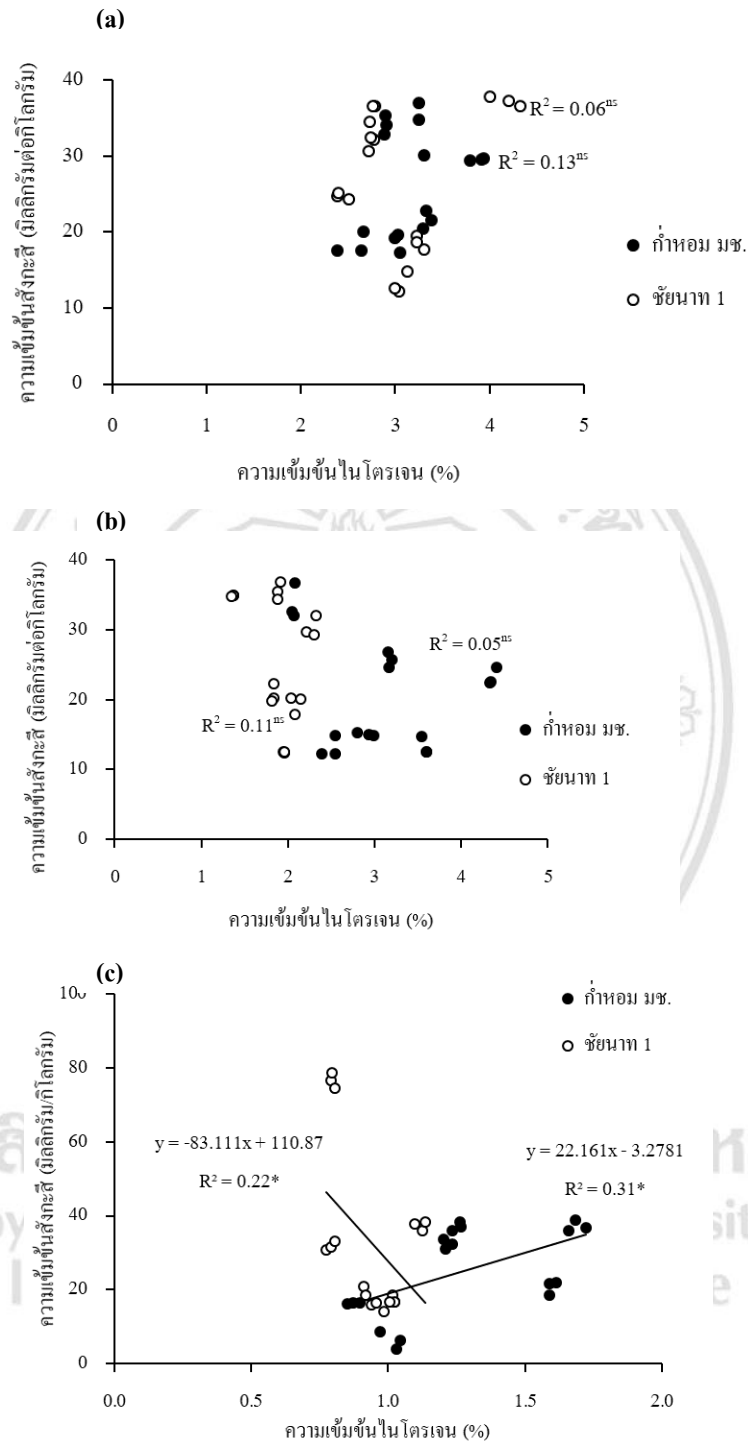
ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง พบความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นไนโตรเจนทั้งในพันธุ์ชัชนาท 1 และพันธุ์กำหอม มช. (ภาพที่ 4.8)



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องในพันธุ์กำหอม มช. และพันธุ์ชัชนาท 1 * แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

4.9 ความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในส่วนของใบธงที่ระยะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในใบธง ของข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ที่ปลูกภายใต้การจัดการแบบน้ำขังและแอโรบิก ในระยะตั้งท้อง (ภาพที่ 4.9 a) และระยะ 15 วันหลังออกดอก (ภาพที่ 4.9 b) ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวทั้งในพันธุ์กำหอม มช. และพันธุ์ชัชนาท 1 และพบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในส่วนของใบธง โดยพันธุ์ชัชนาท 1 มีความเข้มข้นสังกะสีลดลงตามความเข้มข้นไนโตรเจน ขณะที่พันธุ์กำหอม มช. พบความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นไนโตรเจนในระยะสุกแก่ (ภาพที่ 4.9 c)



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในใบของข้าว 2 พันธุ์ (กำหอม มช. และชัยนาท 1) ที่ระยะตั้งท้อง (a) ระยะ 15 วันหลังออกดอก (b) และในระยะสุกแก่ (c) ns ไม่แตกต่างทางสถิติ, * แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในแต่ละส่วนของข้าว ในระยะสุกแก่

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (correlation analysis) ของความเข้มข้นสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของข้าวในระยะสุกแก่ มีความสัมพันธ์แตกต่างกันในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.2) โดยพันธุ์กำหอม มช. พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นสังกะสีของเมล็ดข้าวกล้องและใบธง ($r = 0.56^*$) เมล็ดข้าวกล้องและลำต้น ($r = 0.61^{**}$) ใบธงและใบ ($r = 0.63^{**}$) ใบธงและลำต้น ($r = 0.52^*$) และในใบและลำต้น ($r = 0.77^{**}$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ลักษณะดังกล่าวของส่วนเมล็ดข้าวกล้องและใบ ขณะที่พันธุ์ชัณนาท 1 พบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นสังกะสีของเมล็ดข้าวกล้องและใบธง ($r = 0.74^{**}$) และเมล็ดข้าวกล้องและลำต้น ($r = 0.61^{**}$) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ลักษณะดังกล่าวของส่วนเมล็ดข้าวกล้องและใบ ใบธงและใบ ใบธงและลำต้น และใบและลำต้น

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสังกะสีในแต่ละส่วนของข้าว (ลำต้น ใบ ใบธง และเมล็ดข้าวกล้อง) ของข้าว 2 พันธุ์ ในระยะสุกแก่

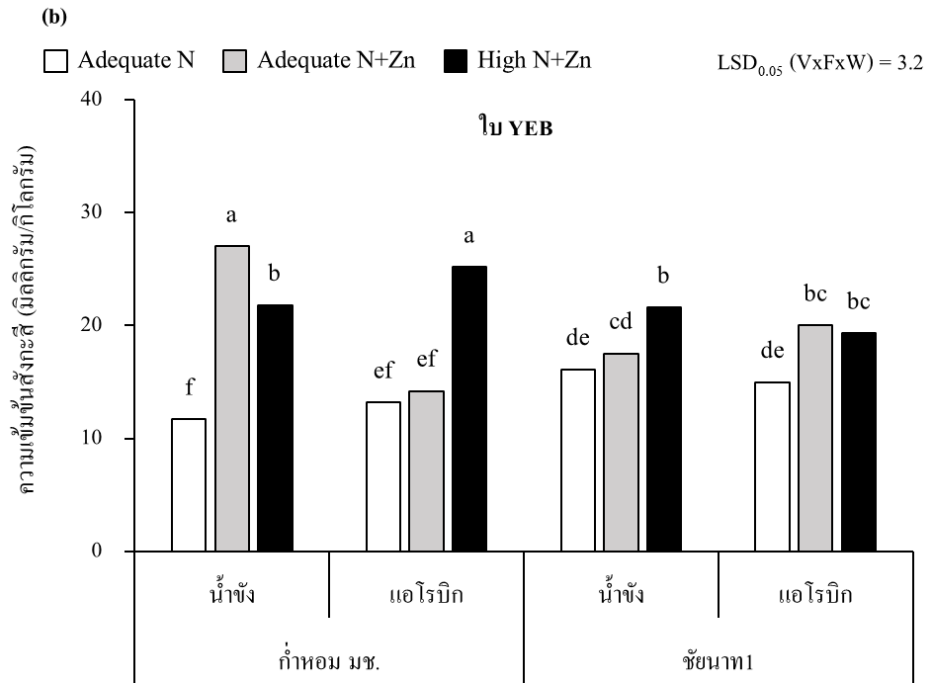
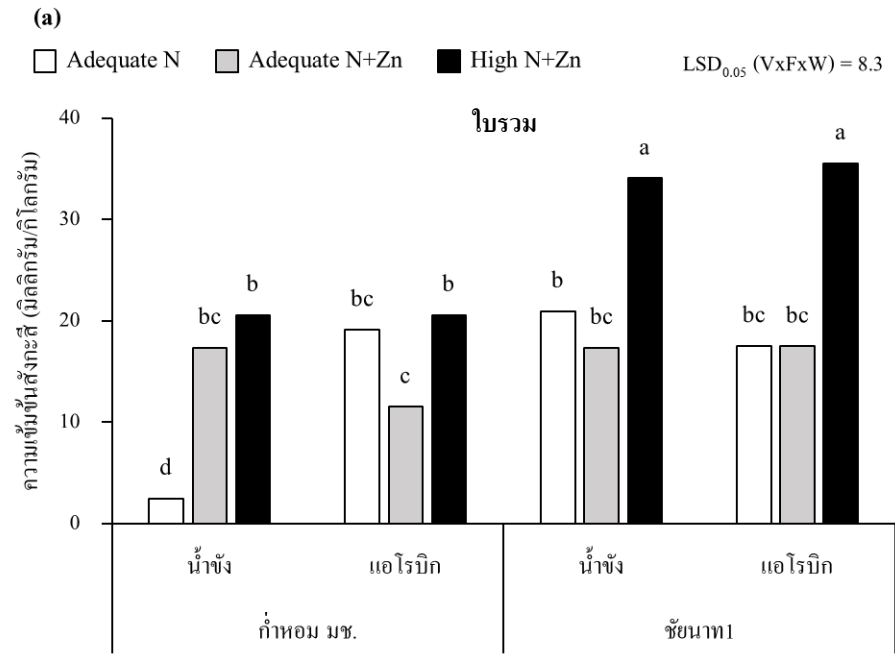
พันธุ์	ส่วนของพืช	เมล็ดข้าวกล้อง	ใบธง	ใบ
กำหอม มช.	ใบธง	0.56*		
	ใบ	0.47 ^{ns}	0.63**	
	ลำต้น	0.61**	0.52*	0.77**
ชัณนาท 1	ใบธง	0.74**		
	ใบ	0.38 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	
	ลำต้น	0.61**	0.39 ^{ns}	-0.05 ^{ns}

ns ไม่แตกต่างทางสถิติ, * แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$), **แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$)

4.11 ความเข้มข้นสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่ระยะแตกกอ (Tillering stage)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.10 a) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ทั้ง 2 สภาพการจัดการน้ำมีความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าพันธุ์กำแพงแสน มข. ในการจัดการปุ๋ยทุกกรรมวิธี ซึ่งพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี มีความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 96 สำหรับการปลูกแบบน้ำขังและร้อยละ 103 สำหรับการปลูกแบบแอโรบิก ในขณะที่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวและปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) และพันธุ์กำแพงแสน มข. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีและปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 7 เท่า และ 8.2 เท่า ตามลำดับ แต่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบ YEB อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.10 b) โดยพันธุ์กำแพงแสน มข. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ทั้ง 2 สภาพการจัดการน้ำให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 ในการจัดการปุ๋ยทุกกรรมวิธี ซึ่งพันธุ์กำแพงแสน มข. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.3 เท่า และ 1.9 เท่าตามลำดับ เมื่อใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี สำหรับการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 91 ทั้งนี้การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี สำหรับการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกับการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ส่วนพันธุ์ชัยนาท 1 พบการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ที่ปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียง ร้อยละ 34 ขณะที่การปลูกแบบแอโรบิก การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกันทางสถิติ



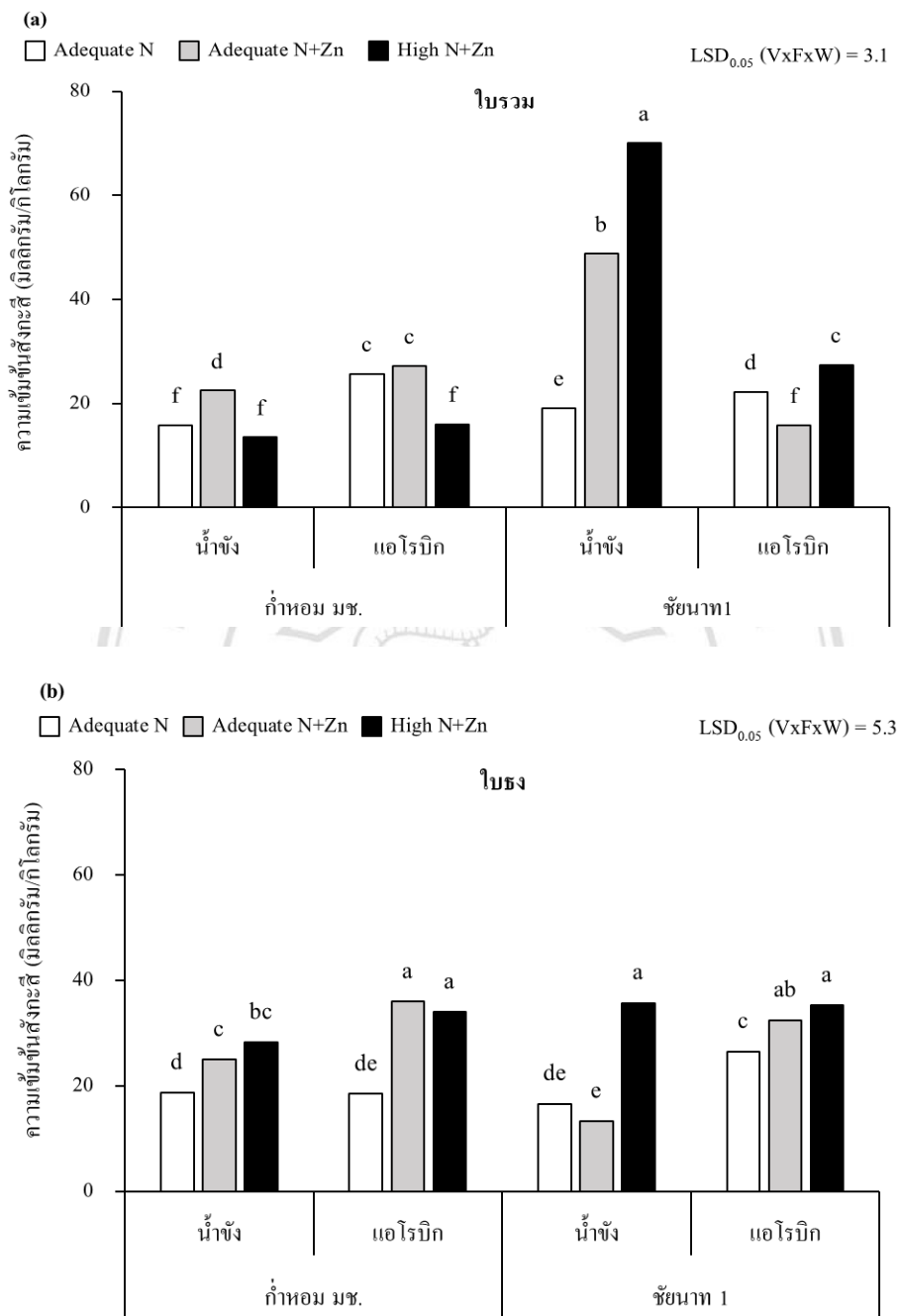
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม (a) และใบ YEB (b) ที่ระยะแตกกอ ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.12 ความเข้มข้นสังกะสีในส่วนต่างๆของต้นข้าวที่ระยะตั้งท้อง (Booting stage)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.11 a) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 3.7 เท่า แต่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ที่ปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีในใบลดลง ร้อยละ 29 เมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ส่วนพันธุ์กำหอม มข. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 42 แต่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีน้อยกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 15 ขณะที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีน้อยกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 38 และเมื่อใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกับการใส่ ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบธงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.11 b) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียง 2.2 เท่า แต่พบว่าการปลูกแบบแอโรบิกการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีในใบธงไม่แตกต่างกัน ส่วนพันธุ์กำหอม มข. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกันทางสถิติ ทั้งการปลูกแบบขังน้ำและแอโรบิก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

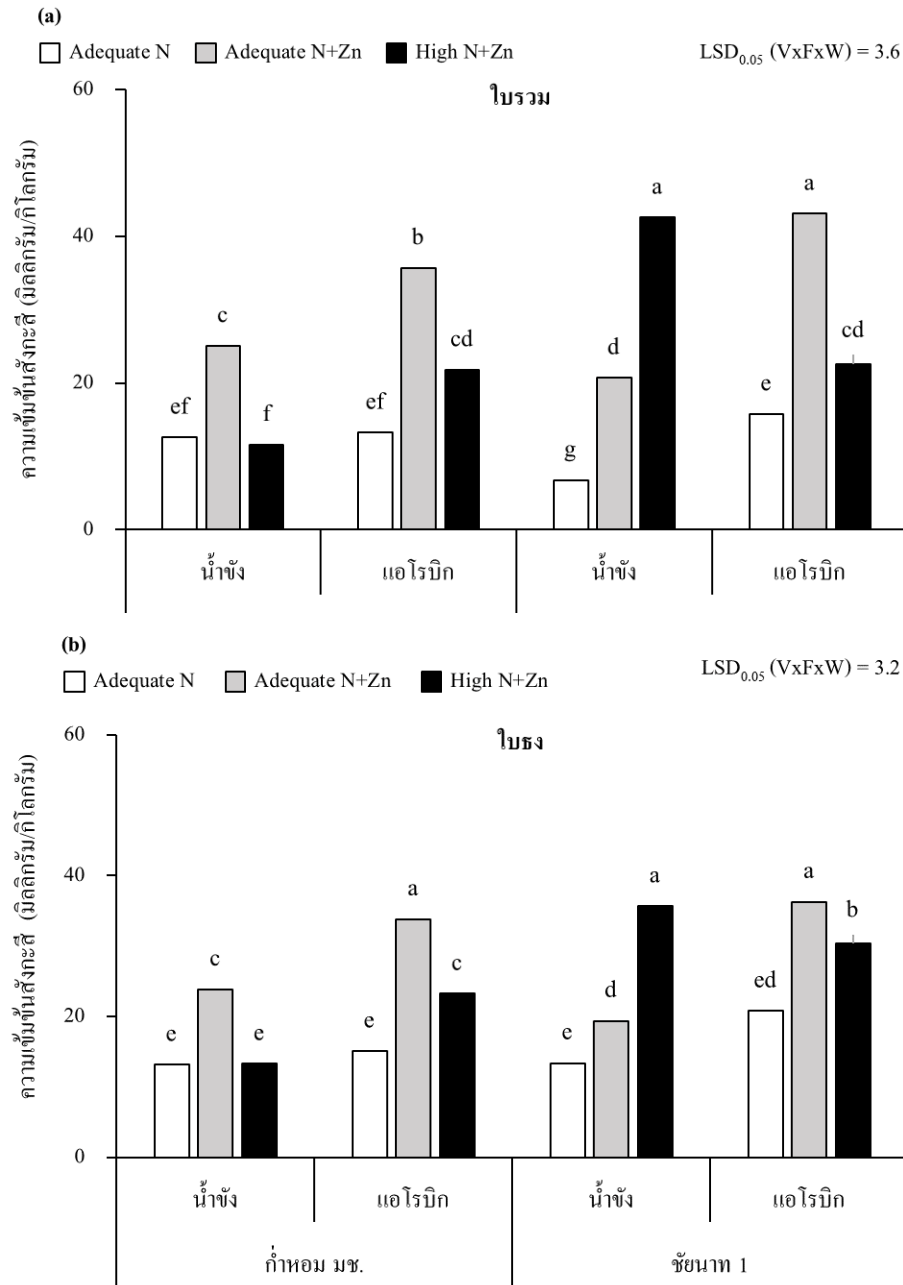


ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นสังกะสีในโดยรวม (a) และใบรง (b) ที่ระยะตั้งท้อง ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.13 ความเข้มข้นสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่ระยะ 15 วันหลังออกดอก (15 DAF)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.12 a) โดยพันธุ์ชยันนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวมมากกว่าการใส่ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 6.3 เท่า ขณะที่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.7 เท่า ส่วนพันธุ์กำหอม มช. พบการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขัง ให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียง ร้อยละ 99 และการใส่ปุ๋ย ในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.7 เท่า

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบธงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.12 b) โดยพันธุ์ชยันนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.7 เท่า ขณะที่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่า ในโตรเจนอัตราพอเพียง ร้อยละ 75 และพบพันธุ์กำหอม มช. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.3 เท่า ในการปลูกแบบแอโรบิก และร้อยละ 82 ในการปลูกแบบน้ำขัง



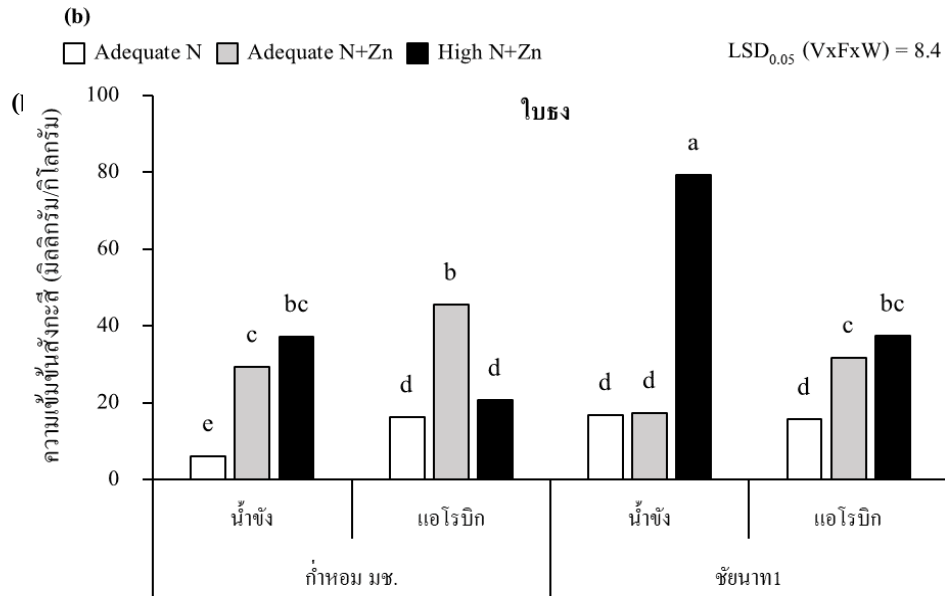
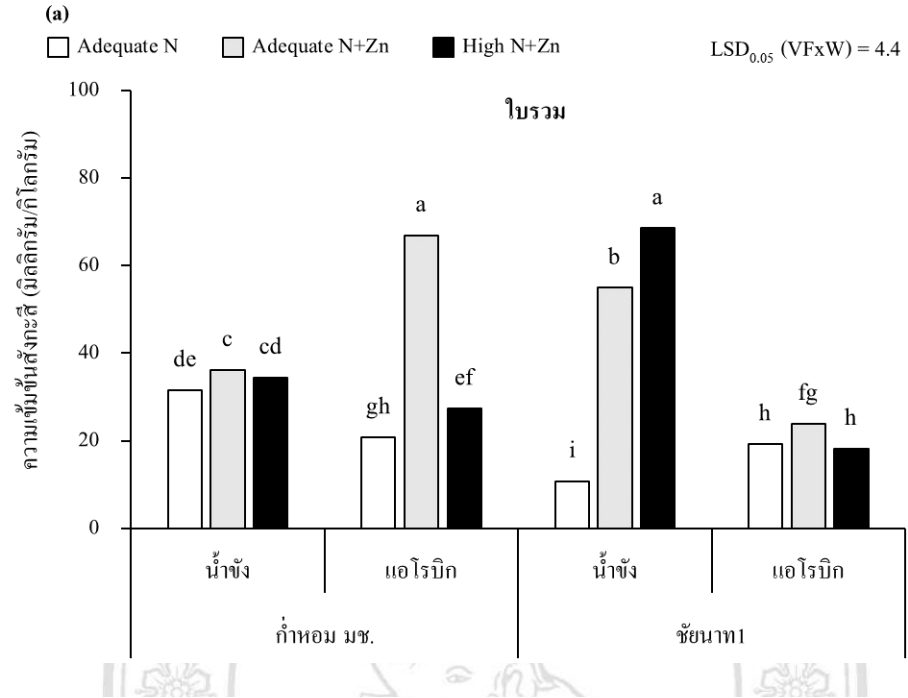
ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวม (a) และใบธง (b) ที่ระยะ 15 วันหลังออกดอก ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

4.14 ความเข้มข้นสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่ระยะสุกแก่ (Maturity stage)

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.13 a) โดยพันธุ์ชยันนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีในใบรวมมากกว่าในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 6.3 เท่า และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นมากกว่าในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 5.1 เท่า ส่วนพันธุ์กำหอม มช. ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 3.2 เท่า แต่ไม่พบความแตกต่างทางสถิติของการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวและในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีในการปลูกแบบน้ำขัง

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบธงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.13 b) โดยพันธุ์ชยันนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีในการปลูกแบบน้ำขัง ให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าในโตรเจนอัตราพอเพียง 4.7 เท่า (ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ($P < 0.05$) ของการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียง และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี) ขณะที่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในปลูกแบบแอโรบิกไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อความเข้มข้นสังกะสีของใบธง ส่วนพันธุ์กำหอม มช. ที่มีการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่า ในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.8 เท่า และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นสังกะสีมากกว่าการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียง 6.1 เท่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นสังกะสีในไบรรม (a) และไบรง (b) ที่ระยะสุกแก่ ในข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

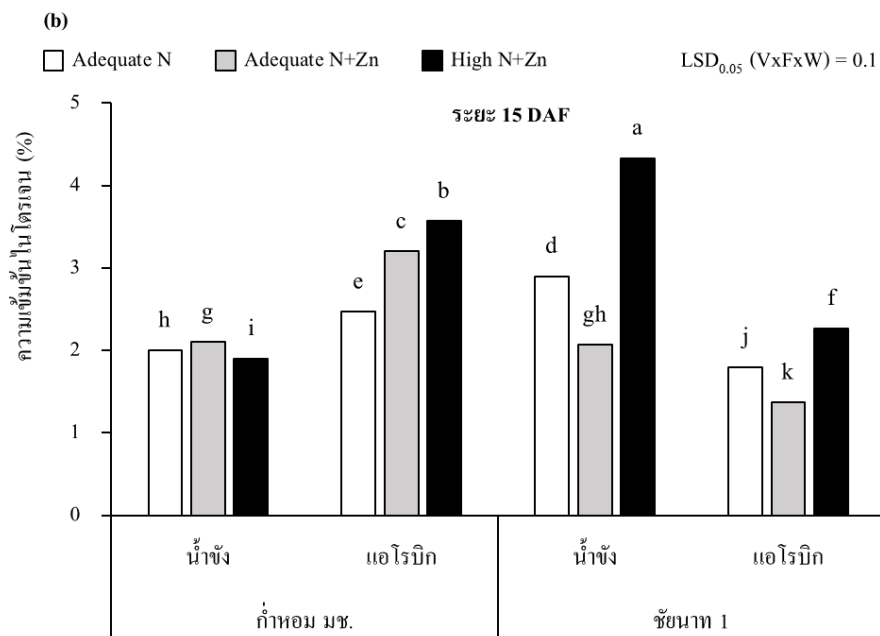
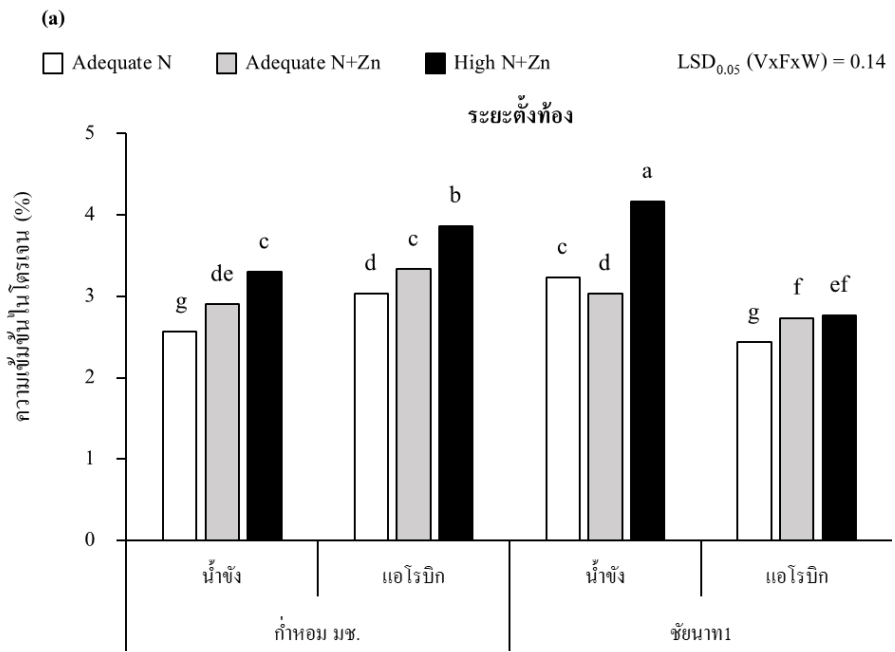
4.15 ความเข้มข้นของธาตุไนโตรเจนในใบธงที่ระยะการเจริญแตกต่างกัน

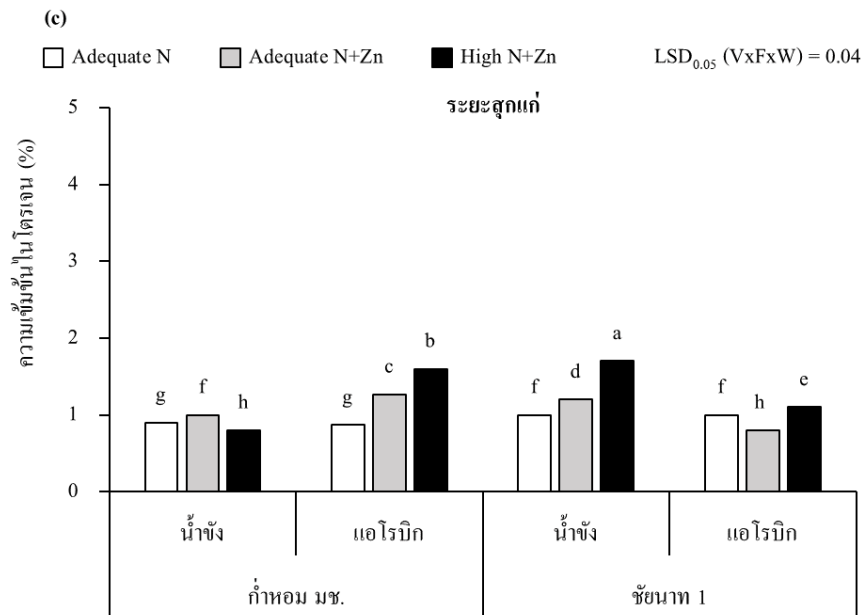
พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นไนโตรเจนของใบธง ในระยะตั้งท้อง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.14 a) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 6 ขณะที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 31 และเมื่อปลูกแบบแอร์โรบิก การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ส่วนพันธุ์กำหอม มข. พบการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 27 ในการปลูกแบบน้ำขัง และร้อยละ 30 ในการปลูกแบบแอร์โรบิก

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นไนโตรเจนของใบธง ในระยะ 15 วันหลังออกดอก อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.14 b) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 28 ขณะที่การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 48 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 24 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 26 ส่วนพันธุ์กำหอม มข. ที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอร์โรบิกให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 46 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 28 แต่การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวเล็กน้อยร้อยละ 5 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 5

พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำ ต่อความเข้มข้นไนโตรเจนของใบธง ในระยะสุกแก่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.14 c) โดยพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 20 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ใ้

ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 70 ส่วนในการปลูกแบบ
 แอโรบิก การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจน
 อัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 20 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้น
 ไนโตรเจนมากกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 10 ส่วนพันธุ์กำหอม มข. ที่ใส่ปุ๋ย
 ไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ในการปลูกแบบแอโรบิกให้ความเข้มข้นไนโตรเจนมากกว่า
 ไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 78 และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ใน
 การปลูกแบบน้ำขังให้ความเข้มข้นไนโตรเจนน้อยกว่าไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 11





ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นไนโตรเจนของใบของ ไบรช ที่ ระยะตั้งท้อง (a) 15 วันหลังออกดอก (b) ระยะสุกแก่ (c) ของข้าว 2 พันธุ์ ที่ปลูกในการจัดการปุ๋ย และการจัดการน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างในแต่ละระดับปุ๋ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

4.16 การแบ่งปันปริมาณธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่างๆ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ย และการแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์กำแพงชัย 93 มข. ภายใต้สภาพแอโรบิก มีอิทธิพลต่อการแบ่งปันธาตุสังกะสีของข้าวพันธุ์กำแพงชัย 93 มข. ที่ระยะต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.3) โดยระยะแตกกอ มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบ YEB (ร้อยละ 75, 18 และ 7 ตามลำดับ) และการจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 40 และ 87 ตามลำดับ

ระยะตั้งท้องมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 83, 12 และ 5 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.9 เท่า และ 1.7 เท่า ตามลำดับ

ระยะ 15 วันหลังออกดอกมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 90, 9 และ 1 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 6.2 เท่า และ 4.0 เท่า ตามลำดับ

และระยะสุกแก่มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม เมล็ดข้าว กิ่ง และใบธง (ร้อยละ 80, 12, 8 และ 1 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 3.8 เท่า และ 3.1 เท่า ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.3 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ก่ำหอม มช. ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพแอโรบิก (ไม่โครกรรม/ต้น)

	ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์ก่ำหอม มช.	การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ระยะแตกกอ	ลำต้น	251.6 c	374.6 b	474.2 a	366.8
	ใบรวม	72.5 de	87.8 de	101.1 d	87.1
	ใบYEB	18.0 f	17.6 f	64.3 e	33.3
	Mean	114.0	160.0	213.2	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	19.6	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	19.6	
	F X P		**	34.0	
ระยะตั้งท้อง	ลำต้น	679.7 c	2002.4 a	1042.4 b	1241.5
	ใบรวม	87.6 efg	276.7 d	178.9 e	181.1
	ใบธง	31.1 f	67.8 f	121.2 ef	73.4
	Mean	266.1	782.3	447.5	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	54.5	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	54.5	
	F X P		**	94.4	
ระยะ 15 DAF	ลำต้น	1066.3 c	6822.1 a	3761.8 b	3883.4
	ใบรวม	68.1 e	278.3 d	785.7 cd	372.2
	ใบธง	19.5 e	33.6 e	111.9 e	55.2
	Mean	384.6	2372.8	1553.1	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	314.4	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	314.4	
	F X P		**	544.7	

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

ส่วนต่างๆ ของข้าว	การจัดการปุ๋ย			Mean	
	พันธุ์กำหอม มช.	Adequate N	Adequate N+Zn		High N+Zn
ระยะสุกแก่	ลำต้น	1304.6 c	5687.9 a	4891.6 b	3961.3
	ใบรวม	278.5 ef	1010.0 d	496.1 e	594.9
	ใบธง	23.6 f	62.8 f	48.2 f	44.9
	เมล็ดข้าวเปลือก	281.6 ef	459.8 e	410.7 e	384.1
	Mean	417.4	1692.0	1430.1	
		F-test	LSD _{0.05}		
การจัดการปุ๋ย (F)		**	130.0		
ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	150.0		
F X P		**	260.0		

**แตกต่างกันมีนัยสำคัญยิ่ง (P<0.01)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ย และการแบ่งปันธาตุสังกะสีในสวนเหนือดินของข้าวพันธุ์กำหอม มช. ภายใต้สภาพน้ำขัง มีอิทธิพลต่อการแบ่งปันธาตุสังกะสีของข้าวพันธุ์กำหอม มช. ที่ระยะต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.4) โดยระยะแตกกอ มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบYEB (ร้อยละ 83, 10 และ 7 ตามลำดับ) และการจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 1.6 เท่า และ 2.2 เท่า ตามลำดับ

ระยะตั้งท้องมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 87, 11 และ 2 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.5 เท่า และ 1.7 เท่า ตามลำดับ

ระยะ 15 วันหลังออกดอกมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 90, 4 และ 1 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 3.0 เท่า และ 7.7 เท่า ตามลำดับ

และระยะสุกแก่มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม เมล็ดข้าว กอ และใบธง (ร้อยละ 68, 9, 2 และ 21 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.2 เท่า และ 2.5 เท่า ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.4 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์กำหอม มช. ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพน้ำขัง (ไมโครกรัม/ต้น)

ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์กำหอม มช.		การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N N+Zn	High N+Zn	
ระยะแตกกอ	ลำต้น	150.8 c	220.8 b	275.7 a	215.8
	ใบ	3.8 e	24.4 de	53.6 d	27.3
	ใบ YEB	8.1 e	21.9 de	20.8 de	16.9
	Mean	54.2	101.2	116.7	
		F-test		LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)		**		24.0	
ส่วนต่างๆของพืช (P)		**		24.0	
F X P		*		41.6	
ระยะตั้งท้อง	ลำต้น	812.7 c	2002.4 a	1379.1 b	1398.1
	ใบ	87.6 d	276.7 d	178.9 d	181.1
	ใบธง	14.8 d	37.5 d	40.2 d	30.8
	Mean	305.0	772.2	532.7	
		F-test		LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)		**		155.9	
ส่วนต่างๆของพืช (P)		**		155.9	
F X P		**		270.0	
ระยะ 15 DAF	ลำต้น	423.1 c	1280.6 b	3548.5 a	1750.7
	ใบ	34.3 d	101.9 d	93.8 d	76.7
	ใบธง	21.6 d	31.5 d	24.6 d	25.9
	Mean	159.7	471.3	1222.3	
		F-test		LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)		**		162.4	
ส่วนต่างๆของพืช (P)		**		162.4	
F X P		**		281.3	

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ระยะสุกแก่	ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์กำแพง มช.	การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ดำต้น		522.2 c	1254.8 b	1527.6 a	1101.5
ใบ		109.2 fg	130.8 fg	212.5 ef	150.8
ใบธง		9.4 g	44.5 g	59.9 fg	37.9
เมล็ดข้าวเปลือก		210.9 ef	445.6 cd	349.0 de	335.2
Mean		212.9	468.9	537.3	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	77.2	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	89.1	
	F X P		**	154.4	

* แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05), **แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (P<0.01)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ย และการแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ภายใต้สภาพน้ำขัง มีอิทธิพลต่อการแบ่งปันธาตุสังกะสีของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ระยะต่าง ๆ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.5) โดยระยะแตกกอ มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบ YEB (ร้อยละ 72, 22 และ 6 ตามลำดับ) และการจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียวร้อยละ 51 และ 81 ตามลำดับ

ระยะตั้งท้องมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 66, 31 และ 3 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 1.9 เท่า และ 4.9 เท่า ตามลำดับ

ระยะ 15 วันหลังออกดอกมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 92, 7 และ 1 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวน้อยกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ร้อยละ 32 ขณะที่การใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียง คิดเป็น 4.1 เท่า

และระยะสุกแก่มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น เมล็ดข้าวกล้อง ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 69, 14, 13 และ 4 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว คิดเป็นร้อยละ 46 และ 4.5 เท่า ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์ © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.5 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพน้ำขัง (ไม่โครกรัม/ต้น)

	ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์ชัยนาท 1	การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ระยะแตกกอ	ลำต้น	183.7 c	308.7 b	366.0 a	286.2
	ใบรวม	72.5 de	87.8 d	101.1 d	87.1
	ใบYEB	18.9 f	19.8 ef	30.2 ef	23.0
	Mean	91.7	138.7	165.8	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	30.5	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	30.5	
	F X P		**	52.8	
ระยะตั้งท้อง	ลำต้น	660.5 c	1123.5 b	3268.6 a	1684.2
	ใบรวม	290.7 d	697.5 c	1364.4 b	784.2
	ใบธง	35.4 d	35.9 d	157.9 d	76.4
	Mean	328.9	619.0	1597.0	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	71.1	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	71.1	
	F X P		**	261.0	
ระยะ 15 DAF	ลำต้น	2776.1 b	1662.7 c	10976.1 a	5138.0
	ใบรวม	68.1 e	262.7 e	785.7 d	372.2
	ใบธง	19.5 e	33.6 e	111.9 e	55.0
	Mean	954.6	653.0	3957.9	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	247.4	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	247.4	
	F X P		**	428.5	

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ส่วนต่างๆ ของข้าว	พันธุ์ชยันต 1	การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ระยะสุกแก่	ดำต้น	754.4 bc	923.6 b	3586.6 a	1754.9
	ใบรวม	74.0 f	390.2 de	550.4 cd	338.2
	ใบธง	39.8 f	27.1 f	220.0 ef	95.6
	เมล็ดข้าวเปลือก	224.3 ef	253.8 ef	558.9 cd	345.7
Mean		364.2	531.6	1638.6	
			F-test	LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)			**	118.7	
ส่วนต่างๆของพืช (P)			**	137.1	
F X P			**	237.4	

**แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง (P<0.01)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance) พบปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างการจัดการปุ๋ย และการแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ภายใต้สภาพแอโรบิก มีอิทธิพลต่อการแบ่งปันธาตุสังกะสีของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่ระยะต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (ตารางที่ 4.6) โดยระยะแตกกอ มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบ YEB (ร้อยละ 78, 17 และ 5 ตามลำดับ) และการจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 2.0 เท่า และ 4.7 เท่า ตามลำดับ

ระยะตั้งท้องมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 78, 18 และ 4 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 1.5 เท่า และ 4.3 เท่า ตามลำดับ

ระยะ 15 วันหลังออกดอกมีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม และใบธง (ร้อยละ 92, 7 และ 1 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 1.1 เท่า และ 3.9 เท่า ตามลำดับ

และระยะสุกแก่มีค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ลำต้น ใบรวม เมล็ดข้าว กอ และใบธง (ร้อยละ 75, 10, 3 และ 12 ตามลำดับ) การจัดการปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ค่าเฉลี่ยการแบ่งปันธาตุสังกะสีของส่วนต่างๆ ของต้นข้าวมากกว่าใส่ปุ๋ยในโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว 1.4 เท่า และ 3.9 เท่า ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4.6 การแบ่งปันธาตุสังกะสีในส่วนเหนือดินที่ระยะต่าง ๆ ของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่มีการจัดการปุ๋ยแตกต่างกันภายใต้สภาพแอโรบิก (ไมโครกรัม/ต้น)

ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์ชัยนาท 1		การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ระยะแตกกอ	ลำต้น	142.5 cd	313.1 b	600.1 a	351.9
	ใบ	26.8 e	29.4 e	174.6 c	76.9
	ใบ YEB	5.6 e	13.8 e	48.9 de	22.8
	Mean	58.3	118.8	274.5	
			F-test	LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)			**	58.4	
ส่วนต่างๆของพืช (P)			**	58.4	
F X P			**	101.1	
ระยะตั้งท้อง	ลำต้น	660.5 c	1123.5 b	3268.6 a	1684.2
	ใบ	246.2 d	215.8 d	693.4 c	385.1
	ใบธง	54.2 d	61.4 d	157.8 d	91.1
	Mean	320.3	466.9	1373.3	
			F-test	LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)			**	155.3	
ส่วนต่างๆของพืช (P)			**	155.3	
F X P			**	268.9	
ระยะ 15 DAF	ลำต้น	1703.7 b	1685.2 b	6945.0 a	3444.6
	ใบ	139.0 cd	411.1 c	241.0 cd	263.8
	ใบธง	15.1 d	35.9 d	52.4 d	34.5
	Mean	619.3	710.8	2412.8	
			F-test	LSD _{0.05}	
การจัดการปุ๋ย (F)			**	178.4	
ส่วนต่างๆของพืช (P)			**	178.4	
F X P			**	309.0	

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ระยะสุกแก่	ส่วนต่างๆ ของข้าว พันธุ์ชัยนาท 1	การจัดการปุ๋ย			Mean
		Adequate N	Adequate N+Zn	High N+Zn	
ดำต้น		754.4 b	923.6 b	3586.6 a	1754.9
ใบ		181.9 cde	254.9 cde	256.3 cde	231.0
ใบธง		29.4 e	73.1 de	100.6 de	67.7
เมล็ดข้าวกล้อง		156.4 cde	316.6 cd	389.0 c	287.3
Mean		280.5	392.1	1083.1	
			F-test	LSD _{0.05}	
	การจัดการปุ๋ย (F)		**	139.6	
	ส่วนต่างๆของพืช (P)		**	161.2	
	F X P		**	279.2	

**แตกต่างกันมีนัยสำคัญยิ่ง (P<0.01)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าผลผลิตข้าวมีผลกระทบจากทั้ง 3 ปัจจัยคือพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ยและน้ำ และผลผลิตได้รับอิทธิพลจากปฏิสัมพันธ์ร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและการจัดการน้ำ โดยข้าวทั้ง 2 พันธุ์มีความแตกต่างของต้นกำเนิดระบบการปลูก โดยพันธุ์กำหอม มข. มีต้นกำเนิดการปลูกเป็นระบบข้าวไร่ ในขณะที่พันธุ์ชัยนาท 1 มีต้นกำเนิดการปลูกเป็นระบบข้าวนาสวน พันธุ์กำหอม มข. เมื่อปลูกแบบน้ำขังซึ่งเป็นระบบการปลูกที่แตกต่างจากระบบดั้งเดิม ส่งผลให้น้ำหนักแห้งฟางจำนวนหน่อตอกอ จำนวนรวงตอกอ และน้ำหนัก 1,000 เมล็ดลดลงเมื่อเปรียบกับการปลูกในสภาพแอโรบิก อย่างไรก็ตาม การลดลงขององค์ประกอบผลผลิตดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตเมล็ดโดยรวม อาจเนื่องมาจากข้าวพันธุ์กำหอม มข. มีลักษณะของระบบการปลูกต้นกำเนิดเป็นพันธุ์ข้าวไร่ที่มีระบบรากลึก ซึ่งในระบบดังกล่าวมีรายงานว่าข้าวมีการปรับตัวของระบบรากได้ดีโดยอาจมีความยาวถึง 70-80 เซนติเมตร ซึ่งเป็นลักษณะหนึ่งที่สำคัญของข้าวไร่ในการปรับตัวเพื่อดูดใช้น้ำในชั้นดินที่มีระดับความลึกมาก ทำให้มีความทนทานต่อการขาดน้ำหรือสภาพแห้งแล้งได้ดี สามารถปรับตัวได้ทั้งการปลูกในสภาพแบบขังน้ำและไม่ขังน้ำ (Abe et al. 1994) ในทางตรงกันข้ามข้าวพันธุ์กำหอม มข. เมื่อปลูกแบบน้ำขังมีดัชนีการเก็บเกี่ยวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก เนื่องจากการปลูกในน้ำขังส่งผลให้ความสูงต้นของพันธุ์กำหอม มข. เตี้ยลงทำให้มีผลผลิตทางชีวภาพลดลงกว่าการปลูกแบบแอโรบิกแม้จะไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตเมล็ดก็ตาม ในขณะที่พันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นข้าวนาสวนมีระบบรากค่อนข้างตื้นและรากรวมเป็นกระจุก กระจายตัวอยู่ในระดับชั้นดินบนที่ 15-30 เซนติเมตร เท่านั้น (Serraj et al. 2011) เมื่อปลูกในสภาพแอโรบิกซึ่งเป็นสภาพการปลูกที่ตรงข้ามกับต้นกำเนิดของระบบการปลูกเดิม ส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดและน้ำหนักแห้งฟางลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการลดจำนวนหน่อตอกอ จำนวนรวงตอกอเมื่อเปรียบกับการปลูกแบบน้ำขังที่เป็นระบบการปลูกต้นกำเนิด ความสามารถในการปรับตัว ที่แตกต่างกันของข้าวทั้ง 2 พันธุ์นี้เป็นเหตุผลสำคัญในการตอบสนองต่อสภาพการจัดการน้ำและธาตุอาหารที่อาจมีความเป็นประโยชน์แตกต่างกันเมื่ออยู่ในสภาพการจัดการน้ำและปุ๋ยที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีในดิน ในดินนาข้าวขังมีการเปลี่ยนแปลงต่างจากดินที่ไม่มีน้ำขังอย่างมาก กระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดิน

และการเปลี่ยนแปลงธาตุอาหารในดินมักเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินที่ทำให้เกิดความแตกต่างของความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินต่อข้าว โดยในดินที่มีอากาศถ่ายเทได้ดีไม่มีน้ำขัง (aerobic soil) มีจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนในการหายใจเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron receptor) ขณะที่ดินน่าน้ำขังมีจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับหายใจ (anaerobic microorganism) ใช้กลุ่มของไนเตรต (NO_3^-), แมงกานีส (Mn^{+4}), และเหล็ก (Fe^{3+}) ที่มาจากการออกซิไดซ์ (oxidized) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction) หรือศักย์รีดอกซ์ (redox potential; Eh) ลดลงโดยดินที่มีการระบายน้ำดี มีค่า Eh ในช่วง +700 ถึง +500 มิลลิโวลต์ (millivolt; mV.) ขณะที่ดินที่มีสภาพรีดักชันสูงมาก (highly reduction) จะมีค่า Eh ในช่วง +100 ถึง -100 มิลลิโวลต์ (Parrick and Mahapatra 1968) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ค่า pH ของดินเปลี่ยนแปลง และส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน รายงานของ Zia et al. (2001) บ่งชี้ว่าในดินที่ไม่มีน้ำขังและมีอินทรีย์วัตถุมากมีความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการมิเนอไลเซชัน (mineralization) ในสภาพน้ำขังจะเกิดกระบวนการอิมโมบิไลเซชัน (immobilization) แต่กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่ามิเนอไลเซชัน (De Datta 1981) ในดินน่าน้ำขังที่มี pH เพิ่มขึ้นสังกะสีจะถูกตรึงให้อยู่ในรูป ZnS , $\text{Zn}(\text{OH})_2$, ZnCO_3 และ $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ซึ่งไม่ละลายน้ำ เมื่อ pH ของดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วยการละลายได้ (solubility) ของสังกะสีและโมลิบดีนัมจะลดลง 100 เท่า (Randhawa et al, 1978) ปกติแล้วดินในสภาพแอโรบิกจะมีค่าศักย์รีดอกซ์ที่น้อยกว่าในสภาพน้ำขัง ซึ่งค่า pH ที่ลดลงมีผลต่อการปลดปล่อยสังกะสีที่ตกตะกอนในดินจากกระบวนการออกซิไดเซชัน (oxidation) ของเหล็ก ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) โดยรากมีการปลดปล่อยออกซิเจนออกมาส่งผลต่อค่า pH บริเวณรอบรากลดลงและรากพืชสามารถดูดธาตุสังกะสีไปใช้ได้ (Abdullah 2015)

นอกจากสภาพการจัดการน้ำที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน ที่สามารถส่งผลต่อการสร้างผลผลิตของข้าวแล้ว การจัดการปุ๋ยก็เป็นปัจจัยสำคัญอีกประการที่มีบทบาทสำคัญในการสร้างผลผลิตของพืชด้วย โดยพันธุ์ชัชยนาท 1 ให้ผลผลิตสูงสุดจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี คาดว่าเนื่องจากเป็นข้าวนาสวนปรับปรุงสมัยใหม่ จึงตอบสนองได้ดีต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ขณะที่พันธุ์เก่าหอม มข. ให้ผลผลิตเมล็ดสูงสุดเมื่อใส่ไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี แม้ว่าจะมีรายงานว่าข้าวไร่มีประสิทธิภาพการดูดใช้ปุ๋ยไนโตรเจนน้อยกว่า 50 เปอร์เซ็นต์จากการใส่ปุ๋ยทั้งหมด เมื่อมีการจัดการการปลูกที่มีประสิทธิภาพก็ตาม (Fageria 2001) ในขณะที่การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีทำให้ผลผลิตลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี บ่งชี้ว่าในพันธุ์ข้าวไร่เก่าหอม มข. การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีสามารถเพิ่มผลผลิตเมล็ดข้าวได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว ซึ่งแสดงถึง

ประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของปุ๋ยไนโตรเจนและสังกะสีในอัตราที่เหมาะสมในการเพิ่มผลผลิตเมล็ด ในการทำงานร่วมกันของไนโตรเจนและสังกะสีในพืชมีงานวิจัยของ Peng et al. (2016) รายงานว่าปุ๋ยไนโตรเจนมีผลต่อการดูดใช้และการเคลื่อนย้ายธาตุสังกะสีในข้าวสาลีชนิดปลูกข้ามฤดูหนาว (winter wheat) โดยการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอย่างเหมาะสมทำให้ผลผลิตข้าวสาลีเพิ่มขึ้น และมีปริมาณการสะสมและความเข้มข้นของสังกะสีในแต่ละส่วนของพืชเพิ่มขึ้น ในข้าวสาลีที่ปลูกต้นฤดูใบไม้ผลิ มีผลผลิตเพิ่มขึ้น 48 เปอร์เซ็นต์ และข้าวสาลีที่ปลูกต้นฤดูหนาวมีผลผลิตเพิ่มขึ้น 17 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับข้าวสาลีทั้ง 2 ฤดูที่ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวโดยไม่ใส่ปุ๋ยสังกะสี (Malian et al. 2014) แม้ว่ามีรายงานการวิจัยหลายงานยืนยันว่าไนโตรเจนสามารถส่งเสริมการดูดใช้สังกะสีในดินได้ แต่กลไกที่ชัดเจนในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวยังไม่แน่ชัดซึ่งควรจะมีการศึกษาและวิจัยในเรื่องดังกล่าวในอนาคต

การทดลองนี้พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีสามารถเพิ่มความเข้มข้นของไนโตรเจนและสังกะสีในเนื้อเยื่อส่วนต่าง ๆ ในต้นข้าวได้ Shivay et al. (2014) รายงานว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในเมล็ดถั่วลูกไก่ (Chickpea) เพิ่มขึ้นจาก 36 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ไม่ใส่ปุ๋ยสังกะสี) เป็น 47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อใส่ปุ๋ยสังกะสีอัตรา 1.2 กิโลกรัมต่อไร่ และพบว่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในเมล็ดถั่วลูกไก่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้ปุ๋ยสังกะสีทางใบ ซึ่งมากกว่าการใช้ปุ๋ยสังกะสีทางดิน Kutman et al. (2011) บ่งชี้ว่าไนโตรเจนส่งผลต่อการดูดใช้สังกะสีโดยเคลื่อนย้ายจากรากสู่ส่วนเหนือดินได้ดีขึ้น โดยความเข้มข้นของสังกะสีในเนื้อเยื่อพืชสูงขึ้นเป็นเพราะไนโตรเจนที่สูง อาจเพิ่มความพร้อมการใช้งานของสังกะสีที่สามารถเคลื่อนย้ายเข้าสู่โพลีเอมเพื่อนำกลับมาใช้อีกครั้ง (retranslocation) ในการเคลื่อนย้ายสังกะสีเข้าสู่ส่วนของเมล็ดเป็นไปได้ว่ามีข้อจำกัดสำหรับการขนส่งในโพลีเอม ซึ่งเกี่ยวข้องกับความพร้อมของตัวสารละลายที่เอื้อต่อการลำเลียงในโพลีเอม ทำให้ไม่สามารถนำธาตุสังกะสีเข้าสู่เมล็ดได้ดีเท่ากับการเคลื่อนย้ายจากไซเลม (เนื่องจากอัตราการลำเลียงอาหารในโพลีเอมเกิดขึ้นได้ช้ากว่าการลำเลียงน้ำและธาตุอาหารในไซเลม) ไนโตรเจนที่สูงขึ้นอาจช่วยส่งเสริมการเคลื่อนย้ายสังกะสีเข้าสู่เมล็ดได้มากขึ้นทั้งนี้อาจมาจากความอุดมสมบูรณ์ในส่วนการลำเลียงหรือตัวสารละลายที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเคลื่อนย้าย (Garnett and Graham 2005) แม้ว่าไนโตรเจนที่สูงอาจช่วยเพิ่มอัตราส่วนของการนำสังกะสีกลับมาใช้ใหม่ แต่พบว่าการดูดใช้สังกะสีในลำต้นจะเพิ่มขึ้นหากในดินมีสังกะสีสูง ซึ่งไนโตรเจนไม่เพียงแต่จะช่วยเพิ่มการดูดใช้สังกะสีของรากเท่านั้น แต่ยังรวมถึงช่วยให้สารคีเลตมีความสมบูรณ์ในการเคลื่อนย้ายสังกะสีจากรากสู่ส่วนเหนือดิน และช่วยชะลอหรือยืดเวลาในช่วงของการเติมเต็มเมล็ดอีกด้วย (Yang and Zhang 2006)

ส่วนความเข้มข้นไนโตรเจนและสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องซึ่งสามารถส่งเสริมความแข็งแรงของต้นกล้าในแปลงปลูกและโภชนาการสำหรับผู้บริโภคได้ จากผลการศึกษาค้นคว้าพบว่าพันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย และน้ำ มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของไนโตรเจนและสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องแตกต่างกันในข้าวทั้ง 2 พันธุ์อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพที่ 4.6 และ 4.7) โดยพันธุ์กำหอม มช. มีความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดที่ตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และการใส่ไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี มากกว่าการใส่ไนโตรเจนในอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ทั้งในการปลูกแบบน้ำขังและแอโรบิก ขณะที่พบว่าความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องพันธุ์กำหอม มช. น้อยกว่าพันธุ์ชัยนาท 1 อาจเป็นไปได้ว่าการใช้ให้ปุ๋ยไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อชนิดพืชช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต และเพิ่มความสามารถในการดูดใช้สารอาหารในรากพืช แม้ว่ามีรายงานว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนสามารถเพิ่มความเข้มข้นของ โปแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม แมงกานีส และสังกะสี ในเนื้อเยื่อพืชส่วนเหนือดินได้ อย่างไรก็ตามปุ๋ยไนโตรเจนที่มากเกินไปทำให้รากเจริญเติบโตลดลงและยับยั้งการดูดซึมสังกะสี โดยพบความเข้มข้นแคลเซียม โซเดียม แมงกานีส และสังกะสีในเนื้อเยื่อพืชส่วนใต้ดินลดลงตามปริมาณไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น (Brennan, 2005; Sinkhorn, 2007) นอกจากนี้การสะสมไนโตรเจนและสังกะสีในเมล็ดข้าวทั้ง 2 พันธุ์ ยังมีส่วนเกี่ยวข้องกับผลผลิตข้าวแตกต่างกัน พบว่าความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวพันธุ์กำหอม มช. มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับผลผลิต และพบสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดกับผลผลิตของข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 และกำหอม มช. (ภาพที่ 4.8 a และ 4.8 b) โดยที่พันธุ์ชัยนาท 1 มีการตอบสนองสูงกว่าพันธุ์กำหอม มช. บ่งชี้ว่าการสะสมไนโตรเจนในเมล็ดข้าวที่เกิดจากการปุ๋ยไนโตรเจนมีผลทำให้ผลผลิตข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เพิ่มขึ้น ในขณะที่ผลผลิตข้าวพันธุ์กำหอม มช. มีการตอบสนองมากกว่าต่อการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าว รวมทั้งพบสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องทั้ง 2 พันธุ์ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสี น่าจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวและสามารถเพิ่มผลผลิตได้ด้วย (ภาพที่ 4.9) ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งเป็นข้าวนาสวนให้ผลผลิตเมล็ดสูงสุดเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี บ่งชี้ประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของปุ๋ยไนโตรเจนและสังกะสีในการเพิ่มผลผลิตเมล็ดเช่นเดียวกับในพันธุ์ข้าวไร่กำหอม มช. แต่มีการตอบสนองมากกว่าที่ระดับปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงกว่า อาจจะเป็นเพราะว่าข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ที่เป็นข้าวนาสวนเป็นข้าวพันธุ์ปรับปรุงสมัยใหม่ (modern rice variety) มีการตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนในการสร้างผลผลิตได้ดีกว่าพันธุ์ข้าวพื้นเมือง สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Ghoneim et al. (2018) บ่งชี้ว่าพันธุ์ข้าวที่ปรับปรุงใหม่ ตอบสนองต่อไนโตรเจนในอัตราที่เพิ่มขึ้น (35.2 กิโลกรัมต่อไร่) โดยไนโตรเจนช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวและองค์ประกอบผลผลิตอย่างมี

นัยสำคัญ และพันธุ์ข้าวมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดใช้ธาตุอาหารแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญด้วย ดังนั้น การตอบสนองของผลผลิตข้าวต่อการจัดการปุ๋ยใน โตรเจนร่วมกับสังกะสีจึงต้องมีการพิจารณาถึงพันธุ์ข้าวและอัตราการใส่ปุ๋ยควบคู่กันไปด้วยในขณะเดียวกัน

นอกจากนี้ความแตกต่างของการแบ่งปันธาตุสังกะสีในสวนเหนือดินที่ระยะต่างๆ ที่จะบ่งชี้ประสิทธิภาพในการดูดใช้ธาตุสังกะสีของต้นข้าวมีอิทธิพลมาจาก พันธุ์ข้าว การจัดการปุ๋ย การจัดการน้ำ ชนากานต์ (2557) รายงานว่าการกระจายและแบ่งปันสารสังเคราะห์ไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช (partitioning) มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยพืชที่มีประสิทธิภาพในการดูดใช้สารอาหารสูง จะมีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีกว่า การทดลองข้าวพันธุ์ชัชนาท 1 ภายใต้น้ำขังและแอโรบิก และพันธุ์กำหอม มช. ภายใต้อากาศน้ำขัง (ตารางที่ 4.17.2 – 4.17.4) พบว่ามีปริมาณการดูดใช้สังกะสีในข้าวทั้ง 2 พันธุ์ที่ระยะแตกกอ ระยะตั้งท้อง และระยะ 15 วันหลังออกดอกมากในส่วนของลำต้น ใบรวม และใบธง (เรียงลำดับจากมากไปน้อย) ขณะที่ระยะสุกแก่มีปริมาณการดูดใช้สังกะสีมากในส่วนของ ลำต้น เมล็ดข้าวกล้อง ใบรวม และใบธง ตามลำดับ ทั้งนี้ในระยะออกดอกพบปริมาณการดูดใช้สังกะสีในลำต้นสูงสุด และในระยะตั้งท้องมีการดูดใช้สังกะสีในใบรวมสูงสุด พันธุ์กำหอม มช. ที่ปลูกภายใต้สภาพแอโรบิกมีการสะสมสังกะสีมากในส่วนของลำต้น ใบรวม เมล็ดข้าวกล้อง และใบธง ตามลำดับ (ตารางที่ 4.17.1) จะเห็นว่ามี ความแตกต่างในการดูดใช้สังกะสีระหว่างข้าว 2 พันธุ์ และแม้ว่าเป็นข้าวพันธุ์เดียวกันเมื่อปลูกในสภาพต่างกัน ก็อาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตที่ต่างกันได้ในพันธุ์กำหอม มช. น้ำอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการแบ่งปันสังกะสี ลักษณะดังกล่าวอาจจะเอื้อประโยชน์ในลักษณะของการอยู่รอด และการสืบพันธุ์ ซึ่งการตอบสนองนี้อาจจะไม่เหมือนกันในแต่ละพันธุ์พืช แม้ว่า Gao et al. (2006) รายงานว่าภายใต้การปลูกแบบน้ำขังและแอโรบิก การใส่ปุ๋ยทางดิน ($ZnSO_4$) ในอัตรา 3.7 กิโลกรัมต่อไร่ ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวอย่างมีนัยสำคัญ และปริมาณสังกะสีที่เพิ่มขึ้นจากการใส่ปุ๋ยจะถูกเคลื่อนย้ายเข้าสู่ลำต้น ไม่ใช่เข้าสู่เมล็ด (Yin et al. 2012) แต่งานทดลองของ Arif et al. (2018) บ่งชี้ว่าการให้ปุ๋ยในโตรเจนร่วมกับสังกะสีทางใบที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ทั้งสังกะสีและไนโตรเจน ในระยะออกดอกสามารถให้ผลผลิตที่เพิ่มขึ้นในระยะเก็บเกี่ยว ทั้งนี้ในแต่ละส่วนของพืชที่มีการสะสมสังกะสีในระดับต่างกันนั้น มีกลไกและปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัน ในระยะแรกของการเจริญเติบโตในข้าวจะเกี่ยวข้องกับการดูดใช้สังกะสีของรากที่เพิ่มขึ้น และการแจกจ่ายสังกะสีภายในพืช (Frei et al. 2010 และ Widodo et al. 2010) Yin et al. (2012) ระบุว่า การใส่ปุ๋ยสังกะสีเพียงอย่างเดียวอาจเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดเพียงเล็กน้อย ซึ่งการเคลื่อนย้ายและการหมุนเวียนสังกะสีภายในพืชจากลำต้นส่วนเหนือดินสู่ส่วนของรวงข้าว หรือจากแกนกลางช่อดอกสู่ส่วนของเมล็ด มีอิทธิพลต่อการเพิ่ม

ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดมากกว่าการดูดซึมธาตุสังกะสีของรากจากดิน ดังนั้นควรประเมินศักยภาพและลักษณะของพันธุ์ข้าวแต่ละชนิดเพื่อเป็นข้อสังเกตที่สำคัญในการเลือกใช้ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีในอัตราที่ต่างกันในแต่ละชนิดพันธุ์ โดยผลจากการทดลองครั้งนี้ยืนยันได้ว่ามีความแตกต่างในการตอบสนองต่อการจัดการปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีในแต่ละสภาพการปลูกที่มีการจัดการน้ำแตกต่างกันต่อการสร้างผลผลิตในข้าวที่มีระบบการปลูกเดิมแบบข้าวไร่และข้าวนาสวน



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาอิทธิพลของการใส่ปุ๋ยสังกะสีร่วมกับไนโตรเจนต่อผลผลิตและความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวเมื่อปลูกในสภาพน้ำขังและแอโรบิก พบความแตกต่างของข้าวไร่และข้าวนาสวนในการตอบสนองต่อการจัดการปุ๋ยและน้ำ ซึ่งน่าจะเป็นความแตกต่างของความสามารถในการปรับตัวในการจัดการการปลูกของข้าวทั้งสองชนิด การปลูกพันธุ์กำหอม มข. ซึ่งมีต้นกำเนิดเป็นข้าวไร่ในสภาพน้ำขังทำให้น้ำหนักแห้งฟาง จำนวนหน่อต่อกอ จำนวนรวงต่อกอ และน้ำหนัก 1,000 เมล็ดลดลงเมื่อเทียบกับการปลูกแบบแอโรบิก แต่การลดลงขององค์ประกอบผลผลิตดังกล่าวไม่มีผลกระทบต่อผลผลิตเมล็ดโดยรวม ในขณะที่ข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 ซึ่งมีต้นกำเนิดเป็นข้าวนาสวนเมื่อปลูกในสภาพแอโรบิกส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดและน้ำหนักแห้งฟางลดลง เมื่อเทียบกับการปลูกแบบน้ำขัง เนื่องจากการลดลงของ จำนวนหน่อต่อกอและจำนวนรวงต่อกอ การจัดการปุ๋ยเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อการสร้างผลผลิตของข้าวด้วย โดยข้าวไร่กำหอม มข. พบการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสีสามารถเพิ่มผลผลิตเมล็ดข้าวได้มากกว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี และการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ขณะที่ข้าวนาสวนชัยนาท 1 ให้ผลผลิตสูงสุดจากการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี แสดงถึงความแตกต่างในการตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีในข้าวทั้งสองพันธุ์

นอกจากผลผลิต ความเข้มข้นของสังกะสีในเมล็ดข้าวกลังพบว่ามีอิทธิพลมาจากการจัดการน้ำและปุ๋ยแตกต่างกันในข้าวทั้งสองพันธุ์ ในพันธุ์กำหอม มข. พบว่าการใส่ไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีมีการสะสมสังกะสีในเมล็ดข้าวกลังสูงกว่าการใส่ไนโตรเจนอัตราพอเพียงเพียงอย่างเดียว ทั้งในการปลูกแบบน้ำขังและแอโรบิก ขณะที่ข้าวนาสวนพันธุ์ชัยนาท 1 ในสภาพน้ำขังพบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสี ให้ความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดมากกว่าการใส่ไนโตรเจนอัตราพอเพียง ขณะที่การปลูกแบบแอโรบิกการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตราพอเพียงร่วมกับสังกะสี และไนโตรเจนอัตราสูงร่วมกับสังกะสีมีความเข้มข้นสังกะสีไม่แตกต่างกัน นอกจากความแตกต่างในการตอบสนองต่อพันธุ์ข้าวทั้งสองชนิดในการสะสมสังกะสีในเมล็ดและการสร้างผลผลิตที่เกิดจากการจัดการปุ๋ยและน้ำแล้ว การทดลองนี้ยังชี้ประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของปุ๋ยไนโตรเจนและสังกะสีในการเพิ่มผลผลิตเมล็ดที่แตกต่างกันในข้าวทั้งสองพันธุ์อีกด้วย เนื่องข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 เป็นพันธุ์ปรับปรุงสมัยใหม่ตอบสนองต่อปุ๋ยไนโตรเจนในการสร้างผลผลิตได้ดีกว่า

พันธุ์ข้าวพื้นเมืองในข้าวไร่ก่ำหอม มช. ดังนั้นการจัดการปุ๋ยในโตรเจนร่วมกับสังกะสีเพื่อเพิ่มผลผลิตข้าว จึงต้องพิจารณาถึงชนิดพันธุ์ข้าวร่วมกับอัตราการใส่ปุ๋ยและการจัดการน้ำที่เหมาะสม

ความแตกต่างในการตอบสนองต่อการสะสมธาตุสังกะสีและไนโตรเจนในเมล็ดข้าว ต่อการสร้างผลผลิต ยังบ่งชี้จากความสัมพันธ์เชิงบวกของความเข้มข้นสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องและผลผลิตในข้าวพันธุ์ก่ำหอม มช. แสดงว่าการสะสมสังกะสีในเมล็ดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น ด้วย ขณะที่พบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนในเมล็ดข้าวกล้องกับผลผลิตเมล็ดในข้าวทั้งสองพันธุ์ บ่งชี้ว่าการสะสมไนโตรเจนในเมล็ดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้นด้วยในข้าวทั้งสองพันธุ์ แม้สัดส่วนในการเพิ่มขึ้นจะแตกต่างกัน ที่น่าสนใจอย่างยิ่งคือความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างความเข้มข้นไนโตรเจนกับสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องทั้ง 2 พันธุ์ บ่งชี้ได้ว่าการสะสมธาตุใดธาตุหนึ่งในเมล็ดเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการสะสมอีกธาตุหนึ่งเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งน่าจะสามารถบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกันของไนโตรเจนและสังกะสีในการสร้างผลผลิตของข้าวได้ อาจต้องการการยืนยันผลที่แน่ชัดโดยการเพิ่มจำนวนพันธุ์ข้าวในการทดลองต่อไปในอนาคต

นอกจากนี้การทดลองนี้ยังบ่งชี้ได้ถึงอิทธิพลของการจัดการปุ๋ยและน้ำที่ทำให้ข้าวทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันในการตอบสนองในเรื่องการดูดใช้ การกระจาย การแบ่งปันและการสะสมธาตุสังกะสีในส่วนต่าง ๆ ของต้นข้าวที่ระยะการเจริญเติบโตแตกต่างกัน แม้จะไม่ทราบถึงกลไกที่แน่ชัดในการทำงานร่วมกันระหว่างไนโตรเจนและสังกะสีที่มีต่อพืช แต่ผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับสังกะสีสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดใช้ สังกะสีในต้นข้าวได้ ในศึกษาและวิจัยต่อไปควรรศึกษากลไกทางสรีรวิทยาเชิงลึก กลไกทางชีวเคมี และชีวโมเลกุล เพื่อหาคำตอบในการทำงานร่วมกันระหว่างไนโตรเจนและสังกะสี ซึ่งองค์ความรู้ดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดการธาตุอาหารในข้าวเพื่อเพิ่มการเคลื่อนย้ายและการสะสมธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาจำนวนประชากรที่ขาดธาตุสังกะสีได้ต่อไป

Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เอกสารอ้างอิง

- เฉลิมพล แซมเพชร(2542) สรีรวิทยาการผลิตพืชไร่. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 188 หน้า.
- ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย (2557) สรีรวิทยาพืชไร่. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่. 232 หน้า.
- ปัทมาภรณ์ อักษรชู, นันทยา จงใจเทศ, ปิยนันท์ อึ้งทรงธรรม และสาวรรณชนก บุญชู.(2553) ปริมาณ แมกนีเซียมและสังกะสีในอาหาร. กลุ่มวิจัยอาหารเพื่อโภชนาการ สำนักโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข. 1-12.
- ยงยุทธ โอสถสภา (2543) ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. 242 หน้า.
- วีรวัฒน์ นิลรัตนคุณ (2558) การเพิ่มผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์โดยการใช้ปุ๋ยอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ. กรมวิชาการเกษตร. 103 หน้า
- สิริพันธุ์ จุลกรังคะ (2541) โภชนศาสตร์เบื้องต้น. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ. 230 หน้า
- สุพรรณิ สุวรรณประภา, เบญจวรรณ ฤกษ์เกษม, ศันสนีย์ จำจด และ ชนากานต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย (2556) ผลของระยะเวลาเก็บเกี่ยวและสภาพการนึ่งต่อคุณภาพทางโภชนาการของข้าวนี้้ง. วารสารแก่นเกษตร (41) 4: 383-392.
- Abbasi, A.A., Prasad, A.S., Rabbani, P., Du Mouchelle, E (1980) Experimental zinc deficiency in man: Effect on testicular function. The Journal of Laboratory and Clinical Medicine 96: 544-550.
- Abe, J., Morita, S (1994) Growth direction of nodal roots in rice: its variation and contribution to root system formation. Plant Soil 165:333-337.
- Ai, Z., Wang, G., Liang, C., Liu, H., Zhang, J., Xue, S., Liu, G (2017) The Effects of Nitrogen Addition on the Uptake and Allocation of Macro- and Micronutrients in *Bothriochloa ischaemum* on Loess Plateau in China. Frontiers in Plant Science 8:1-12.
- Alloway, B.J (2004) Zinc in Soils and Crop Nutrition. International fertilizer Industry Association and International Zinc Association, Brussels, Belgium and Paris 135 p.

- Arif, M (2018) Exogenously Applied Nitrogen and Zinc Fertilizers Improved the Rice Productivity. *Current Investigations in Agriculture and Current Research* 4:503-507.
- Arnon, I (1972) *Agriculture in Dry Lands: Principles and Practice (Developments in Agricultural and Managed-forest Ecology 26)*. Arnon I. (Ed.). Elsevier, Amsterdam 980 p.
- Ashworth, A., Morris, S.S., Lira, P.I.C., Grantham-McGregor, S.M (1998) Zinc supplementation, mental development and behaviour in low birth weight term infants in northeast Brazil. *European Journal of Clinical Nutrition* 52:223–227.
- Ayoub, M., Guertin, S., Fregeau-Reid, J., Smith, D.L (1994) Nitrogen Fertilizer Effect on Breadmaking Quality of Hard Red Spring Wheat in Eastern Canada. *Crop Science* 34:1346–1352.
- Barua, D., Saikia, M (2018) Agronomic biofortification in rice varieties through zinc fertilization under aerobic condition. *Indian Journal of Agricultural Research* 52: 89–92.
- Bostick, B.C., Hansel, C.M., Fendorf, S (2001) Seasonal Fluctuations in Zinc Speciation within a Contaminated Wetland. *Environ. Sci. Technol* 35:3823–3829.
- Bremner, J.M (1965) Inorganic nitrogen. In C. A. Black (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Agronomy* 9: 1179–1237.
- Brennan, Ross F (2005) Zinc application and its availability to plants. PhD thesis, Murdoch University.
- Broadbent, F.E., Mikkelsen, D.S (1968) Influence of placement on uptake of tagged nitrogen by rice. *Journal of Agronomy* 60:674–677.
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., Zhao, F (2012) Chapter 7 - Function of Nutrients: Micronutrients, in: Marschner, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)*. Academic Press, San Diego 191–248.
- Brown, K.H., Peerson, J.M., Rivera, J., Allen, L.H (2002) Effect of supplemental zinc on the growth and serum zinc concentrations of prepubertal children: a meta-analysis of randomized controlled trials. *The American journal of clinical nutrition* 75:1062–1071.
- Bungard, R.A., Wingler, A., Morton, J.D., Andrews, M., Press, M.C., Scholes, J.D (1999) Ammonium can stimulate nitrate and nitrite reductase in the absence of nitrate in *Clematis vitalba*. *Plant, Cell & Environment* 22:859–866.
- Cakmak, I (2000) Possible Roles of Zinc in Protecting Plant Cells from Damage by Reactive Oxygen Species. *New Phytologist* 146:185-205.

- Cakmak, I (2002) Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil* 247:3–24.
- Cakmak, I., Ekiz, H., Yilmaz, A., Torun, B., Koleli, N., Gultekin, I., Alkan, A., Eker, S (1997) Differential response of rye, triticale, bread and durum wheats to zinc deficiency in calcareous soils. *Plant and Soil* 88:1–10.
- Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A.A., Aydin, N., Wang, Y., Arisoy, Z., Erdem, H., Yazici, A., Gokmen, O., Ozturk, L., Horst, W.J (2010) Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58:9092–9102.
- Coleman, J.E (1992) ZINC PROTEINS: Enzymes, Storage Proteins, Transcription Factors, and Replication Proteins. *Annu. Rev. Biochem* 61:897–946.
- Colmer, T.D. 2003. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany* 91, 301–309.
- De Benoist, B., Erin M.E., Egli, I., Cogswell, M. (Eds.) (2008) Worldwide prevalence of anaemia 1993-2005. WHO Global database on anaemia. Geneva: World Health Organization and Center for Disease Control and Prevention. 40 p.
- De Datta, S.K (1981) Principles and practices of rice production. John Wiley and Sons, New York. 618 p.
- Delhaize, E., Dell, B., Kirk, G., Loneragan, J., Nable, R., Plaskett, D., Webb, M (1984) Manual of Research Procedures. First edition. Plant nutrition research group school of environmental and life science. Murdoch University, Australia. 662 p.
- Dong, Y., Ogawa, T., Lin, D., Koh, H.-J., Kamiunten, H., Matsuo, M., Cheng, S (2006) Molecular mapping of quantitative trait loci for zinc toxicity tolerance in rice seedling (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research* 95:420–425.
- Fageria, N.K (2001) Nutrient management for improving upland rice productivity and sustainability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32:2603–2629.
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A (2009) Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agron. Sustain. Dev* 29:185–212.
- Forno, D.A., Asher, C.J., Yoshida, S (1975) Zinc deficiency in rice. *Plant Soil* 42:551–563.
- Frei, M., Wang, Y., Ismail, A.M., Wissuwa, M (2010) Biochemical factors conferring shoot tolerance to oxidative stress in rice grown in low zinc soil. *Functional plant biology* 37: 74-84.

- Fu, X.-Z., Xing, F., Cao, L., Chun, C.-P., Ling, L.-L., Jiang, C.-L., Peng, L.-Z (2016) Effects of Foliar Application of Various Zinc Fertilizers with Organo silicone on Correcting Citrus Zinc Deficiency. *Hort Science* 51:422–426.
- Gao, L.Z (2005) Microsatellite diversity and population genetic structure of an endangered wild rice, *Oryza officinalis* (*Poaceae*) from China. *Molecular Ecology Journal* 14: 4287–4297.
- Gao, X (2007) Bioavailability of zinc to aerobic rice. Wageningen University & Research Centre. 152 p.
- Gao, X., Zou, C., Fan, X., Zhang, F., Hoffland, E (2006) From Flooded to Aerobic Conditions in Rice Cultivation: Consequences for Zinc Uptake. *Plant Soil* 280: 41–47.
- Ghoneim, A.M., E.E., G., Osman, M.M.A (2018) Effects of Nitrogen Levels on Growth, Yield and Nitrogen use Efficiency of Some Newly Released Egyptian Rice Genotypes. *Open Agriculture* 3:310–318.
- Gibson, R.S., Manger, M.S., Krittaphol, W., Pongcharoen, T., Gowachirapant, S., Bailey, K.B., Winichagoon, P (2007) Does zinc deficiency play a role in stunting among primary school children in NE Thailand. *British Journal of Nutrition* 97:167–175.
- Giordano, P.M (1979) soil temperature and nitrogen effects on response of flooded and non-flooded rice to zinc. *Plant and Soil* 52: 365–372.
- Graham, R., Senadhira, D., Beebe, S., Iglesias, C., Monasterio, I (1999) Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Research* 60: 57–80.
- Gupta, N., Ram, H., Kumar, B (2016) Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation. *Environmental Science and Biotechnology* 15: 89–109.
- HarvestPlus. Biofortification progress briefs (2014) 82 p.
- Hemalatha, S., Platel, K., Srinivasan, K (2007) Zinc and iron contents and their bioaccessibility in cereals and pulses consumed in India. *Food Chemistry* 102:1328–1336.
- Herren, T., Feller, U (1994) Transfer of zinc from xylem to phloem in the peduncle of wheat. *Journal of Plant Nutrition* 17:1587–1598.
- Hosseiny, Y., Maftoun, M (2008) Effects of Nitrogen Levels, Nitrogen Sources and Zinc Rates on the Growth and Mineral Composition of Lowland Rice. *Journal of Agricultural Science and Technology* 10:307–316.

- Hotz, C., Brown, K.H (2004) International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG) Technical Document No.1. Assessment of the Risk of Zinc Deficiency in Populations and Options for Its Control. Food and Nutrition Bulletin 25:S94-S203.
- Hotz, C., Kabir, K.A., Dipti, S.S., Arsenault, J.E., Bipul, M (2015) Rice fortification with zinc during parboiling may improve the adequacy of zinc intakes in Bangladesh. Journal of the Science of Food and Agriculture 95:379–385.
- IRRI (International Rice Research Institute) (1975) Standard evaluation system for rice. IRRI, Los Bafios, Philippines 64 p.
- Ishikawa, S., Abe, T., Kuramata, M., Yamaguchi, M., Ando, T., Yamamoto, T., Yano, M (2010) A major quantitative trait locus for increasing cadmium-specific concentration in rice grain is located on the short arm of chromosome 7. Journal of Experimental Botany 61:923–934.
- Ishimaru, Y., Bashir, K., Nishizawa, N.K (2011) Zn Uptake and Translocation in Rice Plants. Rice 4:21-27.
- Jiang, W., Struik, P.C., Keulen, H.V., Zhao, M., Jin, L.N., Stomph, T.J (2008) Does increased zinc uptake enhance grain zinc mass concentration in rice? Annals of Applied Biology 153:135–147.
- Johnson, A.A.T., Kyriacou, B., Callahan, D.L., Carruthers, L., Stangoulis, J., Lombi, E., Tester, M (2011) Constitutive overexpression of the OsNAS gene family reveals single-gene strategies for effective iron- and zinc-biofortification of rice endosperm 6(9):1-11.
- Johnson, A.D., Simons, J.G (1979) Diagnostic indices of zinc deficiency in tropical legumes. Journal of Plant Nutrition 1:123–149.
- Kato, Y., Okami, M (2011) Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions. Annales Botanici Fennici 108:575-583.
- Khanda, C.M., Dixit, L (1996) Effect of zinc and nitrogen fertilization on yield and nutrient uptake of summer rice (*Oryza sativa*). Indian Journal of Agronomy 41(3):368-372.
- Khattak, S.G., Dominy, P.J., Ahmad, W (2015) Effect of Zn as soil addition and foliar application on yield and protein content of wheat in alkaline soil. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka 43:303–312.
- Kittrick, J.A (1976) Control of Zn^{2+} in the Soil Solution by Sphalerite 1. Soil Science Society of America Journal 40:314–317.

- Kludze, H.K., DeLaune, R.D., Patrick, W.H (1993) Aerenchyma Formation and Methane and Oxygen Exchange in Rice. *Soil Science Society of America Journal* 57:386–391.
- Kozłowski, T.T (1984) Plant Responses to Flooding of Soil. *Journal of Biosciences* 34:162–167.
- Kutman, U.B., Yildiz, B., Cakmak, I (2011) Effect of nitrogen on uptake, remobilization, and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. *Plant Soil* 342:149–164.
- Lee, S., Jeong, H.J., Kim, S.A., Lee, J., Guerinot, M.L., An, G (2010) OsZIP5 is a plasma membrane zinc transporter in rice. *Plant Molecular Biology* 73:507–517.
- Li, S., Zhou, X., Huang, Y., Zhu, L., Zhang, S., Zhao, Y., Guo, J., Chen, J., Chen, R (2013) Identification and characterization of the zinc-regulated transporters, iron-regulated transporter-like protein (ZIP) gene family in maize. *Plant Molecular Biology* 8:114-125.
- Lindsay, W.L (1972) Zinc in Soils and Plant Nutrition, in: Brady, N.C. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press 147–186.
- Liu, H., Gan, W., Rengel, Z., Zhao, P (2016) Effects of zinc fertilizer rate and application method on photosynthetic characteristics and grain yield of summer maize. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16:550–562.
- Lockard, R.G., Ballaux, J.C., Liongson, E.A (1972) Response of Rice Plants Grown in Three Potted Luzon Soils to Additions of Boron, Sulfur, and Zinc 1. *Agronomy Journal* 64:444–447.
- Mandal, L.N., Mandal, B (1986) Zinc fractions in soils in relation to zinc nutrition of lowland rice. *Soil Science* 142: 141.
- Marschner, H (1995) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press 672 p.
- Masuda, H., Ishimaru, Y., Aung, M. S., Kobayashi, T., Kakei, Y., Takahashi, M., Higuchi, K., Nakanishi, H., Nishizawa, N. K (2012) Iron biofortification in rice by the introduction of multiple genes involved in iron nutrition. *Scientific reports* 2:543.
- Mikkelsen, D.S., Kuo, S (1976) Zinc fertilization and behavior in flooded soils. In: *Food and Fertilizer Technology Center*, edited. *The fertility of paddy soils and fertilizer application for rice*. Taipei, Taiwan: Food and Fertilizer Technology Center 170 –196.
- Mitchell, J., Owusu, M., Fukai, S (2012) Root development of rice under flooded and aerobic conditions. *Proceedings of the 16th ASA Conference*, 14-18 October 2012, Armidale, Australia 1-4.

- Moorman, F.R., Breemen, van N (1978) Rice: Soil, Water, Land. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines. 185 p.
- Neue, H.U., Lantin, R.S (1994) Micronutrient Toxicities and Deficiencies in Rice, in: Yeo, A.R., Flowers, T.J. (Eds.), Soil Mineral Stresses: Approaches to Crop Improvement, Monographs on Theoretical and Applied Genetics. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 175–200.
- Peng, Y.-H., Tsai, Y.-C., Hsiung, C.-E., Lin, Y.-H., Shih, Y.-H (2017) Influence of water chemistry on the environmental behaviors of commercial ZnO nanoparticles in various water and wastewater samples. *Journal of Hazardous Materials* 322:348–356.
- Phattarakul, N., Rerkasem, B., Li, L.J., Wu, L.H., Zou, C.Q., Ram, H., Sohu, V.S., Kang, B.S., Surek, H., Kalayci, M., Yazici, A., Zhang, F.S., Cakmak, I (2012) Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant Soil* 361:131–141.
- Polar, E (1975) Zinc in pollen and its incorporation into seeds. *Planta Journal* 123:97–103.
- Prasad, A.S (2008) Zinc in human health: effect of zinc on immune cells. *Mol. Med* 14:353–357.
- Prasad, R (2011) Chapter Four - Aerobic Rice Systems, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press 207–247.
- Qadar, A (2002) Selecting Rice Genotypes Tolerant to Zinc Deficiency and Sodicity Stresses. I. Differences in Zinc, Iron, Manganese, Copper, Phosphorus Concentrations, and Phosphorus/Zinc Ratio in Their Leaves. *Journal of Plant Nutrition* 25:457–473.
- Quijano-Guerta, C., Kirk, G.J.D., Portugal, A.M., Bartolome, V.I., McLaren, G.C (2002) Tolerance of rice germplasm to zinc deficiency. *Field Crops Research, Improving Tolerance to Abiotic Stresses in Rainfed Lowland Rice* 76: 123–130.
- Ranjbar, G.A., Bahmaniar, M.A (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 Sciences* 6:1000-1005.
- Serraj, R., McNally, K.L., Slamet-Loedin, I., Kohli, A., Haefele, S.M., Atlin, G., Kumar, A (2011) Drought resistance improvement in rice: an integrated genetic and resource management strategy. *Plant Production Science* 14:1–14.
- Shi, W.M., Xu, W.F., Li, S.M., Zhao, X.Q., Dong, G.Q (2010) Responses of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen conditions. *Plant and Soil* 326:291–302.

- Singh, M., Singh, S.P (1981) Effect of nitrogen and zinc on the yield of submerged rice and uptake of N and Zn on unlimed and limed soils. *Plant and Soil* 62:185-192.
- Singh, S.P., Gruissem, W., Bhullar, N.K (2017) Single genetic locus improvement of iron, zinc and β -carotene content in rice grains. *Scientific Reports* 7: 6883.
- Sinkhorn, E.R., Perakis, S.S., Compton, J.E., Cromack, K., Bullen, T.D (2007) Non-Linear Nitrogen Cycling and Ecosystem Calcium Depletion Along a Temperate Forest Soil Nitrogen Gradient. *AGU Fall Meeting Abstracts* 31:B31A-0061.
- Slamet-Loedin, I.H., Johnson-Beebout, S.E., Impa, S., Tsakirpaloglou, N (2015) Enriching rice with Zn and Fe while minimizing Cd risk. *Frontiers in Plant Science* 12(6):1-9.
- Slaton, N.A., Gbur, E.E., Wilson, C.E., Norman, R.J (2005) Rice Response to Granular Zinc Sources Varying in Water-Soluble Zinc. *Soil Science Society of America Journal* 69:443–452.
- Sow, A.Y., Ismail, A., Zulkifli, S.Z (n.d.) Copper and Zinc Speciation in Soils from Paddy Cultivation Areas in Kelantan, Malaysia. *Acta Biologica Malaysiana* 1:26–35.
- Srinivasa Rao, C., Wani, S.P., Sahrawat, K.L., Rego, T.J., Pardhasaradhi, G (2008) Zinc, boron and sulphur deficiencies are holding back the potential of rainfed crops in semi-arid India: Experiences from participatory watershed management. *International Journal of Plant Production* 2:89–99.
- Steudle, E (1994) Water transport across roots. *Plant Soil* 167: 79–90.
- Veeresh, D.B.K., Vishwanatha, S., Anilkumar, S.N., Rao, S., Halepyati, A.S (2011) Growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) varieties as influenced by different methods of planting under aerobic method of cultivation. *Agricultural Science Research Journal* 2:298–300.
- Walravens, P.A., Chakar, A., Mokni, R., Denise, J., Lemonnier, D (1992) Zinc supplements in breastfed infants. *the Lancet* 340:683-685.
- Wang, Y., Wei, Y., Dong, L., Lu, L., Feng, Y., Zhang, J., Pan, F., Yang, X (2014) Improved yield and Zn accumulation for rice grain by Zn fertilization and optimized water management. *Journal of Zhejiang University Science B: Biomedicine & Biotechnology* 15:365–374.
- Weiss, D.J., Mason, T.F.D., Zhao, F.J., Kirk, G.J.D., Coles, B.J., Horstwood, M.S.A (2005) Isotopic discrimination of zinc in higher plants. *New Phytologist* 165:703–710.
- Welch, R.M., Graham, R.D (1999) A new paradigm for world agriculture: meeting human needs: Productive, sustainable, nutritious. *Field Crops Research* 60:1–10.

- Welch, R.M., Graham, R.D (2004) Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany* 55:353–364.
- Welch, R.M., House, W.A., Beebe, S., Cheng, Z (2000) Genetic selection for enhanced bioavailable levels of iron in bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seeds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48:3576–3580.
- Widodo, B., Broadley, M.R., Rose, T., Frei, M., Pariasca-Tanaka, J., Yoshihashi, T., Thomson, M., Hammond, J.P., Aprile, A., Close, T.J., Ismail, A.M., Wissuwa, M (2010) Response to zinc deficiency of two rice lines with contrasting tolerance is determined by root growth maintenance and organic acid exudation rates, and not by zinc-transporter activity. *New Phytologist* 186: 400–414.
- Wissuwa, M., Ismail, A.M., Graham, R.D (2008) Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization. *Plant Soil* 306:37–48.
- Wissuwa, M., Ismail, A.M., Yanagihara, S. 2006. Effects of Zinc Deficiency on Rice Growth and Genetic Factors Contributing to Tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 142, 731–741.
- Xia, H., Xiong, J., Tao, T., Zheng, X., Huang, W., Li, J., Chen, L., Luo, L (2015) Distinguishing upland and lowland rice ecotypes by selective SSRs and their applications in molecular-assisted selection of rice drought resistance. *Euphytica* 206:11–20.
- Xu, R., Zhao, A., Li, Q., Kong, X., Ji, G (2003) Acidity regime of the Red Soils in a subtropical region of southern China under field conditions. *Geoderma, Anthropogenic soils and their use in China: Anthropogenic soils and soil quality change under intensive management in China*. 115: 75–84.
- Yilmaz, A., Ekiz, H., Torun, B., Gultekin, I., Karanlik, S., Bagci, S.A., Cakmak, I (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* 20:461–471.
- Yin, H., Gao, X., Stomph, T., Li, L., Zhang, F., Zou, C (2016) Zinc Concentration in Rice (*Oryza sativa* L.) Grains and Allocation in Plants as Affected by Different Zinc Fertilization Strategies. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 47: 761–768.
- Zhao, F.J., Su, Y.H., Dunham, S.J., Rakszegi, M., Bedo, Z., McGrath, S.P., Shewry, P.R (2009) Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. *Journal of Cereal Science* 49:290-295.

Zhu, D., Zhang, H., Guo, B., Xu, K., Dai, Q., Wei, H., Gao, H., Hu, Y., Cui, P., Huo, Z (2017) Effects of nitrogen level on yield and quality of japonica soft super rice. *Journal of Integrative Agriculture* 16:1018–1027.

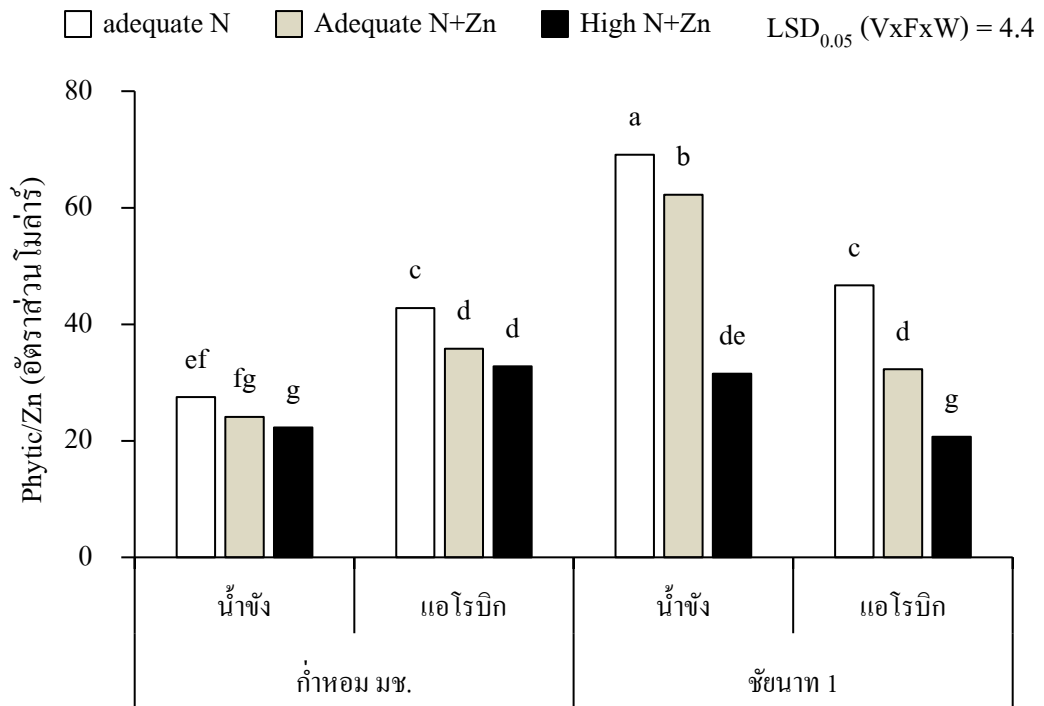


ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Analysis of Variance)

อัตราส่วนโมลาร์ของกรดไฟติกต่อธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง



ภาพที่ 1 อัตราส่วน โมลาร์ของกรดไฟติกต่อสังกะสีในข้าว 2 พันธุ์ ที่มีการจัดการปุ๋ยและน้ำแตกต่างกัน (ตัวอักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็กที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $P < 0.05$)

Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวรินธร รินสินจ้อย
วัน เดือน ปี เกิด	11 สิงหาคม 2536
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2549-2551 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นจาก โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย เชียงใหม่ พ.ศ. 2552-2554 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจาก โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย เชียงใหม่ พ.ศ. 2555-2558 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เกษตรศาสตร์) สาขาวิชาปฐพีศาสตร์และการจัดการ ทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved