

การแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าว

Iron and zinc partitioning in rice grain

ช่อเพชร แสนไชย¹, ชนาکانต์ เทโบลต์ พรหมอุทัย^{1,4*}, ศันสนีย์ จำจด^{1,4}, Bernard Dell²

และ เบญจวรรณ อุภัยเกษม³

Chorpet Saenchai¹, Chanakan Thebault Prom-u-thai^{1,4*}, Sansanee JamJod^{1,4},

Bernard Dell² and Benjavan Rerkasem³

บทคัดย่อ: หนึ่งในสามส่วนของประชากรโลกขาดธาตุเหล็กและสังกะสี การแก้ปัญหายังยั่งยืนวิธีหนึ่งคือการเพิ่มธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าว ซึ่งจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับการแบ่งปันธาตุดังกล่าวในส่วนต่างๆ ของเมล็ด งานทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ บ่งชี้ความสัมพันธ์ของการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดกับธาตุอาหารทั้งสองชนิดในข้าวขาว 15 พันธุ์ ประกอบด้วยข้าวไร่ 4 พันธุ์ ข้าวนาสวน 11 พันธุ์ โดยเก็บเกี่ยวเมล็ดข้าวที่ระยะสุกแก่ นำมาแยกกระเพาะเปลือก จากนั้นแยกเมล็ดข้าวเป็น ข้าวขาว คัพกะ และ อะลิวโรน วิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในแต่ละส่วน ผลการทดลองพบว่ามีความแปรปรวนของการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวและระหว่างพันธุ์ ธาตุสังกะสีมีการปันส่วนเข้าสู่ข้าวขาวสูงกว่าธาตุเหล็ก โดยร้อยละ 60 – 80 ของธาตุสังกะสีที่สะสมในเมล็ดข้าวกลึง ถูกแบ่งปันสู่ข้าวขาว ส่วนธาตุเหล็กพบเพียงร้อยละ 29 – 56 และพบว่า ความเข้มข้นของธาตุเหล็กในข้าวขาวมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับการแบ่งปันธาตุเหล็กเข้าสู่ข้าวขาว ($r = 0.75^{***}$) แต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการ แบ่งปันธาตุเหล็กเข้าสู่เยื่ออะลิวโรน ($r = -0.64^{***}$) ส่วนในธาตุสังกะสีพบว่า ปริมาณความเข้มข้นในข้าวขาวและการแบ่งปันธาตุสังกะสีเข้าสู่ส่วนของข้าวขาวมีความสัมพันธ์เชิงบวก ($r = 0.76^{***}$) แต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการแบ่งปันธาตุไปสู่อัลฟ่า ($r = -0.72^{***}$) การทดลองนี้บ่งชี้ว่า การเพิ่มความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาว สามารถทำได้โดยการเพิ่มการแบ่งปันธาตุอาหารทั้งสองชนิดในข้าวขาวและลดการแบ่งปันไปยังอะลิวโรนสำหรับธาตุเหล็ก และลดการแบ่งปันไปยังอัลฟ่าสำหรับธาตุสังกะสี

คำสำคัญ: การแบ่งปัน, ข้าว, ธาตุเหล็ก, ธาตุสังกะสี

ABSTRACT: One-third of the world population has Fe and Zn deficiency. Increasing Fe and Zn concentrations in rice grain is suggested as a sustainable solution to the problem. The partitioning of Fe and Zn in rice grain has to be clearly understood. The objectives of this study were to indicate the relationship between Fe and Zn concentrations in white rice, and the partitioning of these 2 elements among different grain parts of different rice genotypes. Four upland and 11 lowland rice genotypes were grown under wetland condition until maturity. Paddy grain was collected and dehusked manually by hand before being partitioned into white rice, embryo and aleurone; and evaluated for Fe and Zn concentrations. The partitioning of Fe in white rice ranged from 29% to 56%, while it was from 60% to 80% for Zn. There was a positive correlation between Fe concentration and Fe partitioning in the white rice ($r = 0.75^{***}$), but Fe concentration in white rice negatively correlated with Fe partitioning in the aleurone ($r = -0.64^{***}$). In the case of Zn, Zn concentration in white rice positively correlated with Zn partitioning in the white rice ($r = 0.76^{***}$), but negatively correlated with Zn partitioning in the embryo ($r = -0.72^{***}$). This study indicated that increasing Fe and Zn concentrations in white rice can be accomplished by increasing Fe and Zn partitioning in the white rice; and decreasing partitioning in the aleurone and the embryo for Fe and Zn, respectively.

Keywords: partitioning, rice, iron, zinc

¹ สาขาพืชไร่ ภาควิชาพืชศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200
Division of Agronomy, Department of Plant Science and Natural Resource, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University 50200

² Sustainable Ecosystem Research Institute, Murdoch University, Perth 6150, Australia

³ กลุ่มวิจัยทรัพยากรพันธุกรรมและธาตุอาหารพืช คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 50200
Plant Genetic Resource and Nutrition Laboratory, Faculty of Agriculture, Chiang Mai 50200

⁴ ศูนย์วิจัยข้าวล้านนา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Lanna Rice Research Center, Chiang Mai University

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

บทนำ

การเกิดโรคโลหิตจาง (anemia) เนื่องจากการขาดธาตุเหล็ก หรือธาตุสังกะสี (iron and/or zinc deficiency) พบในผู้ป่วยจำนวน 1.62 พันล้านคน (WHO, 2008) สำหรับในประเทศไทย ผู้ป่วยโรคนี้พบในเด็กก่อนวัยเรียน ร้อยละ 25 สตรีมีครรภ์ ร้อยละ 22 และ สตรีวัยเจริญพันธุ์ ร้อยละ 18 และร้อยละ 42 มีความเสี่ยงต่อการขาดธาตุสังกะสี เด็กก่อนวัยเรียนที่ขาดธาตุเหล็กและสังกะสีจะมีอาการแคะแกร็น (Hotz and Brown, 2004) สาเหตุสำคัญของการขาดธาตุอาหารทั้ง 2 ชนิดนี้ เกิดจากการขาดอาหารประเภทเนื้อสัตว์และผักผลไม้ (FAO/WHO, 2002; Kennedy et al., 2003) อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมในการบริโภคทำได้ยากกว่าการเพิ่มปริมาณสารอาหารที่เป็นประโยชน์ในพืชอาหารหลักที่นิยมบริโภค คือ ข้าว โดยการปรับปรุงพันธุ์ข้าว และการจัดการสภาพแวดล้อมในการปลูก (Graham et al., 1999; Pfeiffer and McClafferty, 2007; Phattarakul et al., 2012) ความแปรปรวนของปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในพันธุ์กรรมข้าวชนิดต่างๆ สามารถใช้เป็นข้อมูลในการคัดเลือกและปรับปรุงพันธุ์ และการจัดการสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในเมล็ดข้าว

กลุ่มธัญพืชที่เป็นอาหารหลักได้แก่ ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวกล้องมีปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีต่ำที่สุด คือ 6 – 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 14 – 58 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Welch and Graham, 2004) และยังมีปริมาณลดลงในข้าวสารขัดขาวที่นิยมบริโภคในกลุ่มผู้บริโภคข้าวทั่วไป เนื่องจากในระหว่างกระบวนการผลิตข้าวขาวทำให้มีการสูญเสียธาตุเหล็กและสังกะสีในปริมาณมากถึงร้อยละ 60-80 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของพันธุ์ข้าวและรูปร่างของเมล็ดข้าว (Prom-u-thai et al., 2007b; Saenchai et al., 2012) ธาตุอาหารสูญเสียไปกับเนื้อเยื่อส่วนนอกของเมล็ดคือ รำข้าว ที่ถูกขัดออกไปซึ่งรำข้าวประกอบไปด้วยส่วนของ คัพภะ (embryo) เยื่อหุ้มผล (pericarp) เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) และเยื่ออะลิวโรน (aleurone) โดยในรำข้าวมีปริมาณธาตุ

เหล็กและสังกะสีสูงกว่าข้าวขาว ประมาณ 8 – 10 และประมาณ 2 – 4 เท่า ตามลำดับ (Prom-u-thai et al., 2007a; Prom-u-thai et al., 2008; Wang et al., 2011)

ความแตกต่างของปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวแต่ละพันธุ์ เกิดจากความแตกต่างของการลำเลียงอาหารสู่เมล็ดข้าว ซึ่งมีกลไกหลักคือ การลำเลียงระยะไกลโดยท่ออาหารเข้าสู่เมล็ด จากนั้นเป็นการถ่ายเทอาหารออกจากท่ออาหาร และสุดท้ายการลำเลียงระยะใกล้ระหว่างท่ออาหารและเซลล์ที่กำลังพัฒนาของเอนโดสเปิร์ม (Oparka and Gates, 1981; Oparka and Gates, 1984) ซึ่งการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวมีรายงานมาก่อนหน้านี้แล้วในระหว่างเอนโดสเปิร์มและ รำ (Prom-u-thai et al., 2007a; Wang et al., 2011) แต่อย่างไรก็ตาม ในส่วนของรำ มีส่วนสำคัญของเมล็ดสองส่วนคือ เยื่ออะลิวโรน และ คัพภะ ซึ่งประกอบไปด้วยโปรตีนที่เป็นแหล่งสะสมของธาตุเหล็กและสังกะสี (Prom-u-thai et al., 2008) ดังนั้นความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีระหว่างส่วนสำคัญของเมล็ดสามส่วนได้แก่ เอนโดสเปิร์ม (ข้าวขาว) คัพภะ และเยื่ออะลิวโรน สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการคัดเลือกพันธุ์ หรือ การศึกษาเกี่ยวกับการลำเลียงของธาตุเหล็กและสังกะสีเข้าสู่ข้าวขาวเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวต่อไป ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประเมินปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสี และความสัมพันธ์ของปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวกับการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนหลักสามส่วนในเมล็ดข้าว คือ ข้าวขาว คัพภะ และเยื่ออะลิวโรน ในพันธุ์ข้าวไทย

วิธีทดลอง

ใช้ข้าว 15 พันธุ์ (Table 1) ประกอบด้วยข้าวนาสวน 11 พันธุ์ และข้าวไร่ 4 พันธุ์ ปลูกที่ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม 2549 ในสภาพนาสวนแบบนาดำ วางแผนการทดลอง

แบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized block, CRD) โดยแต่ละพันธุ์ปลูกซ้ำ 3 แปลง เตรียมต้นกล้าข้าวอายุ 4 สัปดาห์ และย้ายปักดำในแปลงขนาด 3 X 4 เมตร ระยะปลูก 0.25 x 0.25 เมตร ใส่ปุ๋ยครั้งแรกหลังจากปักดำ 4 สัปดาห์ โดยใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 4 ก.ก. N/ไร่ และ ฟอสฟอรัสอัตรา 5 ก.ก. P_2O_5 /ไร่ ครั้งที่ 2 ใส่ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 10 ก.ก. N/ไร่ หลังปักดำ 8 สัปดาห์ เก็บเกี่ยวเมื่อข้าวสุกแก่

สุ่มตัวอย่างเมล็ดข้าวเปลือก พันธุ์ละ 50 กรัม จากแต่ละแปลง มาแกะเปลือกโดยใช้มือ โดยระมัดระวังเรื่องความสะอาด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของธาตุเหล็กและสังกะสี เมื่อได้ข้าวกล้องแล้ว หลังจากนั้นแยกเอาส่วนของคัพภะออกโดยใช้ใบมีดโกนเคลือบ Teflon เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากธาตุเหล็ก เมล็ดที่แยกส่วนคัพภะออกแล้วนำไปขัดขาวด้วยเครื่องขัดขาวขนาดเล็ก (โมเดล-1 ผลิตจากบริษัท เจ็ก เซ่ง ฮั่ว จำกัด) เป็นเวลา 30 วินาที ได้ข้าวขาว และ ส่วนเยื่อหุ้มเมล็ด

นำแต่ละส่วนของเมล็ดได้แก่ ข้าวกล้อง ข้าวขาว คัพภะ และ เยื่อหุ้มเมล็ด ไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างแต่ละส่วนของเมล็ดเผาในเตาเผา (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 535 องศา นาน 8 ชั่วโมง นำเถ้าของตัวอย่างละลายในสารละลายไฮโดรคลอริก (1:1; HCl: deionized water) สารละลายที่ได้นำไปอ่านค่าความเข้มข้นธาตุเหล็กและสังกะสีโดยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Allan, 1961)

ข้อมูลความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีและการแบ่งปันธาตุดังกล่าว ซึ่งคำนวณจากปริมาณความเข้มข้นของธาตุอาหารคูณด้วยน้ำหนักในส่วนต่างๆ ของเมล็ดของข้าวทั้ง 15 พันธุ์ แล้วนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยทางสถิติโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test ที่ $P < 0.05$ หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรโดยวิธี Pearson analysis

Table 1 Some characteristics of rice genotypes used to determine Fe and Zn concentration and partitioning in grain

Genotype	Endosperm type	Maturity time ¹	MC ² (%)	Other notable characteristic
Wetland genotype				
KDML105	Non-waxy	120	11.4	Local cultivar, aromatic
CNT1	Non-waxy	121	11.3	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
SPR1	Non-waxy	120	11.5	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
PTT1	Non-waxy	125	11.0	Modern, semi-dwarf, aromatic
RD7	Non-waxy	125	11.6	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
RD29	Non-waxy	101	11.6	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
RD6	Waxy	120	11.5	Local cultivar, aromatic
RD4	Waxy	127	11.5	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
RD10	Waxy	130	10.7	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
SKN	Waxy	128	11.1	Local cultivar, aromatic
MN 62 M	Waxy	120	11.8	Local cultivar, non-aromatic
Upland genotype				
SMJ	Waxy	95	11.3	Local cultivar, non-aromatic
KPK	Waxy	95	11.1	Local cultivar, non-aromatic
R258	Waxy	109	11.6	Modern, semi-dwarf, non-aromatic
NR	Non-waxy	87	11.4	Local cultivar, non-aromatic

¹Day after transplanting; ²Moisture content (%)

ผลการทดลอง

ความเข้มข้นธาตุเหล็กและสังกะสี

พบความแปรปรวนของธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าว 15 พันธุ์ (Table 2) ความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวกล้องอยู่ระหว่าง 6.3-16.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 17.3-59.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในข้าวขาวอยู่ระหว่าง 2.9-9.5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 9.6-40.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในคัพภะอยู่ระหว่าง 55.9-113.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 118.8 - 253.6 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในเยื่ออะลิวโรนอยู่ระหว่าง 63.1 - 96.4 มิลลิกรัม/กิโลกรัม และ 26.1 - 87.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของธาตุทั้งสองจากข้าวทั้ง 15 พันธุ์ ในส่วน

ต่างๆ ของเมล็ด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ธาตุเหล็กในคัพภะและเยื่ออะลิวโรนมีปริมาณความเข้มข้นมากที่สุดไม่แตกต่างกัน และมีความเข้มข้นมากกว่าข้าวกล้อง และ ข้าวขาว ถึง 7.5 และ 14.0 เท่า ตามลำดับ สำหรับธาตุสังกะสีพบว่ในคัพภะมีความเข้มข้นมากที่สุดเฉลี่ย 179.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ซึ่งมากกว่าในเยื่ออะลิวโรน 3.5 เท่า และมากกว่าในข้าวกล้องและข้าวขาวที่ความเข้มข้นน้อยที่สุดไม่แตกต่างกันถึง 6.4-8.9 เท่า ปริมาณความเข้มข้นธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวกล้องและข้าวขาว (Figure 1) มีความสัมพันธ์กันในเชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($r = 0.67^{***}$) เช่นเดียวกับกรณีธาตุสังกะสี ($r = 0.93^{***}$)

Table 2 Concentration of Fe and Zn in brown rice and white rice and different grain parts of 15 rice genotypes

Grain part	Fe (mg/kg)			Zn (mg/kg)		
	Mean	Range	%CV	Mean	Range	%CV
Brown rice	10.2 b ¹	6.3 - 16.2	27	28.7 a	17.3 - 59.2	45
White rice	5.5 a	2.9 - 9.5	33	20.6 a	9.6 - 40.2	57
Embryo	76.7 c	55.9 - 113.2	22	179.3 c	118.8 - 253.6	22
Aleurone	76.9 c	63.1 - 96.4	12	51.1 b	26.1 - 87.2	31

¹ The means marked with different letters in each element were significantly different from each other ($p < 0.05$).

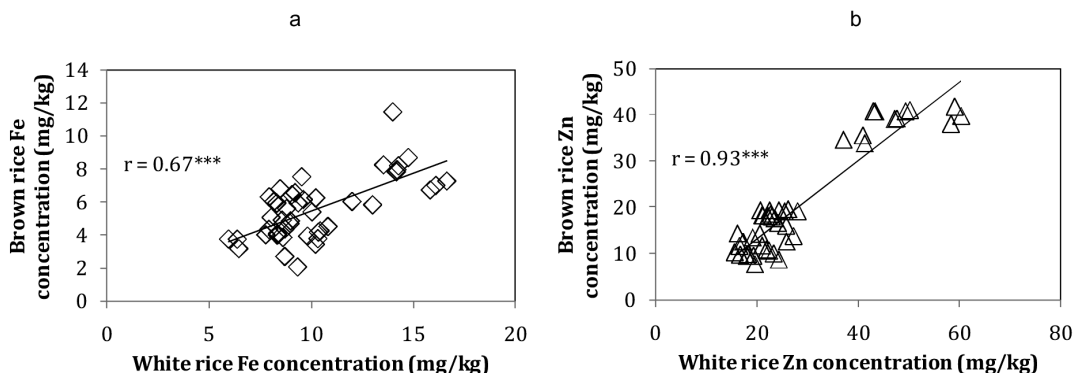


Figure 1 Relationship between brown rice and white rice concentration of Fe (a) and Zn (b) among 15 genotypes

การแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าว

การแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวพบว่ามีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าว และส่วนต่างๆ ของเมล็ดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) (Table 3) ข้าวทุกพันธุ์มีการแบ่งปันธาตุเข้าสู่คัพภะน้อยที่สุด แต่การปันส่วนเข้าสู่ข้าวขาวและอะลิวโรนมากขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ยกตัวอย่างเช่น CNT1 มีการปันส่วนเข้าสู่ข้าวขาว (53.0%) มากกว่าอะลิวโรน (29.7%) อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ SKN มีการปันส่วนเข้าสู่อะลิวโรน (55.8%) มากกว่าข้าวขาว (28.7%) (Figure 2a) การแบ่งปันธาตุเหล็กเข้าสู่ข้าว

ขาวมีความแปรปรวนค่อนข้างกว้าง พบในช่วงร้อยละ 28.7 – 55.8 มีเพียง 2 พันธุ์ คือ CNT1 และ RD29 เท่านั้นที่มีการแบ่งปันธาตุเหล็กสู่ข้าวขาวมากกว่าร้อยละ 50 ในทางตรงข้ามพบว่าข้าวทั้ง 15 พันธุ์มีการปันส่วนธาตุสังกะสีเข้าสู่ข้าวขาวมากเกินกว่าร้อยละ 50 ซึ่งอยู่ในช่วงร้อยละ 59.5 – 80.3 แต่มีความแปรปรวนระหว่างพันธุ์ในการปันส่วนเข้าสู่คัพภะและอะลิวโรน เช่น CNT1 มีการปันส่วนเข้าไปสู่คัพภะ (27.2%) มากกว่าเข้าสู่อะลิวโรน (13.3%) อย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ RD6 การปันส่วนเข้าไปสู่คัพภะและอะลิวโรน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ เป็นต้น (Figure 2b)

Table 3 Analysis of variance on Fe and Zn partitioning in different grain parts among 15 rice genotypes

Source	Fe partitioning		Zn partitioning	
	df	P	df	P
Genotype	14	ns	14	ns
Grain part	2	<0.001	2	<0.001
Genotype * Grain part	28	<0.001	28	<0.001

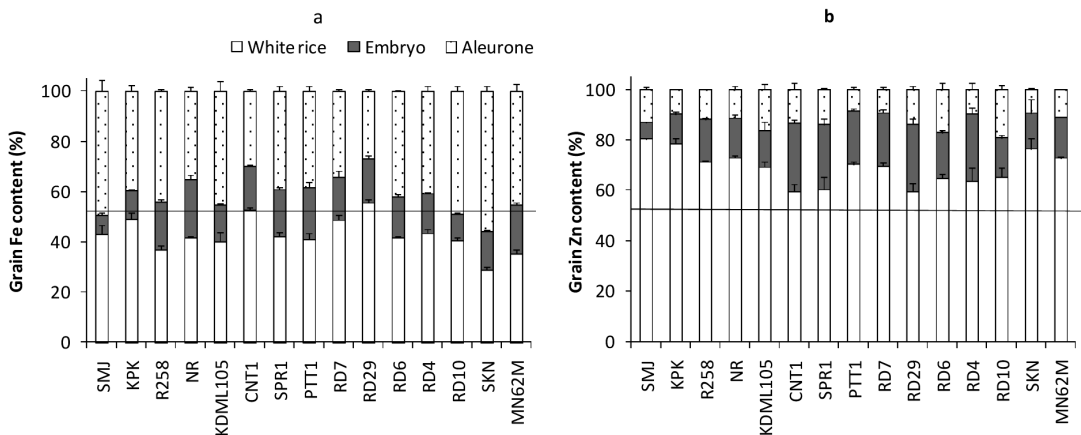


Figure 2 Partition of Fe (a) and Zn (b) among grain parts of 15 rice genotypes

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวกับการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ด

พบความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างความเข้มข้นธาตุเหล็กในข้าวขาวและการแบ่งปันธาตุเข้าสู่ส่วนของข้าวขาว ($r = 0.75^{***}$) (Figure 3a) แต่ปริมาณความเข้มข้นธาตุเหล็กในข้าวขาวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการแบ่งปันธาตุเหล็กเข้าสู่เยื่ออะลิวโรน ($r = -0.64^{***}$) (Figure 3b) ส่วนของคัพภะไม่พบว่ามีความสัมพันธ์กับ

ความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าว (Figure 3c) ในทำนองเดียวกันความสัมพันธ์ในเชิงบวกระหว่างความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวขาวและการแบ่งปันธาตุสังกะสีเข้าสู่ส่วนของข้าวขาว ($r = 0.76^{***}$) (Figure 4a) แต่ไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวขาวกับการแบ่งปันธาตุสังกะสีในเยื่ออะลิวโรน (Figure 4b) และพบว่าความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวขาวมีความสัมพันธ์เชิงลบกับการแบ่งปันธาตุสังกะสีไปสู่คัพภะ ($r = -0.72^{***}$) (Figure 4c)

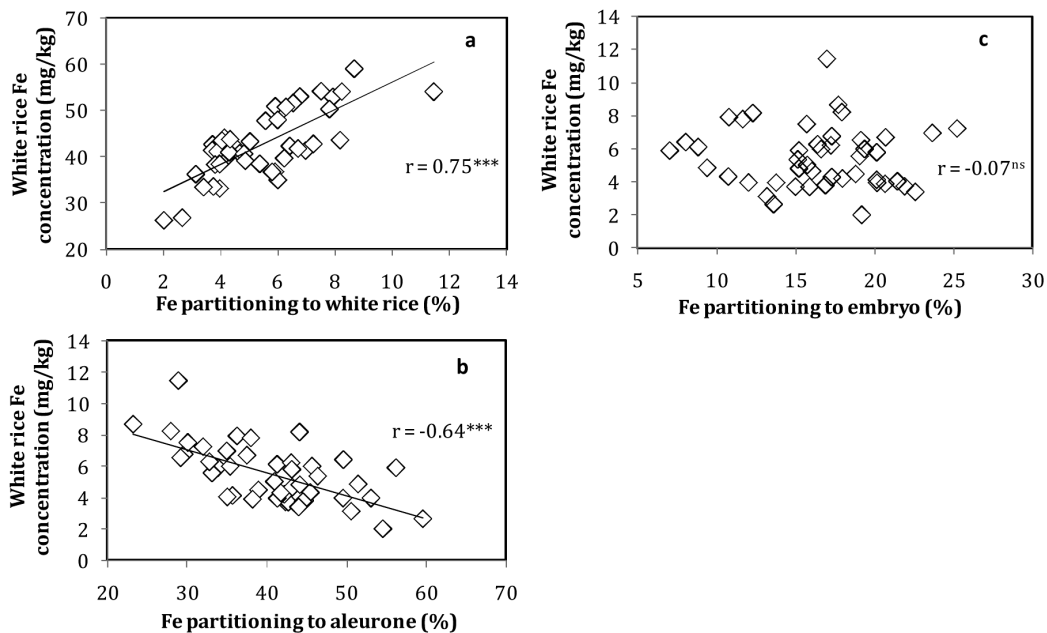


Figure 3 Relationship between Fe concentration in white rice and Fe partitioning to white rice (a), aleurone (b) and embryo (c)

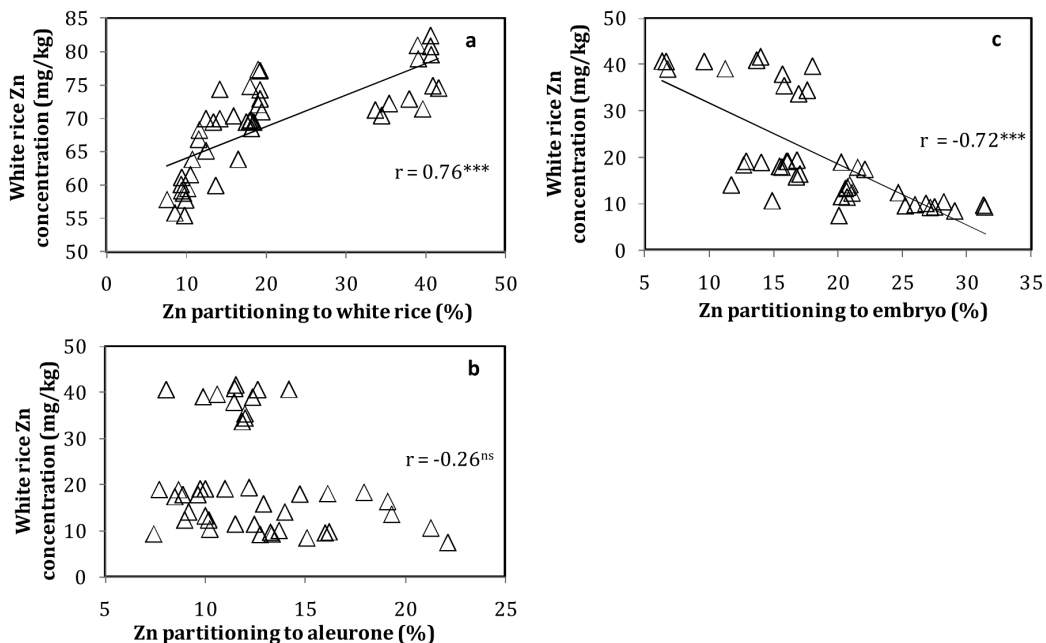


Figure 4 Relationship between Zn concentration in white rice and Zn partitioning to white rice (a), aleurone (b) and embryo (c)

วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองนี้บ่งชี้ว่าการปันส่วนของธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวมีผลต่อปริมาณความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาว ซึ่งเป็นรูปที่นิยมบริโภคมากที่สุด โดยจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวมีความสัมพันธ์ทางบวกกับการแบ่งปันธาตุทั้งสองเข้าสู่ข้าวขาว แสดงว่าการเพิ่มการแบ่งธาตุเหล็กและสังกะสีสามารถเพิ่มความเข้มข้นของธาตุทั้งสองในข้าวขาวด้วย แต่ในขณะเดียวกันกลับพบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กในข้าวขาว มีความสัมพันธ์ทางลบกับการแบ่งปันสู่ในอะลิวโรน และความเข้มข้นของธาตุสังกะสีในข้าวขาว มีความสัมพันธ์ทางลบกับการแบ่งปันสู่คัพภะ แสดงว่าถ้าต้องการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาว นอกจากจะต้องเพิ่มการแบ่งปันธาตุทั้งสองมายังข้าวขาวแล้ว ยังจะต้องลดการแบ่งปันธาตุเหล็กไปยังอะลิวโรนและธาตุสังกะสีไปยัง

คัพภะด้วย ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวนับว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากข้าวขาวเป็นแหล่งของสารอาหารที่สำคัญสำหรับผู้บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก จากการคำนวณค่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวตามความต้องการในการบริโภคของร่างกายแต่ละวัน พบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวควรจะมีอย่างน้อย 15 และ 28 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ จึงจะเพียงพอต่อความต้องการเฉลี่ยของร่างกายในแต่ละวันของประชากรในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งได้กำหนดโดย Harvest Plus program (Bouis and Welch, 2010)

จากการทดลองพบว่า มีความแปรปรวนของปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวในข้าวทั้ง 15 พันธุ์ โดยพบว่าพันธุ์ข้าวส่วนมากมีปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานความต้องการในการบริโภคที่กำหนด อย่างไรก็ตามพบว่ามีข้าวไร่ 4 พันธุ์ ที่มีปริมาณความเข้มข้นของธาตุสังกะสี

ในข้าวขาวสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (Figure 5) แต่มีธาตุเหล็กต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการก็ตาม อย่างไรก็ตาม ผลจากการทดลองนี้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคัดเลือกพันธุ์ เพื่อในการปรับปรุงพันธุ์ข้าวให้มีปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีสูงได้ต่อไป นอกจากนี้การทดลองนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวกล้องมีความสัมพันธ์ทางบวกกับความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาว บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของธาตุทั้งสองที่สูงในเนื้อเยื่อชั้นนอกของเมล็ดข้าว ยังส่งผลทำให้เนื้อเยื่อชั้นในของเมล็ดมีความเข้มข้นของธาตุอาหารดังกล่าวสูงไปด้วย ซึ่งข้อมูลดังกล่าวน่าจะสามารรถนำไปใช้ในการคัดเลือกพันธุ์เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงพันธุ์ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการประเมินความเข้มข้นของธาตุอาหารดังกล่าวในข้าวกล้องจะสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ใช้ตัวอย่างในปริมาณน้อย ไม่ต้องเสียเวลาในการนำไปขัดสีเป็นข้าวขาวเพื่อประเมินความเข้มข้นอีกขั้นตอนหนึ่ง ถึงแม้ว่าข้อมูลดังกล่าวจะมีความขัดแย้งกับรายงานของ Prom-u-thai et al. (2007a) ที่ทำการทดลองในข้าว

15 พันธุ์ที่มาจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ ออสเตรเลีย (9 พันธุ์) แอฟริกา (2 พันธุ์) จีน (1 พันธุ์) ญี่ปุ่น (1 พันธุ์) ลาว (1 พันธุ์) และ อียิปต์ (1 พันธุ์) และไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุเหล็กและธาตุสังกะสีในข้าวกล้องและข้าวขาว ซึ่งเป็นไปได้ว่าอาจจะเกิดจากความแตกต่างของพันธุกรรมข้าวที่ใช้ในการทดลองก็เป็นไปได้ จากงานทดลองก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นว่าขนาดและรูปร่างเมล็ดมีผลต่อความแปรปรวนในการสูญเสียธาตุทั้งสองในกระบวนการขัดขาว (Sison et al., 2006; Prom-u-thai et al., 2007b; Saenchai et al., 2012) อาจจะอธิบายการความสัมพันธ์ที่หายไประหว่างความเข้มข้นของข้าวกล้องและข้าวขาวได้ ความแปรปรวนของพันธุกรรมข้าวหมายถึงความแตกต่างของขนาดเมล็ด และส่วนต่างๆ ของเมล็ด อย่างเช่น เนื้อเยื่อเอ็นโดสเปิร์ม อะลิวโรน และคัพภะ ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญในการสะสมธาตุอาหารต่างๆ รวมทั้งธาตุเหล็กและสังกะสี ทำให้เกิดความแปรปรวนของปริมาณธาตุอาหารต่างๆ ในเมล็ดข้าวในข้าวพันธุ์ต่างๆ กัน

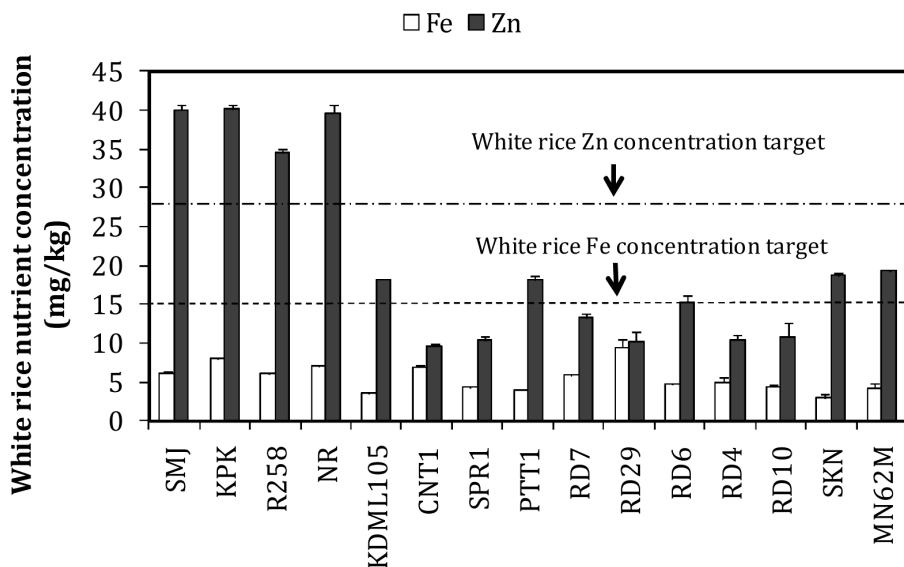


Figure 5 Fe and Zn concentration in white rice of 15 genotypes. The dash lines indicate the sufficient concentration of Fe and Zn in white rice required for a daily consumption (Bouis and Welch, 2010).

ความแปรปรวนระหว่างพันธุ์ในการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีระหว่างข้าวขาว อะลิโรน และคัพพะ อาจเนื่องมาจากในแต่ละส่วนของเมล็ดมีจำนวนแหล่งที่เป็นที่เก็บของธาตุเหล็กและสังกะสีแตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ protein body เป็นต้น Prom-u-thai et al. (2008) ได้รายงานไว้ว่า protein body ที่มี phytate น่าจะเป็นแหล่งเก็บธาตุเหล็กที่สำคัญเป็นหลักในข้าวขาว แต่จะพบ protein body ที่มี phytate เฉพาะในส่วนของอะลิโรนและคัพพะ และพบว่าพันธุ์ที่มีธาตุเหล็กสูงจะมีความหนาแน่นของ protein body มากกว่าในพันธุ์ที่มีธาตุเหล็กต่ำ ทำให้สันนิษฐานได้ว่า ขนาดของแหล่งใช้ (sink) ธาตุเหล็กในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวน่าจะเป็นตัวควบคุมปริมาณการแบ่งปันของธาตุเหล็กไปยังส่วนต่างๆ เมล็ด เป็นสาเหตุทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างพันธุ์ดังผลการทดลองนี้ ในกรณีของธาตุสังกะสี จนถึงปัจจุบันยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าถูกเก็บไว้ในรูปใดในเมล็ดข้าว จากรายงานโดย Persson et al. (2011) แสดงให้เห็นว่า สังกะสีที่อยู่ในข้าวขาวส่วนใหญ่จับตัวอยู่กับโปรตีน แต่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นโปรตีนชนิดใด และคุณสมบัติอย่างไร แต่อย่างไรก็ตามการพบว่า ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60 ของปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวก่อนถูกแบ่งปันเข้าสู่ข้าวขาว ในการทดลองนี้อาจเนื่องมาจากธาตุสังกะสีเป็นธาตุที่มีความเกี่ยวข้องกับเอนไซม์ในกระบวนการสร้างแป้ง (Marschner, 1995) ทำให้มีการแบ่งปันธาตุสังกะสีเข้าไปในส่วนของข้าวขาวมากกว่าส่วนอื่นของเมล็ดข้าว เมื่อเปรียบเทียบกับธาตุเหล็กที่พบว่ามีการสะสมอยู่ในส่วนของข้าวขาวน้อยมาก

การทดลองนี้บ่งชี้ว่า มีความแปรปรวนของการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีไปยังเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของเมล็ดแตกต่างกันในข้าวแต่ละพันธุ์ ซึ่งมีผลต่อปริมาณความเข้มข้นในข้าวขาวที่บริโภคกันเป็นจำนวนมากสำหรับผู้บริโภคข้าว โดยพบว่าการเพิ่มการแบ่งปันธาตุเหล็กและธาตุสังกะสีไปยังข้าวขาว จะเป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้ความเข้มข้นดังกล่าวในข้าวขาวเพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงข้ามถ้าหากมีการแบ่งปันธาตุอาหารไปยังส่วนคัพพะและอะลิโรน (รวมกันคือรำ) ทำให้

ความเข้มข้นในข้าวขาวลดลงด้วย สอดคล้องกับรายงานของ Prom-u-thai (2007a) พบว่าความเข้มข้นของข้าวขาวมีความสัมพันธ์ทางลบกับการแบ่งปันธาตุเหล็กไปส่วนที่เป็นรำ ในส่วนของรำนับพบว่า มีโปรตีนซึ่งเป็นแหล่งเก็บธาตุทั้งสองอย่างหนาแน่น (Prom-u-thai et al., 2008; Wang et al., 2011) ดังนั้นการแบ่งปันธาตุทั้งสองชนิดนี้ ข้าวขาวน่าจะขึ้นอยู่กับการของแหล่งใช้ธาตุอาหารในข้าวขาวของข้าวแต่ละพันธุ์ ดังนั้นการแบ่งปันธาตุเหล็กและสังกะสีในส่วนต่างๆ ของเมล็ดข้าวยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมอีกมาก ทั้งในเรื่องกระบวนการชีวเคมีและกระบวนการทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการแบ่งปันและปริมาณความเข้มข้นของธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาว เพื่ออธิบายกระบวนการมีผลต่อการแบ่งปันธาตุทั้งสองชนิดในส่วนของข้าวขาวบ้าง แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคัดเลือกพันธุ์ข้าว และการจัดการทางการเกษตรด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในข้าวขาวได้

คำขอบคุณ

ขอบคุณโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย มูลนิธิแมคไนท์ และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้งานโครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Allan, J.E. 1961. The determination of zinc in agricultural materials by atomic-absorption spectrophotometry. Analyst. 86: 530-534.
- Bouis, H.E., and R.M. Welch. 2010. Biofortification - a sustainable agricultural strategy for reducing micronutrient malnutrition in the global south Crop Sci. 50: S-20-S-32.
- FAO/WHO. 2002. Human vitamin and mineral requirements Report of joint FAO/WHO expert consultation, Rome.

- Graham, R., D. Senadhira, S. Beebe, C. Iglesias, and I. Monasterio. 1999. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crop Res.* 60: 57-80.
- Hotz, C., and K.H. Brown, (eds.) 2004. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control, Vol. 25, pp. 1-S91-S204. *Food and Nutrition Bulletin*.
- Kennedy, G., G. Nantel, and P. Shetty. 2003. The scourge of "hidden hunger": global dimensions of micronutrient deficiencies. *Food Nutr Agri.* 32: 8-16.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. second ed. Academic Press, London.
- Oparka, K.J., and P. Gates. 1981. Transport of assimilates in the developing caryopsis of rice (*Oryza sativa* L.). *Planta*. 152: 388-396.
- Oparka, K.J., and P. Gates. 1984. Sink anatomy in relation to solute movement in rice (*Oryza sativa* L.): A summary of findings. *Plant Growth Regul.* 2: 297-307.
- Persson, D.P., T.H. Hansen, S. Husted, and J.K. Schjoerring. 2011. Exploring the Zn-binding properties of the storage proteins in rice, In: I. Cakmak, (ed.) 3rd International Zinc Symposium, Hyderabad, India, 10-14 October 2011.
- Pfeiffer, W.H., and B. McClafferty. 2007. HarvestPlus: breeding crops for better nutrition. *Crop Sci.* 47: S-88-105.
- Phattarakul, N., B. Rerkasem, L.J.L. & L.H. Wu, C.Q. Zou, H. Ram, V.S. Sohu, B.S. Kang, H. Surek, M. Kalayci, A. Yazici, F.S. Zhang, and I. Cakmak. 2012. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant Soil*. 361: 131-141.
- Prom-u-thai, C., S. Fukai, I.D. Godwin, and L. Huang. 2007a. Genotypic variation of iron partitioning in rice grain. *J Sci Food Agr.* 87: 2049-2054.
- Prom-u-thai, C., C. Sanchai, B. Rerkasem, S. Jamjod, S. Fukai, I.D. Godwin, and L. Huang. 2007b. Effect of grain morphology on degree of milling and iron loss in rice. *Cereal Chem.* 84: 384-388.
- Prom-u-thai, C., L. Huang, B. Rerkasem, G. Thomson, J. Kuo, M. Saunders, and B. Dell. 2008. Distribution of protein bodies and phytate-rich inclusions in grain tissues of low and high iron rice genotypes. *Cereal Chem.* 85: 257-265.
- Saenchai, C., C. Prom-u-thai, S. Jamjod, B. Dell, and B. Rerkasem. 2012. Genotypic variation in milling depression of iron and zinc concentration in rice grain. *Plant Soil*. 361: 271-278.
- Wang, K.M., J.G. Wu, G. Li, D.P. Zhang, Z.W. Yang, and C.H. Shi. 2011. Distribution of phytic acid and mineral elements in three indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *J Cereal Sci.* 54: 116-121.
- Welch, R.M., and R.D. Graham. 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *J Exp Bot.* 55: 353-364.
- WHO. 2008. Worldwide prevalence of anaemia 1993–2005: WHO global database on anaemia World Health Organization., Geneva, Switzerland.