บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ปัญหาและผลกระทบของการขาดธาตุเหล็กและสังกะสีในประชากรโลก

ปัจจุบันประชากรทั่วโลกหลายพันล้านคนกำลังประสบกับปัญหาการขาดสารอาหารจุลธาตุ (micronutrients malnutrition) โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการขาดธาตุเหล็กและสังกะสี ซึ่งนับได้ว่าเป็นปัญหาใหญ่ที่มีการแพร่กระจายในหลายๆ ประเทศ ทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและกำลังพัฒนา โดยภาวะขาดธาตุเหล็กและสังกะสีถูกจัดให้เป็นปัจจัยเสี่ยงอันดับหนึ่งในห้าที่จะนำไปสู่ปัญหาสุขภาพต่างๆ ได้ (Allen et al., 2006) โดยมีรายงานว่าประชากรโลกกว่าร้อยละ 37 ป่วยเป็นโรคโลหิตจางเนื่องจากการขาดธาตุเหล็กและร้อยละ 30 อยู่ในอัตราเสี่ยงต่อการขาดธาตุสังกะสี ซึ่งปัญหาการขาดธาตุเหล็กและสังกะสีนี้พบมากโดยเฉพาะประชากรในแถบทวีปเอเชียและอาฟริกา ซึ่งมีการขาดธาตุเหล็กถึงร้อยละ 40-60 และธาตุสังกะสีร้อยละ 10-60 (Benoist et al., 2008; Carnevale et al., 2007) สำหรับประเทศไทยจากรายงานการสำรวจการขาดธาตุเหล็กพบว่าเด็กในช่วงก่อนวัยเรียนมีภาวะโลหิตจางจากการขาดธาตุเหล็กถึงร้อยละ 25 และร้อยละ 40 ในหญิงวัยเจริญพันธุ์ (กองโภชนาการ กรมอนามัย, 2549; Benoist et al., 2008) นอกจากนั้นยังพบในเด็กช่วงอายุ 6-14 ปี ถึงร้อยละ 13.7 หรือประมาณ 1.5 ล้านคนทั่วประเทศ โดยเฉพาะทางภาคอีสาน เช่นที่จังหวัดขอนแก่น พบถึงร้อยละ 30.5 (กมลมาลย์, 2546) สำหรับการขาดธาตุสังกะสีในประเทศไทยพบว่าประชากรในประเทศมีภาวะเสี่ยงต่อการขาดธาตุสังกะสีถึงร้อยละ 41.6 (Hotz and Brown, 2004)

สาเหตุของการขาดธาตุเหล็กและสังกะสีนั้นส่วนใหญ่เกิดจากการได้รับหรือบริโภคธาตุเหล็กและสังกะสีไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย หรืออาจบริโภคในปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการแต่ร่างกายไม่สามารถดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยที่ขัดขวางการดูดซึมของธาตุเหล็กและสังกะสีในร่างกายเป็นต้น ผู้ที่มีความเสี่ยงต่อการขาดธาตุอาหารเหล่านี้มากที่สุด ได้แก่ ทารก เด็ก วัยรุ่น และในหญิงให้นมบุตร (สิริพันธุ์ , 2541; Barasi, 2003) สำหรับอาการของผู้ที่ขาดธาตุเหล็กนั้นจะแสดงออกมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสาเหตุของการขาดว่ารุนแรงมากน้อยแค่ไหน โดยทั่วไปผู้ที่ขาดธาตุเหล็กจะมีอาการอ่อนเพลีย เหนื่อยง่าย กล้ามเนื้ออ่อนแอ ไร้ความรู้สึก มีความอยากอาหารลดลง ระบบการย่อยอาหารไม่ดี เล็บเปราะหรือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

งอ ผอมแห้ง ผิวซีด นอกจากนั้นการขาดธาตุเหล็กยังเป็นสาเหตุให้ร่างกายสามารถติดเชื้อได้ง่าย และทำให้ระบบภูมิคุ้มกันต่างๆ ลดลงอีกด้วย สำหรับเด็กที่ขาดธาตุเหล็กในช่วงอายุ 2 ขวบแรกจะมีผลทำให้พัฒนาการทางด้านร่างกายและจิตใจแย่ลง เด็กจะมีพัฒนาการด้านสติปัญญา ประสิทธิภาพในการเรียนรู้ต่ำกว่าปกติ มีอาการซึมเศร้า ไม่กระตือรือร้น ความจำเสื่อม มีพัฒนาการทางด้านร่างกายช้า (Barasi et al., 2003) ในผู้ใหญ่อาจทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดต่ำลง สำหรับหญิงตั้งครรภ์ที่ขาดเหล็กจะมีอัตราการเสียชีวิตของแม่และลูกในครรภ์เพิ่มขึ้นในการคลอด และเด็กมีโอกาสคลอดก่อนกำหนด (ศักดา , 2546; สิริพันธุ์, 2541; Barasi, 2003; Bogert et al., 1996; Schlenker and Long, 2007)

การขาดธาตุสังกะสีมีผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง ร่างกายแคระแกรน แผลหายช้า สูญเสียความไวในการรับรสหรือกลิ่น ไม่อยากอาหาร กระดูกผิดปกติ ผิวหนังที่มือหรือเท้าอักเสบ ด้านระบบสืบพันธุ์จะทำให้ความพร้อมในการสืบพันธุ์ช้าหรืออาจเป็นหมันได้โดยเฉพาะในเพศชาย (ศักดา, 2546; สิริพันธุ์, 2541; Barasi, 2003; Bogert et al., 1996; Schlenker and Long, 2007) ทำให้ขนาดและโครงสร้างของต่อมลูกหมากผิดปกติ ซึ่งต่อมลูกหมากนี้เป็นอวัยวะที่มีสังกะสีเป็นส่วนประกอบมากที่สุด และหากขาดสังกะสี ทองแดง และวาเนเดียมจะทำให้ภาวะหลอดเลือดแดงแข็ง นอกจากนั้นยังพบว่าการบริโภคแคดเมียมในปริมาณที่มากจะเป็นผลทำให้อาการขาดธาตุสังกะสีรุนแรงยิ่งขึ้น (สิริพันธุ์, 2541)

2.2 บทบาทและหน้าที่ของธาตุเหล็กและสังกะสีในคนและพืช

2.2.1 ธาตุเหล็กและสังกะสีในโภชนาการของคน

ธาตุเหล็ก (Iron, Fe)

ในคนปกติจะมีเหล็กในร่างกายประมาณ 40-50 มิลลิกรัม/น้ำหนักคนหนึ่งกิโลกรัม ธาตุเหล็กในร่างกายจะอยู่ในรูปต่างๆ 4 รูปแบบ ได้แก่

- Hemoglobin โดยประมาณร้อยละ 70 ของธาตุเหล็กทั้งหมดจะอยู่ในเม็ดเลือดแดง โดยเป็นส่วนประกอบของเฮโมโกลบิน และธาตุเหล็กร้อยละ 5 จะอยู่ในกล้ามเนื้อ โดยเป็นองค์ประกอบของสารที่เรียกว่า ไมโอโกลบิน (myoglobin)
- Storage iron มีประมาณร้อยละ 20-30 ของธาตุเหล็กในร่างกาย ซึ่งเป็นธาตุเหล็กที่เหลือจากการใช้งานและจะถูกเก็บสะสมไว้จะเก็บไว้ที่ตับ ม้าม และไขกระดูกในรูปของ ferritin และ mosiderin เพื่อเก็บไว้ใช้ในเวลาที่ร่างกายต้องการ
- Cellular iron ประมาณร้อยละ 5 ของธาตุเหล็กจะอยู่ในเซลล์ของร่างกายโดยเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- Transport iron ธาตุเหล็กในรูปนี้จะพบอยู่เล็กน้อย ประมาณ 3 มิลลิกรัม ซึ่งจะพบในน้ำเลือดคือพลาสมา เหล็กที่พบในเลือดจะเป็นเหล็กที่อยู่ในสภาพขนส่ง เรียกว่า transferring ที่จะขนส่งเหล็กจากเนื้อเยื่อหนึ่งไปยังอีกเนื้อเยื่อหนึ่ง (Schlenker and Long, 2007)

หน้าที่หลักของธาตุเหล็ก คือจะทำงานร่วมกับโปรตีนและทองแดง เพื่อสร้างเฮโมโกลบิน ซึ่งเฮโมโกลบินจะทำหน้าที่ในการพาออกซิเจนไปใช้ในการหายใจในเซลล์และกระบวนการเมตาบอลิซึม เป็นตัวส่งออกซิเจนจากปอดไปยังอวัยวะต่างๆ และเก็บเอาของเสีย คือคาร์บอนไดออกไซด์คืนให้กับปอดเพื่อกำจัดออกไป นอกจากนั้นยังช่วยในการสร้าง ไมโอโกลบิน ซึ่ง จะช่วยขนส่งออกซิเจนให้กับเซลล์กล้ามเนื้อ ธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบของโปรตีนและน้ำย่อยหลายชนิด เพื่อออกซิไดซ์กลูโครสและสารอาหารอื่นๆ เพื่อให้ได้พลังงาน โดยเอนไซม์ที่มีธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบ เช่น คะตะเลส และ รีดั๊กเทส เป็นต้น นอกจากนั้นธาตุเหล็กยังจำเป็นในการเจริญเติบโตของร่างกายและยังมีส่วนช่วยในการทำงานของสมองและความจำอีกด้วย (ศักดา , 2546; สิริพันธุ์, 2541; Barasi, 2003; Bogert et al., 1996; Schlenker and Long, 2007)

ปริมาณของธาตุเหล็กที่ร่างกายต้องได้รับในแต่ละวัยนั้นจะแตกต่างกันไป โดยในวัยเด็กจะต้องการธาตุเหล็กวันละ 10 มก./วัน ในหญิงที่มีอายุตั้งแต่ 19-50 ปี จะอยู่ที่ 18 มก./วัน และ 8-10 มก./วัน ในชายที่มีอายุ 19 ปีขึ้นไปและหญิงวัยหมดประจำเดือน สำหรับหญิงตั้งครรภ์จะมีความต้องการปริมาณธาตุเหล็กในแต่ละวันเพิ่มมากขึ้น โดยต้องการวันละ 30 มิลลิกรัมขึ้นไป และจะลดลงเมื่ออยู่ในช่วงให้นมบุตร คือ 15 มก./ วัน

แหล่งของธาตุเหล็กในอาหาร ปกติแล้วอาหารทั่วไปจะมีธาตุเหล็กประมาณ 4-6 มก./ 1000 แคลอรี่ (สิริพันธุ์, 2541; Schlenker and Long, 2007) ธาตุเหล็กที่อยู่ในอาหารจะมี 2 รูปแบบ คือ ฮีม (heme) ได้จากอาหารที่มาจากเนื้อสัตว์ และนอนฮีม (non heme) ได้จากอาหารที่มาจากพืช (Barasi, 2003) อาหารที่มีธาตุเหล็กมาก ได้แก่ เนื้อสัตว์ สัตว์ปีก เช่น เป็ด ไก่ ตับ ม้าม ปลา ไข่แดง ถั่วอบแห้ง ซีเรียล ขนมปังโฮลเกรน เป็นต้น (สิริพันธุ์, 2541; Barasi, 2003; Schlenker and Long, 2007)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ธาตุสังกะสี (Zinc, Zn)

ธาตุสังกะสีจัดได้ว่าเป็นแร่ธาตุที่ต้องการรองจากธาตุเหล็ก และเป็นสารอาหารที่จำเป็นในทุกช่วงของอายุ โดยเฉพาะในช่วงระยะการเจริญเติบโตของร่างกาย เช่น วัยทารก เด็ก วัยหนุ่มสาว ในหญิงตั้งครรภ์และให้นมบุตร ปกติร่างกายผู้หญิงจะมีธาตุสังกะสีประมาณ 1.5 กรัม และผู้ชายประมาณ 2.5 กรัม ธาตุสังกะสีในร่างกายส่วนใหญ่พบในตับ กระดูก เนื้อเยื่อ เลือด ของเหลว และสารคัดหลั่ง ซึ่งร้อยละ 75 ของสังกะสีในเลือดอยู่ในเม็ดเลือดแดง ธาตุสังกะสีมีความสำคัญใน

การสังเคราะห์และเมตาบอลิซึมของกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) และโปรตีน จำเป็นในการสังเคราะห์ กรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA) และกรดไรโบนิวคลีอิก (RNA) นอกจากนั้นยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์กว่า 100 ชนิดและฮอร์โมนหลายตัวในร่างกาย ซึ่งมีความสำคัญในการรักษาสภาพปกติของผนังเซลล์ และเกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของร่างกายและการพัฒนาของอวัยวะสืบพันธุ์ด้วย ช่วยรักษาบาดแผลให้แผลหายเร็ว นอกจากนั้นยังเกี่ยวข้องกับการรับรู้รสและระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

สำหรับความต้องการธาตุสังกะสี พบว่า ปกติแล้วร่างกายจำเป็นต้องได้รับธาตุสังกะสีในทุกๆ วัน สำหรับเด็กทารกและเด็กเล็กต้องการวันละ 5-10 มิลลิกรัม วัยรุ่นและผู้ใหญ่วันละ 15 มิลลิกรัม ในหญิงตั้งครรภ์และให้นมบุตรจะต้องการธาตุสังกะสีในปริมาณที่มากขึ้นเพื่อพัฒนาการของทารกและเด็กวัยแรกเกิด คือ มากกว่า 10 มก./วัน แหล่งอาหารที่มีธาตุสังกะสีสูงส่วนใหญ่จะเป็นอาหารทะเล โดยเฉพาะพวกหอย เช่น หอยนางรม และปลาเฮอริง เนื้อสัตว์ เครื่องใน ไข่ และพืช เช่น ถั่ว ชา ธัญพืชต่างๆ และโกโก้ ส่วนในผักและผลไม้มีน้อย ร่างกายดูดซึมได้ไม่ดี เนื่องจากมีใยอาหารและไฟเตต ซึ่งจะไปจับกับสังกะสีทำให้ร่างกายดูดซึมได้น้อยลง (ศักดา, 2546; สิริพันธุ์, 2541; Barasi, 2003; Schlenker and Long, 2007)

ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวัน (มก./วัน)

ภาวะ	อายุ	ธาตุเหล็กที่ควรได้รับ (มก./วัน)	ธาตุสังกะสีที่ควรได้รับ (มก./วัน)
ทารก	3-11 เดือน	6-8	5
เด็ก (ชาย หญิง)	1-9 ปี	10	10
เด็กชาย	10-15 ปี	12	15
	16-19 ปี	10	15
เด็กหญิง	10-19 ปี	15	15
ผู้ใหญ่เพศชาย	20-59 ปี	10	15
ผู้ใหญ่เพศหญิง	15-49 ปี	15	15
	50-59 ปี	10	15
ผู้ใหญ่ (ชาย หญิง)	60+	10	15
หญิงตั้งครรภ์		+30	+5
หญิงให้นมบุตร		15	+10

ที่มา ศักดา (2546)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 ธาตุเหล็กและสังกะสีในโภชนาการของพืช

ธาตุเหล็กและสังกะสีจัดเป็นธาตุอาหารจุลภาค (micronutrient) แม้ว่าพืชจะต้องการธาตุอาหารเหล่านี้ในปริมาณน้อยแต่พืชไม่สามารถขาดได้ หากขาดพืชจะไม่สามารถเจริญเติบโตได้ตามปกติ

ธาตุเหล็ก (Fe)

ธาตุเหล็กเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญมากในพืช โดยเฉพาะในระบบรีดอกซ์ (redox system) และกระบวนการสร้างพลังงานของพืช โดยธาตุเหล็กจะเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างและเป็นปัจจัยร่วม (Co factor) ของเอ็นไซม์ในเซลล์พืช นอกจากนั้นในปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (oxidation) และรีดักชั่น (reduction) นั้นจะเกี่ยวพันอยู่กับระบบที่มีธาตุเหล็กอยู่ด้วย หน้าที่สำคัญที่สุดของธาตุเหล็กในพืชชั้นสูงทุกชนิด คือ เป็นส่วนประกอบของกระบวนการทางชีวเคมีของระบบรีดอกซ์ เช่น กระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจ (Helliwell and Gutteridge, 1986) การกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ (Marschner, 1995) การนำพาออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการตรึงไนโตรเจน (เล็กเฮโมโกลบินในแบคทีเรียของปมรากถั่ว) (Werner et al., 1981)

ธาตุเหล็กที่มีบทบาทในพืชจะอยู่ในรูปของฮีม (heme) และนอนฮีม (non heme) โดยพบว่าร้อยละ 9 ของธาตุเหล็กที่สะสมอยู่ในใบพืชนั้นอยู่ในรูปของฮีม (Hewitt, 1983) ส่วนธาตุเหล็กในรูปของนอนฮีมจะพบประมาณร้อยละ 19 ของเหล็กในต้นพืช โดยจะพบในส่วนของเฟอร์รีดอกซิน (ferredoxin) ไทด์ลาคอย (thylakoid complexes) ไมโตรคอนเดรียล (mitrochondrail complexes) และในเอนไซม์ เช่น อะโคนิเทส (aconitase) และไนเตรทรีดักเทส (nitrate reductase) เป็นต้น ส่วนธาตุเหล็กที่เหลือประมาณร้อยละ 35 จะอยู่ในรูปของเฟอร์ริติน (ferritin) (Hewitt, 1983) ซึ่งธาตุเหล็กในรูปนี้ส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในคลอโรพลาสต์ โดยพบว่า ร้อยละ 80 ของธาตุเหล็กในใบพืชจะอยู่ในคลอโรพลาสต์ ซึ่งจะมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (Marschner, 1995) ธาตุเหล็กที่เก็บสะสมในรูปของเฟอร์ริตินนี้สามารถช่วยแก้ไขปัญหาการเก็บสะสมของธาตุเหล็กในระยะยาวได้ เนื่องจากธาตุเหล็กในรูปนี้ไม่เป็นพิษต่อพืช (Briat et al., 1995) ดังนั้นร้อยละ 92 ของธาตุเหล็กในเมล็ดจะถูกเก็บสะสมไว้ในรูปนี้ (Marents and Grusak, 1998) ส่วนที่เหลือจะอยู่ในไซโตพลาสซึม และอวัยวะอื่นๆ ในรูปของฮีมโปรตีน (heme proteins) และโปรตีนที่มีเหล็กและกำมะถัน (Fe-S proteins) (Miller et al., 1995)

ในรูปของฮีมโปรตีน ธาตุเหล็กจะเป็นองค์ประกอบโครงสร้างของ พอร์ไฟริน (porphyrin) โมเลกุล เช่น ไซโตโครม (cytochrome) เฟอร์ริโครม (ferrichrome) และเล็ก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เฮโมโกลบิน (leghemoglobin) เป็นต้น ซึ่งไซโตโครมจะมีบทบาทสำคัญในระบบรีดอกซ์ของคลอโรพลาสต์และไมโตรคอนเดรีย สำหรับไซโตโครม b_6 และ ไซโตโครม f ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของระบบสังเคราะห์แสง II (photosystem II) ส่วนไซโตโครม b ไซโตโครม c ไซโตโครม a และ ไซโตโครม a-3 จะมีบทบาทในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน โดยการเปลี่ยนรูปไปมาระหว่างเฟอรัสกับเฟอริกไอออน และการสังเคราะห์ ATP ในวัฏจักรเครบส์ และเป็นตัวกลางสำคัญในการหายใจของพืช สำหรับธาตุเหล็กที่อยู่ในรูปของโปรตีนที่มีเหล็กและกำมะถัน เช่น เฟอร์ริด็อกซิน (ferredoxin) จะทำหน้าที่เป็นตัวส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการที่สำคัญ เช่น การสังเคราะห์แสง การรีดิวซ์ไนเตรต์ การรีดิวซ์ซัลเฟต และการตรึงไนโตรเจน นอกจากนั้น ธาตุเหล็กยังทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ เช่น ไซโตรโครมออกซิเดส (cytochrome oxidase) อโคนิเทส (aconitase) คะตะเลส (catalase) เพอร์ออกซิเดส (peroxidase) และไนโตรจีเนส (nitrogenase) เป็นต้น (จักรี, 2539; ยงยุทธ, 2543; Marschner, 1995) นอกจากนี้ธาตุเหล็กยังเป็นส่วนประกอบของไฟโตเฟอร์รีติน (phytoferretin) ซึ่งเป็นแหล่งสำรองเหล็กไว้ใช้ยามขาดแคลน และเป็นแหล่งป้องกันการเป็นพิษของเหล็กในกรณีที่มีมากเกินไป (ยงยุทธ , 2543; ศุภลักษณ์, 2549; สุวพันธ์, 2543) เมื่อพืชได้รับธาตุเหล็กในปริมาณไม่เพียงพอจะทำให้การสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของพืชลดลง ทำให้เกิดภาวะพล่องคลอโรฟิลล์ (chlorosis) เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ยากอาการจึงเกิดที่ใบอ่อนก่อน (Matsuo, 1995)

ธาตุสังกะสี (Zn)

ธาตุสังกะสีนับได้ว่าเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อพืชหลายอย่าง โดยมีหน้าที่หลัก ได้แก่ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์กว่า 70 ชนิด ช่วยในการกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์บางชนิด เกี่ยวข้องกับการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน (Alloway, 2008) สังเคราะห์ทริพโทเฟน (tryptophane) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์กรดอินโดลแอซีติกหรือออกซิน (IAA) ช่วยรักษาเยื่อเซลล์ให้คงสภาพและทำหน้าได้ตามปกติ นอกจากนั้นยังเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และการสร้างเมล็ดของพืชด้วย (ยงยุทธ, 2543; สุวพันธ์, 2543; Alloway, 2008; Marschner, 1995) ปกติแล้วรากพืชเมื่อดูดธาตุสังกะสีส่วนใหญ่จะต้องส่งไปยังยอดอ่อนและดอกก่อน เนื่องจากบริเวณหลอดละอองเรณู (pollen tube) และเนื้อเยื่อเจริญส่วนปลายนั้นเป็นส่วนที่ต้องการธาตุสังกะสีในปริมาณที่มากพอจึงจะสามารถสังเคราะห์โปรตีนได้ ในใบข้าวปกติจะมีสังกะสี 18 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง แต่ในขณะที่ส่วนของเนื้อเยื่อเจริญส่วนปลายยอดจะมีธาตุสังกะสีมากกว่าถึง 10 เท่า (204 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง) สำหรับหลอดละอองเรณูจะมีประมาณ 50-150 ไมโครกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง (ยงยุทธ, 2543;

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Alloway, 2008; Marschner, 1995)

บทบาทหน้าที่ของธาตุสังกะสีที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์นั้น พบว่า หน้าที่หลักของธาตุสังกะสีในเอนไซม์มีสามอย่าง คือ 1) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา (catalytic) 2) เป็นตัวร่วมในการเร่งปฏิกิริยา (cocatalytic) และ 3) ทำหน้าที่เชิงโครงสร้าง (structural) (Barker and Pilbeam, 2007; Marschner, 1995) ธาตุสังกะสีทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์คาร์บอนิก แอนไฮเดรส (carbonic anhydrase) ซึ่งจะพบในส่วนของไซโทพลาสซึมและคลอโรพลาสต์ หน้าที่ของเอนไซม์นี้ คือ ช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์แสง (Barker and Pilbeam, 2007) ทำหน้าที่เชิงโครงสร้างของแอลกอฮอล์ ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase) เอนไซม์นี้ช่วยเร่งปฏิกิริยารีดักชันของแอซีทาลดีไฮด์ไปเป็นเอทานอล ซึ่งการสร้างเอทานอลจะเกิดในส่วนของเนื้อเยื่อเจริญของพืชชั้นสูงในสภาพที่มีออกซิเจน เช่น บริเวณปลายราก (Barker and Pilbeam, 2007; Marschner, 1995) ข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำขังกิจกรรมของเอนไซม์นี้จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในสภาพที่มีธาตุสังกะสีเพียงพอเมื่อเทียบกับข้าวที่ขาดธาตุนี้ หากเอนไซม์ชนิดนี้ลดลงจะทำให้รากข้าวทำหน้าที่ไม่สมบูรณ์ในสภาพที่ขาดออกซิเจน (ยงยุทธ , 2543; Barker and Pilbeam, 2007; Marschner, 1995) นอกจากนั้นธาตุสังกะสียังเป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของเอนไซม์อีกหลายชนิด เช่น แอลคาไลน์ ฟอสฟาเทส (alkaline phosphatase) ฟอสฟอลิเพส (phospholipase) คาร์บอกซี เพ็บทิเดส (carboxy peptidase) และ อาร์เอ็นเอ พอลิเมอร์เรส (RNA polymerase) ซึ่งเอนไซม์นี้มีส่วนในการสังเคราะห์โปรตีน และยังมีเอนไซม์จำนวนมากที่ต้องการธาตุสังกะสีมาช่วยกระตุ้นกิจกรรม เช่น แอลโดเลส (aldolases) ไอโซเมอเรส (isomerases) เป็นต้น นอกจากนั้นธาตุสังกะสียังมีบทบาทในกระบวนการเมตาบอลิซึมของดีเอ็นเอ อาร์เอ็นเอ การสังเคราะห์โปรตีนและการแบ่งเซลล์ (Marschner, 1995)

พืชที่ขาดธาตุสังกะสีจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงและมีโครงสร้างของคลอโรพลาสต์ผิดปกติ และทำให้การสังเคราะห์แสงรวม (net photosynthesis) ลดลงประมาณ 50-70% ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชและระดับความรุนแรงของการขาด เนื่องจากการขาดธาตุสังกะสีจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรสลดลง (Alloway, 2008; Barker and Pilbeam, 2007) และยังทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ฟรุกโทส -1,6 บิสฟอสฟาเทสและเอนไซม์แอลโดส ลดลง ซึ่งเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้มีผลต่อการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต โดยส่งผลให้การสังเคราะห์ซูโครสและแป้งลดลง (Marschner, 1995) พืชที่ขาดธาตุสังกะสีจะมีอัตราการสังเคราะห์โปรตีนลดลง ในขณะที่การสะสมของกรดอะมิโนเพิ่มขึ้น (ยงยุทธ, 2543; Alloway, 2008; Matsuo, 1995; Marschner; 1995) ในใบถั่วที่ขาดธาตุสังกะสีจะมีกรดอะมิโนเพิ่มขึ้นประมาณ 6 เท่า ในขณะที่ปริมาณโปรตีนกลับลดลง แต่เมื่อพืชได้รับธาตุนี้อย่างพอเพียงปริมาณโปรตีนจะกลับเพิ่มขึ้นใหม่ (Alloway, 2008) ต้นพืชที่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขาดธาตุสังกะสีจะมีลักษณะแคระแกรน ใบเล็ก เหลืองซีด เส้นใบมีสีเหลือง (Matsuo, 1995) และเนื้อเยื่องบางส่วนตาย (necrosis) (Marschner, 1995) ในข้าวที่ขาดธาตุสังกะสีจะทำการยืดตัว (elongation) ของลำต้นและใบลดลง เนื่องจากการขาดธาตุสังกะสีทำให้ปริมาณออกซินลดลง (Matsuo, 1995)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าว

2.3.1 ปัจจัยด้านพันธุกรรม

ธาตุเหล็กจะสะสมมากในรากและฟาง (ลำต้น กาบใบและใบ) ถึงร้อยละ 50 และ 40 ตามลำดับ แต่มีเพียงร้อยละ 3 เท่านั้นที่สะสมในเมล็ดข้าว ในทางตรงข้ามธาตุสังกะสีจะสะสมในข้าวกล้องมากที่สุด คือ ร้อยละ 40 รองลงมา คือ ส่วนของลำต้น ร้อยละ 20 ในขณะที่รากจะมีธาตุสังกะสีเพียงร้อยละ 10 เท่านั้น (Zhang et al., 2008) เช่นเดียวกับข้าวสาลีที่ธาตุเหล็กจะเคลื่อนที่ได้ปานกลางในท่อลำเลียงอาหาร (phloem) โดยธาตุเหล็กในส่วนของ vegetative tissue จะเคลื่อนย้ายสู่เมล็ดได้น้อยกว่าร้อยละ 20 (Miller et al., 1995) ในทางตรงข้าม ธาตุสังกะสีจะเคลื่อนย้ายจากใบแก่ โดยเฉพาะใบธงไปสู่เมล็ดได้ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก (Pearson and Rengel, 1994) สำหรับการเคลื่อนย้ายสารอาหารจากภายนอกไปสู่เมล็ดในส่วนของเปลือกนอกด้วยท่อลำเลียง 6 ท่อ แต่พบว่ามีท่อลำเลียงเพียง 1 ท่อ ในส่วนหลังของเมล็ด (dorsal) เท่านั้นที่ลำเลียงสารอาหารรวมทั้งธาตุเหล็กและสังกะสีเข้าไปสู่เนื้อของเมล็ดข้าว (Ogawa et al., 2002) โดยข้าวแต่ละพันธุ์จะมีความสามารถในการลำเลียงธาตุอาหารแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ดังนั้นจึงทำให้ข้าวแต่ละพันธุ์มีการสะสมธาตุเหล็กและสังกะสีแตกต่างกัน (Senadhira et al., 1999)

ข้าวจัดเป็นธัญพืชที่มีปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับธัญพืชหลักอื่นๆ เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เล่ย์ แล ะข้าวโพด ในข้าวกล้องจะมีธาตุเหล็กและสังกะสีเป็นส่วนประกอบเพียงแค่ 7.5-24.4 มก./กก. และ 15.9-58.4 มก./กก. ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าในข้าวสาลี (28.2-51.5 มก./กก. และ 25.2-53.3 มก./กก.) และข้าวโพด (9.6-63.2 มก./กก. และ 12.9-57.6 มก./กก.) (Graham et al., 1999; Gregorio, 2002; Hemalatha et al., 2007; Juliano, 1985; White and Broadley, 2005) จากการสำรวจปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้อง จำนวน 939 พันธุ์ ที่ศูนย์วิจัยข้าวนานาชาติ (IRRI) ประเทศฟิลิปปินส์ พบว่าในเมล็ดข้าวมีความแปรปรวนของธาตุเหล็กอยู่ที่ 7.5-24.4 มก./กก. และสังกะสีอยู่ที่ 13.5-58.4 มก./กก. (Graham et al., 1999; Gregorio, 2000; Welch and Graham, 2004) จากพันธุ์ข้าวที่ศึกษาทั้งหมด พบว่า พันธุ์ข้าวที่มีกลิ่นหอม (aromatic rice) มีแนวโน้มว่าจะมีปริมาณธาตุเหล็ก (18-22 มก./กก.) และสังกะสี (24-35 มก./กก.) ในเมล็ดสูงกว่าพันธุ์ข้าวที่ไม่หอม (non aromatic rice) เช่น ข้าวพันธุ์ Jalmagna พันธุ์ Zuchem และพันธุ์ Xua

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Bue Nuo ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของจีนและอินเดีย (Graham et al., 1999; Gregorio, 2000; Welch and Graham, 2004) และจากการศึกษาข้าว 286 สายพันธุ์ พบว่า ข้าวสายพันธุ์จาโปนิกา (japonica) มีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวสายพันธุ์อินดิกา (indica) แต่จะมีปริมาณธาตุสังกะสีต่ำกว่า ในกลุ่มของข้าวที่มีสี (color rice genotype) จะมีปริมาณธาตุเหล็กสูงกว่าข้าวที่มีสีขาว (white rice genotype) แต่ปริมาณธาตุสังกะสีไม่ต่างกัน (Yang et al., 1998) นอกจากนั้นยังพบว่าในกลุ่มของข้าวก่ำ (ข้าวก่ำหรือข้าวเหนียวดำ ลักษณะสีของเมล็ดจะมีสีม่วงดำ หรือแดงก่ำ นิยมปลูกมากในภาคเหนือ และภาคอีสานของไทย) ยังมีธาตุเหล็กและสังกะสีสูงเช่นกัน (Meng et al., 2005)

สำหรับปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวของพันธุกรรมข้าวไทย นั้นพบว่ามีความแปรปรวนค่อนข้างสูงเนื่องจากประเทศไทยเป็นแหล่งศูนย์กลางความหลากหลายของข้าวแหล่งหนึ่งของโลก (Chang, 1976) จากการสำรวจปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดข้าวของไทยจำนวน 38 พันธุ์ พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ระหว่าง 7-25 มก./กก. (Prom-u-thai and Rerkasem, 2001) โดยที่ข้าวพันธุ์ กข 6 ขาวดอกมะลิ 105 และ หอมคลองหลวง ซึ่งเป็นข้าวที่คนไทยนิยมปลูกและบริโภคมากที่สุดกลับมีปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดต่ำ (<10 มก./กก.) อย่างไรก็ตามยังคงมีข้าวไทยอีกจำนวนหนึ่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กในเมล็ดสูง โดยเฉพาะข้าวพันธุ์พื้นเมือง เช่น CMU122, CMU123 และ CMU124 เป็นต้น (Prom-u-thai and Rerkasem, 2001; Prom-u-thai, 2003) สำหรับการสำรวจปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดข้าวจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ CMU122 พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พันธุ์เหนียวอุบล พบว่าในข้าวขาวจะมีปริมาณสังกะสีอยู่ระหว่าง 20.2-51.8 มก./กก. โดยข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ก็ยังคงมีปริมาณสังกะสีในเมล็ดต่ำเช่นกัน (23.7 มก./กก.) (Prom-u-thai, 2003) แต่อย่างไรก็ตามยังพบว่าข้าวพันธุ์น้ำรู ซึ่งเป็นข้าวพันธุ์พื้นเมืองของไทยมีทั้งปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวกล้องในปริมาณที่สูง ได้แก่ 16 และ 49 มก./กก. ตามลำดับ (ช่อเพชร, 2552)

2.3.2 ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม

ปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวนั้นไม่ได้ถูกจำกัดด้วยปัจจัยทางด้านพันธุกรรมอย่างเดียว แต่ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อมยังมีผลต่อปริมาณการสะสมของธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ด เช่น สภาพน้ำ สภาพความเป็นกรด -ด่าง และการใส่ปุ๋ย เป็นต้น พบว่าการจัดการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับพันธุ์ข้าวจะทำให้ปริมาณการสะสมของธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดข้าวเพิ่มขึ้น จากการศึกษาสภาพน้ำ พบว่า ข้าวแต่ละพันธุ์จะมีการตอบสนองต่อสภาพน้ำที่ปลูกแตกต่างกัน เช่น ข้าวโดยส่วนมากจะมีการสะสมของปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อปลูกในสภาพน้ำไม่ขังเมื่อเทียบกับปลูกในสภาพน้ำขัง เช่น พันธุ์จ้าวหอมคลองหลวง แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ข้าวบางพันธุ์ เช่น พันธุ์เชียงรุ้ง จะมีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นเมื่อปลูกในสภาพน้ำขัง และยัง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พบว่าข้าวพันธุ์ กข6 และ ก.ว.ก. 2 เป็นพันธุ์ที่ไม่มีการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อม (Prom-u-thai, 2003) สำหรับปริมาณธาตุสังกะสี พบว่า ในข้าวกล้องข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำขังจะมีปริมาณธาตุสังกะสีมากกว่าข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำไม่ขัง (21 -59 และ 15-39 มก./กก. ตามลำดับ) (ช่อเพชร , 2552) สำหรับสภาพความเป็นด่างของดิน พบว่า ข้าวพันธุ์ IR68144 นั้นจะมีการตอบสนองต่อสภาพดินด่างและสภาพน้ำขังโดยพบว่าปริมาณธาตุเหล็กในข้าวกล้องจะลดลงเมื่อปลูกภายใต้สภาพนี้ แต่ข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิไม่มีการตอบสนองต่อสภาพความเป็นด่างของดิน (Prom-u-thai, 2003)

นอกจากนั้นยังพบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ระดับต่างๆ กันจะทำให้มีการตอบสนองทั้งปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ด ในตำแหน่งต่างๆ ของเมล็ดไม่เท่ากันด้วย เช่น เมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ 120 กิโลกรัม/เฮกตาร์ จะทำให้ปริมาณธาตุเหล็กของข้าวเปลือกพันธุ์ ขาวดอกมะลิ 105 กข6 IR68144 และ Basmati370 เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่ใส่ปุ๋ย สำหรับข้าวพันธุ์ Basmati370 เมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจะทำให้ส่วนต่างๆ ของข้าว (ข้าวเปลือก แกลบ ข้าวกล้องและข้าวขาว) มีปริมาณธาตุเหล็กเพิ่มขึ้นด้วย (Prom-u-thai et al., 2003) ในใบข้าว ก้าน แกลบ และข้าวกล้องปริมาณธาตุเหล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจน โดยเฉพาะในส่วนของใบ แกลบ และข้าวกล้องปริมาณธาตุเหล็กจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 85.5 30.9 และ 28.9 ตามลำดับ เมื่อใส่ปุ๋ยไนโตรเจนที่ 160 กก./เฮกตาร์ เมื่อเทียบกับไม่ใส่ปุ๋ย (Hu-lin et al., 2007) ในทางตรงข้ามปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้องจะเพิ่มขึ้นในตอนแรกที่มีการใสปุ๋ยไนโตรเจนและจะค่อยลดลงเมื่อมีการใส่ปุ๋ยมากเกินไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในระดับที่เหมาะสมก็จะทำให้ปริมาณธาตุสังกะสีในข้าวกล้องเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 16-20 เมื่อเทียบกับไม่ใส่ปุ๋ย (Hu-lin et al., 2007) นอกจากนั้นยังพบว่าข้าวสาลีการให้ปุ๋ยทั้งทางดินและใบจะทำให้ปริมาณธาตุสังกะสีในเมล็ดเพิ่มขึ้น (Cakmak, 2008)

2.4 การสะสมธาตุเหล็กและสังกะสีในเมล็ดและการสูญเสียระหว่างการขัดสี

ส่วนใหญ่แล้วการสะสมธาตุอาหารในส่วนต่างๆ ของเมล็ดจะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นนอกของเมล็ดข้าวที่เรียกว่าชั้นอะลิวโรน (aleurone layer) หรือเยื่อหุ้มเมล็ด และคัพภะ (embryo) และมีปริมาณน้อยมากในเอนโดสเปิร์ม (endosperm) หรือเนื้อเยื่อสะสมอาหาร (Juliano and Bechtel, 1985) ในข้าวกล้องธาตุเหล็กจะสะสมอยู่ในรำร้อยละ 51 คัพภะร้อยละ 10 และ ร้อยละ 28 ในข้าวขาว (Prom-u-thai, 2003) แต่สำหรับธาตุสังกะสี ในข้าวสาลี ธาตุสังกะสีจะอยู่ในคัพภะและเยื่อหุ้มเมล็ดมากที่สุดในขณะที่เนื้อเยื่อสะสมอาหารจะมีธาตุสังกะสีเล็กน้อยเท่านั้น (Ozturk et al, 2006) สำหรับการแบ่งปันธาตุเหล็กในเมล็ดข้าวกล้องสามารถเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยคือ ข้าวขาว> เยื่อหุ้มเมล็ด> คัพภะ และสำหรับธาตุสังกะสีคือ ข้าวขาว> คัพภะ> เยื่อหุ้มเมล็ด โดยที่ความ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เข้มข้นของธาตุสังกะสีในเนื้อเยื่อของเมล็ดข้าวมีมากกว่าธาตุเหล็ก 1-4 เท่า ยกเว้นในเยื่อหุ้มเมล็ด (ช่อเพชร, 2552)

โดยทั่วไปแล้วคนส่วนใหญ่นิยมบริโภคข้าวในรูปของข้าวขาวมากกว่าข้าวกล้อง แต่ จากการศึกษาต่างๆ พบว่าข้าวขาวจะมีปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีน้อยกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากธาตุอาหารเหล่านี้จะมีการสูญเสียไประหว่างการขัดสี (polishing) โดยพบว่ามีจะมีการสูญเสียของธาตุเหล็กระหว่างการขัดสีตั้งแต่ร้อยละ 25-85 (Prom-u-thai et al., 2007; Resurreccion et al., 1979; Senadhira et al., 1998; Vasconcelos et al., 2003; Wadsworth, 1993) ในขณะที่ธาตุสังกะสีจะมีการสูญเสียระหว่างการขัดสีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ ร้อยละ 1 0-50 (ช่อเพชร, 2552; Wadsworth, 1993) จากการเปรียบปริมาณธาตุเหล็กในข้าวกล้องและข้าวขาวของข้าว 15 พันธุ์ที่นำมาจากแหล่งต่างๆ พบว่า ข้าวขาวมีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่าข้าวกล้องในข้าวทุกพันธุ์ ซึ่งสามารถแบ่งการเก็บรักษาของธาตุเหล็ก (Fe retention) ออกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) ข้าวขาวที่มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กร้อยละ 50 หรือมากกว่าเมื่อเทียบกับข้าวกล้อง เช่น พันธุ์ Namaga พันธุ์ Opus และพันธุ์ Tarra ซึ่งเป็นข้าวของประเทศออสเตรเลีย 2) ข้าวขาวที่มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กน้อยกว่าร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับข้าวกล้อง เช่น พันธุ์ B55 ของจีน พันธุ์ Norin PL11 ของญี่ปุ่น และพันธุ์ Bogan ของออสเตรเลีย เป็นต้น ข้าวพันธุ์ Bogan ที่มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กในข้าวกล้องประมาณ 14.8 มก./กก. แต่เมื่อนำมาขัดเป็นข้าวขาวแล้วจะมีธาตุเหล็กเหลืออยู่เพียง 2.9 มก./กก. ในขณะที่พันธุ์ Sakha ของประเทศอียิปต์ พบว่าเมื่อนำมาขัดแล้วปริมาณธาตุเหล็กจะลดลงเล็กน้อยเท่านั้น (13.4 ลดลงเหลือ 11.3 มก./กก.) (Prom-u-thai et al., 2007a) สำหรับข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวที่คนไทยนิยมบริโภคมากที่สุด พบว่าในข้าวกล้องจะมีธาตุเหล็กประมาณ 8.42 มก./กก. แต่เมื่อนำมาขัดสีเป็นข้าวขาวแล้วจะเหลือธาตุเหล็กเพียง 5.16 มก./กก. หรือมีการสูญเสียธาตุเหล็กระหว่างการขัดสีถึงร้อยละ 61.28 (Prom-u-thai et al., 2003)

การสูญเสียธาตุเหล็กและสังกะสีในกระบวนการขัดสีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย เช่น พันธุ์ข้าว รูปร่างของเมล็ดข้าว น้ำหนักของข้าวที่ใช้ในการขัดสี ระยะเวลาในการขัดสี (Doesthale et al., 1976; Gujral et al., 2002; Marr et al., 1995; Prom-u-thai et al., 2007b; Vasconcelos et al., 2003; Villareal et al., 1991) จากการศึกษาระยะเวลาการขัดสีต่อการสูญเสียระหว่างการขัดสี (degree of milling) พบว่าเมื่อระยะเวลาในการขัดสีนานขึ้นจะทำให้เกิดการสูญเสียระหว่างการขัดสีเพิ่มขึ้น (Gujral et al., 2002; Lamberts et al., 2007) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการสูญเสียของธาตุอาหารต่างๆ เพิ่มขึ้น เช่น ธาตุเหล็กและสังกะสี (Doesthale et al., 1979) เนื่องจากข้าวกล้องจะประกอบด้วยส่วนของเยื่อหุ้มเมล็ดและคัพภะ ซึ่งเป็นส่วนที่สะสมธาตุเหล็กและสังกะสีสูง ในขณะที่ข้าวขาวไม่มีทั้งสองส่วนนี้เพราะสูญเสียไประหว่างกระบวนการขัดสี ดังนั้นการขัดข้าวจึงเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารได้ เช่น ธาตุเหล็กและสังกะสี เป็นต้น (Laing, 2007; Lamberts et al., 2007; Prom-u-thai et al., 2007b)

2.5 ข้าวนึ่ง (Parboiled rice)

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักของประชากรเกือบทั่วโลก ประมาณร้อยละ 50 ของผลผลิตข้าวทั่วโลกนั้นเป็นข้าวนึ่ง (Miah et al., 2002a) ข้าวนึ่งมีจุดเริ่มต้นมาจากข้าวเปลือกที่เปียกน้ำที่ถูกนำไปนึ่งให้สุกทั้งเปลือกเพื่อไม่ให้งอกเสียหาย เมื่อแห้งแล้วจึงนำมาสี (เบญจวรรณ , 2551) โดยในทวีปเอเชียใต้และอาฟริกานั้นได้มีการผลิตและบริโภคข้าวนึ่งกันมาเป็นเวลานานแล้ว ปัจจุบันการผลิตข้าวนึ่งได้มีการปฏิบัติในหลายๆ ส่วนของโลก เช่น อินเดีย ปากีสถาน พม่า ไทย มาเลเซีย อาฟริกาใต้ อิตาลี สเปน ฝรั่งเศส สหรัฐอเมริกา เป็นต้น (Bhattacharya, 1985; Miah et al., 2002a) สำหรับประเทศอินเดียและปากีสถานนั้นมีการบริโภคข้าวนึ่งถึงร้อยละ 60 และ 90 ตามลำดับ (Choudhury, 1991)

ข้าวนึ่ง คือ ข้าวเปลือกที่ได้จากการนำข้าวเปลือกไปผ่านการแช่น้ำ (soaking) และนึ่งด้วยความร้อน (steaming) แล้วทำให้แห้ง (drying) ก่อนการขัดสี (Gariboldi, 1984) โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ เพื่อเพิ่มคุณภาพในการขัดสี ทำให้ได้ปริมาณต้นข้าว (head rice yield) มากขึ้น เพื่อกำจัดความงอกของเมล็ดพืชที่เก็บเกี่ยวขณะที่มีความชื้นสูง เพื่อให้ง่ายต่อการสีสำหรับข้าวที่เก็บเกี่ยวก่อนระยะสุกแก่ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา (บุญหงษ์ , 2547; Gariboldi, 1984) นอกจากนี้ยังมีจุดประสงค์ทางการค้า คือ ผลิตตามความต้องการของผู้บริโภคในบางส่วนของโลกที่เคยชินต่อการบริโภคข้าวนึ่งอีกด้วย (กรมวิชาการเกษตร, 2551) สำหรับประเทศไทยข้าวจัดเป็นพืชเศรษฐกิจหลักที่เป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญที่สุดของประเทศ ในแต่ละปีประเทศไทยได้ส่งออกข้าวเป็นอันดับแรกๆ ของโลก ผลิตภัณฑ์ข้าวที่ส่งออกนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น ข้าวกล้อง ข้าวขาว และข้าวนึ่ง เป็นต้น (บุญหงษ์, 2543, สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552) สำหรับประเทศไทยนั้นพบว่าข้าวนึ่งไม่ได้เป็นที่นิยมบริโภค แต่อย่างไรก็ตามข้าวนึ่งก็ยังเป็นสินค้าส่งออกของประเทศไทยที่สำคัญอย่างหนึ่ง มาเป็นเวลามากกว่า 30 ปี ข้าวนึ่งนับได้ว่าเป็นสินค้าข้าวที่มีการส่งออกมากที่สุด มีอัตราการขยายตัวที่สูง เพิ่มขึ้นเฉลี่ยเกือบ 50,000 ตันต่อปี ถึงปีละ 1.5-2.3 ล้านตัน (เบญจวรรณ, 2551; สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยในปี 25 51 ที่ผ่านมาประเทศไทยสามารถส่งออกข้าวนึ่งได้ถึง 2.4 ล้านเมตริกตัน มูลค่ากว่า 2 หมื่นล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของมูลค่าการส่งออกของข้าวไทยทั้งหมด (สยามธุรกิจ, 2007; สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2552)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประเภทของข้าวนึ่งที่ประเทศไทยส่งออกมี 2 ประเภท คือ

1) ข้าวนึ่งสาร ประเทศไทยจะส่งออกข้าวนึ่งในประเภทนี้มากที่สุด ส่วนมากจะส่งออกไปยังแถบทวีปอาฟริกา เช่น เบนิน อาฟริกาใต้ และไนจีเรีย

2) ข้าวนึ่งกล้อง แม้ว่าทั้งปริมาณและมูลค่าการส่งออกในปัจจุบันยังไม่สูงนัก โดยมีสัดส่วนเพียงร้อยละ 2 ของมูลค่าข้าวนึ่งทั้งหมดที่ไทยส่งออกทั้งหมด แต่นับว่าเป็นการผลิตเพื่อตอบสนองกระแสการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพ จึงทำให้ข้าวนึ่งกล้องมักจะมีราคาอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าข้าวนึ่งธรรมดา ประเทศที่นำเข้าข้าวนึ่งกล้องของไทยมากที่สุด ได้แก่ ไนจีเรีย รองลงมา ได้แก่ เบลเยี่ยม อังกฤษ และเนเธอร์แลนด์ ตามลำดับ (สยามธุรกิจ, 2007)

ประเทศไทยส่งออกข้าวนึ่งไปยังประเทศต่างๆ ประมาณ 68 ประเทศทั่วโลก ทั้งในแถบทวีปอาฟริกา ตะวันออกกลาง อเมริกา และยุโรป โดยประเทศไนจีเรียเป็นประเทศที่นำเข้าข้าวนึ่งของไทยมากที่สุด (เบญจวรรณ , 2551, สยามธุรกิจ, 2007) แต่ในปัจจุบันพบว่าประเทศไทยกำลังประสบกับปัญหาการแข่งขันการส่งออกข้าวนึ่งที่รุนแรง เนื่องจากประเทศอินเดียและอเมริกา ซึ่งเป็นประเทศคู่แข่งได้เริ่มมาผลิตข้าวนึ่งเพื่อการส่งออกมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบันผู้บริโภคในต่างประเทศเริ่มเปลี่ยนพฤติกรรมหันมาบริโภคข้าวนึ่งกันมากขึ้น เนื่องจากมีการศึกษาพบว่าข้าวนึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าการบริโภคข้าวขาว ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบริโภคนี้อาจทำให้ตลาดข้าวนึ่งในตลาดโลกมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้โอกาสในการขยายตลาดส่งออกข้าวนึ่งของไทยนั้นยังมีความเป็นได้มาก (สยามธุรกิจ, 2007)

2.5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตข้าวนึ่ง

กระบวนการผลิตข้าวนึ่ง ประกอบด้วยสามขั้นตอน ได้แก่ การแช่ การนึ่ง และการทำให้แห้ง โดยแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีผลกระทบต่อการผลิตและคุณภาพของข้าวนึ่ง ดังนี้

1. อุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ข้าว

อุณหภูมิและระยะเวลาในการแช่ข้าวที่เหมาะสมนั้นจำเป็นมากสำหรับการผลิตข้าวนึ่งเพื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการ จากการศึกษาต่างๆ พบว่า เมื่อแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงและ /หรือใช้ระยะเวลานานขึ้นข้าวเปลือกจะดูดซับน้ำได้ดีขึ้น ทำให้ข้าวมีความชื้นเพิ่มสูงขึ้นจนถึง 30-32% จากนั้นเปลือกข้าวจะแยกออกจากกัน ทำให้เมล็ดข้าวดูดซับน้ำและทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำได้ดีขึ้น ทำให้เม็ดแป้งภายในเมล็ดข้าวเกิด gelatinization (Bhattacharya, 1985; Gariboldi, 1984) นอกจากนั้นการแช่ข้าวเป็นเวลานานและ/หรืออุณหภูมิสูงจะทำให้ข้าวมี ค่าความขาว ความโปร่งใส และปริมาณต้นข้าวเพิ่มขึ้นด้วย (Gariboldi, 1984; Miah et al., 2002a; Bhatchary and Rao, 1966) แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนของการแช่ข้าวนั้นควรจะใช้เวลาอย่างรวดเร็วและเหมาะสม เพื่อป้องกันการหมักและการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกิดกิจกรรมของเอนไซม์และแบคทีเรียต่างๆ ซึ่งจะทำให้เกิด สี กลิ่น รส ที่ไม่พึงประสงค์ โดยพบว่าการแช่ข้าวที่อุณหภูมิสูงจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ ไม่ทำงาน (Bhattacharya, 1985; Gariboldi, 1984; Xavier and Ray, 1996)

2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำที่แช่ข้าว

pH ของน้ำที่แช่ข้าว จะมีผลต่อความขาว (whiteness) ของข้าว โดยพบว่าที่ pH 5 จะทำให้ข้าวมีความขาวมากที่สุด แต่เมื่อแช่ข้าวที่ pH สูงขึ้น (pH 6-9) จะทำให้ข้าวกลับมีความขาวลดลง (Gariboldi, 1984) และการใช้กรดอะซีติกปรับ pH ให้เป็น 4 และแช่ข้าว 4 ชั่วโมง จะทำให้ข้าวมีปริมาณต้นข้าว (head rice yield) และมีความขาวมากที่สุด (Nuntawichai et al., 2005) นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อแช่ข้าวที่ pH สูง (pH 8-9) จะทำให้ปริมาณของวิตามินบี 1 (thiamin) ในเมล็ดข้าวลดลงเล็กน้อย (Rao and Bhatchary, 1966)

3. อุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่งข้าว

การนึ่งข้าวต้องทำให้ข้าวเปลือกทั้งเมล็ดได้รับไอน้ำอย่างสม่ำเสมอและต้องได้รับอุณหภูมิและเวลาในการนึ่งเท่าๆ กัน (อรรควุฒิ, 2527) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่งข้าวจะทำให้ความสว่าง (lightness) ของข้าวจะลดลง ในขณะที่ความมืด (color intensity) ของข้าวเพิ่มขึ้น (Islam et al., 2002) นอกจากนั้นหากระยะเวลาในการนึ่งเพิ่มขึ้นจะทำให้ข้าวมีการแตกหักระหว่างการขัดสีเพิ่มมากขึ้น และทำให้ปริมาณสารอาหารบางชนิดลดลงด้วย เช่น โปรตีน แคลเซียม เป็นต้น (Ibukun, 2008)

4. แรงดันที่ใช้ขณะนึ่งข้าว

แรงดันในการนึ่งข้าวจะมีผลต่อการเกิด gelatin ของเมล็ดข้าว และความสามารถในการละลายของเม็ดแป้งและสารภายในเมล็ด โดยพบว่า เมื่อแรงดันในการนึ่งเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ข้าวเกิดการ gelatinization เร็วขึ้น และทำให้ความสามารถในการละลายของสารภายในเมล็ดเพิ่มขึ้นด้วย (Priestley, 1976) นอกจากนั้นแรงดันในการนึ่งข้าวยังมีผลต่อคุณภาพการหุงต้มและปริมาณต้นข้าวอีกด้วย (Bhattacharya, 1985)

5. อุณหภูมิในการลดความชื้นหรือการทำให้แห้ง

ขั้นตอนการลดความชื้นหรือทำให้แห้งจะมีผลต่อคุณภาพการขัดสีของข้าวนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแตกหักของเมล็ดและปริมาณต้นข้าว (head rice yield) (Bhattacharya , 1985; Elbert et al., 2001; Bhattacharya and Swamy, 1967) โดยปริมาณต้นข้าวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิที่ใช้ในการลดความชื้นลงแต่ใช้ระยะเวลานานขึ้น (Elbert et al., 2001) นอกจากนั้นยังมีผลต่อสี (browning index) ของข้าวนึ่งขาวอีกด้วย ซึ่งการลดความชื้นนั้นจะต้องค่อยๆ ลดความชื้นลงอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ด้วยการตากแดด ผ่านลมร้อน หรือผ่านเครื่องอบ (อรรควุฒิ , 2527) โดยใช้อุณหภูมิไม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกิน 42 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการแตกหักของเมล็ด (บุญหงษ์ , 2547) และไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้ข้าวนึ่งมีสีเป็นที่ยอมรับได้ (Elbert et al., 2001) ปกติแล้วจะต้องลดความชื้นของเมล็ดให้เหลือประมาณร้อยละ 14-16 และหลังจากลดความชื้นแล้ว การแตกหักระหว่างการขัดสีไม่ควรเกินร้อยละ 1-2 (บุญหงษ์, 2547; อรรควุฒิ, 2527; Bhattacharya , 1985; Bhattacharya and Swamy, 1967)

จากการศึกษาต่างๆ พบว่า การลดความชื้นของเมล็ดด้วยการตากในที่ร่มหรือผึ่งให้แห้งด้วยลมปกติ จะทำให้เมล็ดมีการแตกหักระหว่างการขัดสีน้อยที่สุด (ร้อยละ 0.4-1) และหากลดความชื้นด้วยการตากแดดหรือใช้ลมร้อน (40-80 องศาเซลเซียส) จะทำให้เมล็ดมีการแตกหักเพิ่มมากขึ้น คือ ร้อยละ 2-36 และ 6-94 ตามลำดับ (Bhattacharya and Swamy, 1967) แต่การลดความชื้นของเมล็ดด้วยการตากในที่ร่มหรือตากแดด อาจไม่สามารถทำให้เมล็ดมีความชื้นลดลงตามที่ต้องการได้ภายในวันเดียว ทำให้ข้าวแห้งช้าเกินไปและทำให้เชื้อราหรือจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหมักหรือเกิดกลิ่นภายในกองเมล็ดได้ (อรรควุฒิ , 2527; Bhattacharya, 1985) ในทางตรงข้ามหากใช้ความร้อนลดความชื้นลงอย่างรวดเร็วจนเกินไปก็จะทำให้เมล็ดมีการแตกหักเพิ่มขึ้น (Bhattacharya , 1985; Bhattacharya and Swamy, 1967) นอกจากนั้นยังพบว่าการแตกหักของเมล็ดนั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิระหว่างการแช่และแรงดันขณะนึ่งด้วย (Bhattacharya , 1985) อย่างไรก็ตามการลดความชื้นของเมล็ดข้าวนึ่งควรจะแบ่งเป็นสองระยะคือในระยะแรกลดความชื้นของข้าวลงจนกระทั่งเหลือประมาณร้อยละ 15-16 หลังจากนั้นพักเมล็ดที่ร้อนไว้สักระยะหนึ่ง (ประมาณ 2 ชั่วโมง) จากนั้นจึงนำมาทำให้แห้งต่อจนความชื้นของเมล็ดลดลงตามที่ต้องการ โดยระยะสุดท้ายนี้ควรใช้ความร้อนเกิน 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้คุณภาพที่ดี (อรรควุฒิ , 2527; Bhattacharya , 1985; Elbert et al., 2001; Bhattacharya and Swamy, 1967)

2.5.2 ประโยชน์ ข้อดี และข้อเสียของข้าวนึ่ง

ประโยชน์

1. ช่วยเพิ่มคุณค่าของข้าวเปลือก
2. ช่วยลดปริมาณการแตกหักระหว่างการขัดสี ทำให้ได้เมล็ดข้าวเต็ม (head rice) เพิ่มขึ้น
3. ช่วยลดการสูญเสียคุณค่าสารอาหารระหว่างการขัดสี
4. เกษตรกรสามารถขายข้าวนึ่งได้ที่ความชื้น (ร้อยละ 20) สูงกว่าความชื้นมาตรฐานของข้าวธรรมดา (ร้อยละ 14)
5. ทำให้ส่งออกไปยังประเทศที่มีการบริโภคข้าวนึ่งได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ข้อดี

1. ทำให้เปลือกกะเทาะออกได้ง่ายในเวลาสีข้าว จึงทำให้ปริมาณข้าวหักลดลง
2. ข้าวนึ่งมีคุณค่าทางสารอาหาร เช่น วิตามินและแร่ธาตุ เพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวธรรมดา
3. ทำให้เก็บรักษาได้นานและทนต่อการเข้าทำลายของแมลง
4. ข้าวไม่เละหลังการหุงต้ม
5. ทำให้มีปริมาณน้ำมันในรำข้าวนึ่ง (ร้อยละ 25-30) มีมากกว่าข้าวธรรมดา (ร้อยละ 15-20)

ข้อเสีย

1. ข้าวนึ่งเกิดกลิ่นหืนได้ง่ายกว่าข้าวธรรมดาเนื่องจากความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตข้าวนึ่งจะทำลายสารกันหืน (antioxidant) ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกตามธรรมชาติ
2. ข้าวนึ่งต้องใช้เวลาในการหุงต้มมากกว่า และเมื่อหุงเสร็จแล้วจะทำให้ข้าวนึ่งมีสีและกลิ่นที่แตกต่างไปจากข้าวธรรมดา อาจทำให้ผู้บริโภคที่ไม่เคยชินกับข้าวนึ่งไม่ชอบ
3. ระหว่างกระบวนการผลิตข้าวนึ่งนั้น ข้าวนึ่งจะมีความชื้นสูงก่อนที่จะนำไปตากแดด และถ้าต้องใช้เวลาตากนานอาจทำให้เกิดเชื้อราในเมล็ดข้าว ซึ่งจะเป็นอันตรายแก่ผู้บริโภคได้
4. ในกระบวนการผลิตข้าวนึ่งนั้น ต้องมีขั้นตอนในการผลิตมากมาย ซึ่งในแต่ละขั้นตอนอาจต้องใช้ต้นทุนในการผลิตที่สูง (อรรควุฒิ, 2527; Bhattacharya, 1985; Gariboldi, 1984; Rerkasem, 2007)

2.6 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวนึ่ง

การผลิตข้าวนึ่งนั้นมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อเพิ่มคุณภาพในการขัดสีของข้าว โดยทำให้เมล็ดข้าวมีความแข็งแรงและทนต่อการขัดสีมากขึ้น ทำให้ปริมาณข้าวหักลดลง (Bhattacharya, 1985; Gariboldi, 1984; Miah et al., 2000a) นอกจากนั้นการนึ่งข้าวยังมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของสารอาหารต่าง ๆ ภายในเมล็ด จึงส่งผลให้ข้าวนึ่งมีปริมาณสารอาหารบางชนิดมากกว่าข้าวดิบ เช่น วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ข้าวนึ่งขาวซึ่งเป็นรูปที่นิยมบริโภคมากกว่าข้าวนึ่งกล้อง จะมีแร่ธาตุมากกว่าในข้าวขาวดิบประมาณร้อยละ 18 เช่น โพแทสเซียม ฟอสฟอรัส (Heinemann et al.,2005) วิตามินบี 1 (thiamin) วิตามินบี 2 (riboflavin) วิตามินบี 3 (niacin) แมงกานีส โมลิบดินัมและธาตุเหล็ก เป็นต้น (อรรควุฒิ , 2527; Bhattacharya, 1985; Otegbayo et al., 2001) นอกจากนั้นยังพบว่าข้าวนึ่งยังเป็นแหล่งของโครเมียมที่ดีอีกด้วย (Doesthale et al., 1979) และในปัจจุบันพบว่าได้มีการใส่สารอาหารบางชนิดลงไป (fortification) ระหว่างการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แช่ข้าวในกระบวนการนึ่งเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณสารอาหารในเมล็ดให้มากขึ้น เช่น ธาตุเหล็กและสังกะสี ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุเหล็กในข้าวนึ่งได้ประมาณ 10-50 เท่า และสังกะสีประมาณ 1.3-4.5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวดิบ (Prom u thai et al., 2008; Prom u thai et al., 2010) แต่อย่างไรก็ตามการนึ่งข้าวก็มีผลให้สารอาหารบางชนิดลดลงด้วยเช่นกัน เช่น แมกนีเซียม แคลเซียม สังกะสี และทองแดง เป็นต้น (Bhattacharya, 1985; Doesthale et al., 1979; Heinemann et al., 2005)

การเพิ่มปริมาณสารอาหารระหว่างกระบวนการนึ่งนั้นมีสาเหตุมาจากระหว่างที่แช่ข้าวเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อนที่จะนำข้าวไปนึ่งนั้น ทำให้วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในเยื่อหุ้มเมล็ดและคัพภะเคลื่อนย้ายเข้าไปสู่เนื้อเยื่อสะสมอาหารหรือส่วนกลางของเมล็ดทำให้เนื้อเยื่อสะสมอาหารมีปริมาณสารอาหารต่างๆ เพิ่มมากขึ้น (Bhattacharya, 1985; Doesthale et al., 1979; Gariboldi, 1984; Heinemann et al., 2005; Prom u thai et al., 2008) ทำให้เวลาขัดสี ข้าวนึ่งจะเกิดการสูญเสียธาตุอาหารน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวดิบ (Bhattacharya, 1985; Doesthale et al., 1979; Gariboldi, 1984)

อย่างไรก็ตามการศึกษาการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กและสังกะสีภายในเมล็ดข้าวยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดว่ากระบวนการนึ่งข้าวมีผลทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายภายในเมล็ดข้าวอย่างไร ดังนั้นการศึกษานี้จึงทำการศึกษาการเคลื่อนย้ายธาตุเหล็กและสังกะสีในสภาพการนึ่งที่แตกต่างกันและนำสภาพการนึ่งที่ทำให้มีการเคลื่อนย้ายของธาตุเหล็กและสังกะสีได้มากที่สุดมาใช้ทดสอบความแปรปรวนของการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารของพันธุ์ข้าวต่างๆ เมื่อนึ่งในสภาพการนึ่งเดียวกัน เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกสภาพการนึ่งที่เหมาะสมกับพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มปริมาณธาตุเหล็กและสังกะสีในกลุ่มผู้บริโภคข้าวนึ่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved