

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

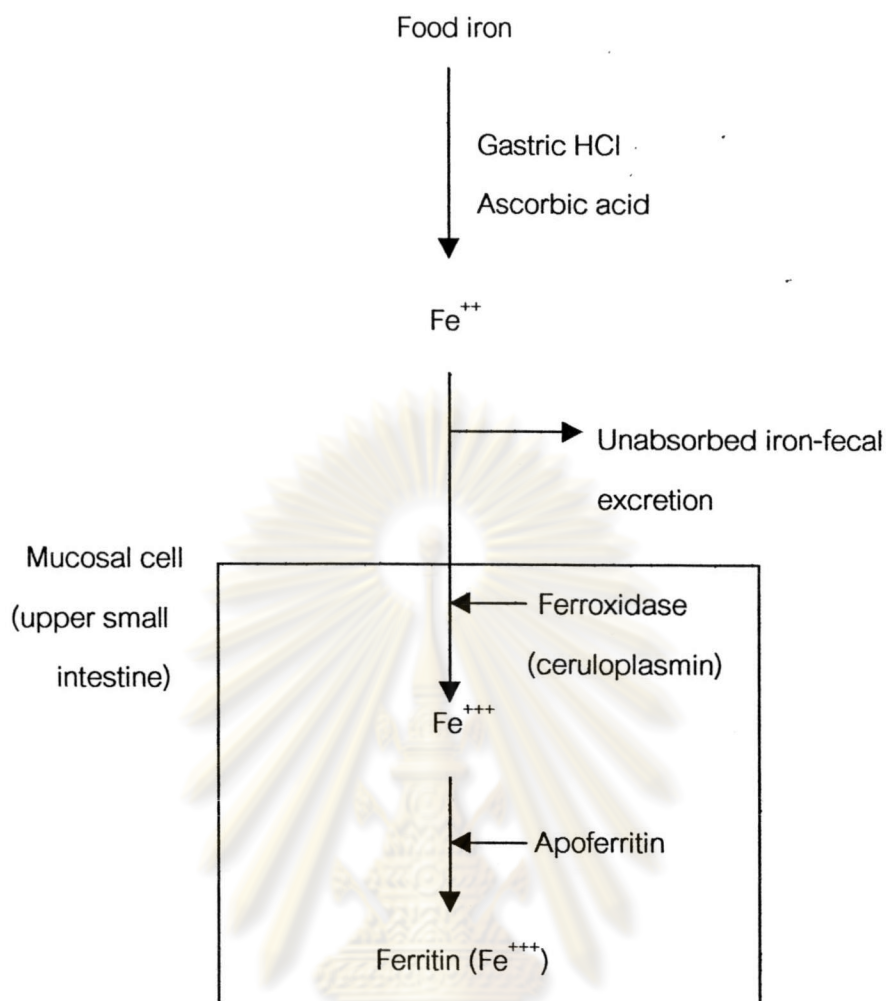
#### 2.1 ความสำคัญของธาตุเหล็ก

ธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่ในร่างกายในปริมาณเพียงเล็กน้อย (trace mineral) ซึ่งอยู่ในเลือดประมาณร้อยละ 55-60 ในเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อประมาณร้อยละ 3 และยังมีเก็บไว้ในตับ ม้าม ไตและไขกระดูก ธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบของฮีโมโกลบินในเซลล์เม็ดเลือดแดง ทำหน้าที่ขนส่งออกซิเจนจากปอดไปสู่เนื้อเยื่อต่างๆ และอยู่ในพลาสมาประมาณร้อยละ 0.2 ของเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในเลือด เป็นองค์ประกอบของไมโอโกลบินซึ่งทำหน้าที่เก็บออกซิเจนไว้ในกล้ามเนื้อสำหรับการหดตัวของกล้ามเนื้อ และเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน เอนไซม์เหล่านี้ได้แก่ เอนไซม์ไซโตโครม เอนไซม์อะซิเตส เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Wilson, Fisher และ Fuqua, 1965)

##### 2.1.1 การดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมธาตุเหล็กเกิดขึ้นที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น ปกติร่างกายจะดูดซึมธาตุเหล็กได้ประมาณร้อยละ 10 ของธาตุเหล็กที่มีในอาหาร แต่ในบางสภาวะร่างกายจะดูดซึมธาตุเหล็กได้มากขึ้น เช่น ในกรณีที่เสียเลือดหรือเป็นโรคโลหิตจางจากการขาดธาตุเหล็ก การดูดซึมที่มากกว่าปกตินี้ขึ้นกับจำนวนธาตุเหล็กที่สะสมไว้ในตับและอวัยวะอื่นในรูปของโปรตีนรวมกับธาตุเหล็กคือเฟอร์ริติน (ferritin) และฮีโมซิเดอริน (hemosiderin)

การดูดซึมธาตุเหล็กเกิดขึ้นเมื่อเหล็กถูกปล่อยออกมาจากอาหารโดยน้ำย่อยในกระเพาะในรูปเฟอร์รัส ( $Fe^{++}$ ) ซึ่งสามารถจับ (chelate) กับกรดแอสคอร์บิก น้ำตาลบางตัวและกรดอะมิโน สารประกอบ chelates เหล่านี้ยังคงละลายได้ในสารละลายที่เป็นด่างในดูโอดินัม (duodinum) และเจจูนัม (jejunum) ทำให้เกิดการดูดซึมธาตุเหล็กได้ในบริเวณนี้ ซึ่งโปรตีนที่ผนังลำไส้เล็ก (apoferritin) จะรับธาตุเหล็กที่ผนังลำไส้เล็กส่วนบน และเป็นตัวควบคุมการดูดซึมธาตุเหล็ก (รูปที่ 2.1) เมื่อร่างกายต้องการธาตุเหล็กอันเนื่องมาจากการสูญเสียเลือดและมีผลทำให้ต้องมีการสร้างเม็ดเลือดแดงเพิ่มขึ้น ธาตุเหล็กจะเคลื่อนย้ายไปจากเซลล์ที่ทำหน้าที่รับธาตุเหล็กจากผนังลำไส้ ทำให้มีการเพิ่มการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหารมาแทนที่จนกว่าร่างกายมีธาตุเหล็กเพียงพอ เมื่อเซลล์ที่ผนังลำไส้เล็กได้รับเหล็กจนอิ่มตัว ซึ่งอยู่ในรูปเฟอร์ริติน มีผลให้การดูดซึมธาตุเหล็กสิ้นสุดลง (Orten และ Neuhaus, 1982)



**รูปที่ 2.1** การดูดซึมธาตุเหล็กในผู้ใหญ่  
ที่มา Orten และ Neuhaus (1982)

### 2.1.2 เมตาบอลิซึม (Metabolism)

ธาตุเหล็กส่วนใหญ่อยู่ในฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ซึ่งมีอายุ 120 วัน โดยเม็ดเลือดแดงในกระแสเลือดร้อยละ 0.8 จะถูกทำลายแตกตัวลงในแต่ละวัน ฮีโมโกลบินที่มีธาตุเหล็กจะออกมาอยู่ในกระแสเลือดและถูกทำลายไป ส่วนธาตุเหล็กที่มีอยู่นั้นจะถูกนำไปใช้สร้างเม็ดเลือดแดงต่อไป ธาตุเหล็กที่สะสมไว้ในตับและเนื้อเยื่ออื่นมีอยู่ประมาณร้อยละ 30 ของธาตุเหล็กทั้งหมดในร่างกายจะถูกนำมาใช้ตามความจำเป็น ในแต่ละวันร่างกายมีการสูญเสียธาตุเหล็ก 1-2 มิลลิกรัม โดยการขับออกจากลำไส้หรือการมี desquamation ของ epithelial cells แต่จะมีการชดเชยธาตุเหล็กที่สูญเสียไปนี้จากการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหาร ในเพศหญิงจะมีการสูญเสียธาตุเหล็กในระหว่างการมีประจำเดือน 30 มิลลิกรัม และในหญิงมีครรภ์จะมีการเคลื่อนย้ายของธาตุเหล็กไปสู่

ทารกในครรภ์ ดังนั้นจึงต้องมีการแทนที่ธาตุเหล็กเหล่านี้โดยการเพิ่มการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหาร หรือรับประทานยาเสริมธาตุเหล็ก (Orten และ Neuhaus, 1982)

### 2.1.3 ความต้องการ (Requirement)

เพื่อรักษาความสมดุลของธาตุเหล็กในร่างกาย ปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายต้องได้รับในแต่ละวันต้องครอบคลุมทั้งปริมาณธาตุเหล็กที่ถูกขับออกจากร่างกาย และความต้องการที่เพิ่มขึ้นตามการเจริญเติบโตและพัฒนาการของร่างกาย ปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวันแสดงในตารางที่ 2.1

### 2.1.4 การขาดธาตุเหล็ก (Iron deficiency)

การขาดธาตุเหล็กในร่างกายแบ่งออกได้เป็น 3 ระยะ (ปราณีต ผ่องแผ้ว, 2539) คือ

ระยะแรก การสะสมธาตุเหล็กในตับ ม้ามและไขกระดูก จะลดลงขนานกันกับการลดลงของเฟอร์ริตินในซีรัมหรือพลาสมา เมื่อมีการลดระดับของธาตุเหล็กในไขกระดูก

ระยะที่สอง ธาตุเหล็กที่ถูกขนส่งอยู่ในกระแสเลือดจะลดลง โดยที่มีระดับธาตุเหล็กในซีรัมลดลง แต่ total iron-binding capacity เพิ่มขึ้น

ระยะที่สาม เม็ดเลือดแดงจะมีขนาดเล็ก (microcytic) ตืดสีจาง (hypochromic) และรูปร่างเปลี่ยนแปลง โดยมีการเพิ่มระดับ protoporphyrin ขึ้น เนื่องจากธาตุเหล็กที่ขนส่งมาเพื่อการสังเคราะห์ฮีโมโกลบินมีไม่เพียงพอ ทำให้ระดับฮีโมโกลบินลดลง

การขาดธาตุเหล็กทำให้ร่างกายเกิดภาวะโลหิตจาง ซึ่งสาเหตุที่สำคัญเกิดจากการรับประทานอาหารที่มีธาตุเหล็กไม่พอเพียง หรือจากการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหารที่รับประทานไม่ดี เนื่องจากชนิดและรูปแบบของอาหารที่รับประทาน

สถาบันวิจัยสาธารณสุขไทย (2539) รายงานการสำรวจภาวะโลหิตจางในประชากรตัวอย่างอายุตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไป (ยกเว้นกรุงเทพมหานคร) ระหว่างปี พ.ศ. 2534-2535 พบภาวะโลหิตจางในประชากรมีอัตราร้อยละ 21.7 เพศหญิงมีภาวะโลหิตจางในอัตราร้อยละ 25.0 และเพศชายในอัตราร้อยละ 17.3 ตามลำดับ และประชากรในภาคใต้มีภาวะโลหิตจางมากกว่าภาคอื่นๆ อย่างชัดเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.2



ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายควรได้รับประจำวัน

	อายุ	Iron (mg)
	(เดือน)	
ทารก	3-5	6
	6-8	7
	9-11	8
	(ปี)	
เด็กเล็ก	1-3	10
	4-6	10
	7-9	10
เด็กชาย	10-12	12
	13-15	12
	16-19	10
เด็กหญิง	10-12	15
	13-15	15
	16-19	15
ผู้ชาย	20-29	10
	30-39	10
	40-49	10
	50-59	10
	60 <sup>+</sup>	10
ผู้หญิง	20-29	15
	30-39	15
	40-49	15
	50-59	10
	60 <sup>+</sup>	10
หญิงมีครรภ์		+30
หญิงให้นมบุตร	0-5 เดือน	15
	6 <sup>+</sup> เดือน	15

ที่มา กรมอนามัย (2532)

ตารางที่ 2.2 อัตรา (ร้อยละ) ภาวะโลหิตจางในประชากรอายุ 15 ปีขึ้นไป จำแนกตามเพศ และภาค

ภาค	ชาย	หญิง	รวม
รวมทั้งประเทศ	17.3	25.0	21.7
ตะวันออกเฉียงเหนือ	13.2	19.2	16.5
กลาง (ยกเว้นกรุงเทพมหานคร)	10.8	17.6	14.9
เหนือ	22.4	30.3	26.8
ใต้	26.3	38.2	33.2

ที่มา สถาบันวิจัยสาธารณสุขไทย (2539)

สำหรับภาวะโลหิตจางในหญิงมีครรภ์ และเด็กนักเรียนอายุ 6-14 ปี แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อัตรา (ร้อยละ) ภาวะโลหิตจางในหญิงมีครรภ์ และเด็กนักเรียน 6-14 ปี พ.ศ. 2531-2540

ปีที่ทำการสำรวจ พ.ศ.	หญิงมีครรภ์	เด็กนักเรียน
2531	27.3	27.3
2532	21.6	16.5
2533	18.8	18.6
2534	18.3	19.0
2535	16.1	18.3
2536	15.3	18.4
2537	14.1	17.8
2538	13.4	16.4
2539	12.9	13.8
2540	13.0	13.3

ที่มา กรมอนามัย (2543)

ผลเสียจากภาวะโลหิตจางจากการขาดธาตุเหล็ก มีหลายประการ (สิริพันธุ์ จุลกรังคะ, 2541) คือ

1. ในหญิงตั้งครรภ์ พบว่า อัตราการตายของแม่และลูกในครรภ์เพิ่มขึ้นในระหว่างการคลอด นอกจากนี้ยังพบว่าเด็กมีโอกาสคลอดก่อนกำหนดเพิ่มมากขึ้น
2. ประสิทธิภาพการทำงานด้อยลง
3. ในเด็กที่ขาดธาตุเหล็กมีประสิทธิภาพในการเรียนรู้ต่ำกว่าปกติ นอกจากนี้มีอาการซึม ไม่กระตือรือร้น ความจำเสื่อม
4. ภูมิคุ้มกันของร่างกายต่ำลง คนที่ขาดธาตุเหล็กจะมีการติดเชื้อของระบบทางเดินหายใจส่วนต้นง่ายขึ้น
5. มีความต้านทานต่ออากาศหนาวน้อยลง ทำให้หนาวสั่นได้ง่าย
6. กล้ามเนื้อทำงานไม่ได้ตามปกติ เนื่องจากเหล็กเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์  $\alpha$ -glycerol phosphate dehydrogenase เมื่อร่างกายขาดเหล็กจะทำให้มีเอนไซม์ชนิดนี้ต่ำลง ทำให้เกิดภาวะความเป็นกรด เป็นผลให้กล้ามเนื้อทำงานตามปกติไม่ได้

#### 2.1.5 แหล่งอาหาร (Food source)

ธาตุเหล็กมีอยู่ในอาหารพวกเนื้อสัตว์ ไข่ ผักและธัญพืช (ประมาณ 1-3 mg/100 kcal) แต่ธาตุเหล็กในนม น้ำดื่ม ผักและผลไม้ที่มีน้ำมากจะมีระดับต่ำ สามารถแบ่งธาตุเหล็กในอาหารได้เป็น 2 ชนิด (Hurrell, 1999) คือ

1. haem iron มาจากฮีโมโกลบิน และไมโอโกลบินในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ในเนื้อไม่มีไขมันมี haem iron ร้อยละ 30-70 ของธาตุเหล็กทั้งหมด โดยร่างกายสามารถดูดซึม haem iron ได้ดี
2. non-haem iron พบได้ทั้งในอาหารพืชและเนื้อเยื่อสัตว์ การดูดซึมขึ้นกับสารยับยั้งหรือสารเพิ่มการดูดซึมที่มีในอาหาร และขึ้นกับภาวะเหล็ก (iron status) ในแต่ละบุคคล

#### ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหาร

กลไกการดูดซึม haem iron ต่างจากกลไกการดูดซึม non-haem iron โดยโมเลกุล haem ถูกดูดซึมได้โดยตรงที่มิวโคซา (mucosa) ของลำไส้เล็ก และเอนไซม์ฮีโมออกซิจีเนส (haem oxygenase) จะปล่อยธาตุเหล็กออกมา ซึ่งการดูดซึมธาตุเหล็กขึ้นกับองค์ประกอบของอาหารเพียงเล็กน้อย โดยร่างกายสามารถดูดซึมได้ร้อยละ 15-35 ขึ้นกับภาวะเหล็กของผู้บริโภค ในประชากรที่บริโภคเนื้อสัตว์ในปริมาณมาก จะรับประทาน haem iron เข้าไปเพียงร้อยละ 10-15



ของธาตุเหล็กทั้งหมดที่เข้าสู่ร่างกาย แต่ร่างกายจะสามารถดูดซึม haem iron ได้ถึงร้อยละ 40 หรือมากกว่า ของปริมาณธาตุเหล็กที่ถูกดูดซึมทั้งหมด

การดูดซึมของ non-haem iron ขึ้นกับองค์ประกอบของอาหารที่บริโภค โดยองค์ประกอบบางชนิดมีคุณสมบัติเป็นสารยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็ก เนื่องจากสามารถจับ (bind) กับธาตุเหล็กใน intestinal lumen สารประกอบที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายหรือจับกันแน่น (tightly bound) ทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมธาตุเหล็กได้ การดูดซึม non-haem iron มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึงมากกว่าร้อยละ 90 แต่ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงร้อยละ 1-20 สารยับยั้งการดูดซึมที่สำคัญคือ กรดไฟติก จากเมล็ดธัญพืชและพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง และสารประกอบโพลีฟีนอลจากเครื่องดื่ม เช่น ชาและกาแฟ นอกจากนี้ยังมีสารยับยั้งชนิดอื่นอีกได้แก่ แคลเซียมจากผลิตภัณฑ์นม และโปรตีนบางชนิดจากพืชตระกูลถั่ว ส่วนสารเพิ่มการดูดซึมที่สำคัญคือ กรดแอสคอร์บิกจากผักและผลไม้ และเปปไทด์ที่ถูกย่อยไปบางส่วนจากเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ

อาหารที่มีธาตุเหล็กมากได้แก่ ตับ ม้าม เนื้อสัตว์ ปลา ไข่แดง เลือดและพืชสีเขียว โดยเฉพาะใบชะพลู ใบบัวบก ใบซีเหล็ก ใบยอ เป็นต้น

### 2.1.6 ผลเสียของการมีธาตุเหล็กมากเกินไปในร่างกาย

ถึงแม้ว่าธาตุเหล็กเป็นสารอาหารที่จำเป็น แต่การมีธาตุเหล็กมากเกินไปมีความเสี่ยงต่อสุขภาพ กลไกการบาดเจ็บของเซลล์และเนื้อเยื่อจากการมีธาตุเหล็กมากเกินไปยังไม่ชัดเจน แต่เข้าใจว่าเกิดจากปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

ถ้าเด็กได้รับธาตุเหล็กมากกว่า 500 มิลลิกรัม จะทำให้เกิดความเป็นพิษเฉียบพลัน และ lethal dose ของเหล็กเฟอร์รัส ( $Fe^{++}$ ) คือ 80-250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักตัว ปริมาณสูงสุดที่ปลอดภัยในการบริโภคคือ 60-75 มิลลิกรัมต่อวัน ซึ่งความเสี่ยงจากการเกิดพิษเฉียบพลันจากธาตุเหล็กที่เสริมเข้าไปในอาหารเป็นไปได้ยาก อาการของพิษเหล็กเฉียบพลันมีตั้งแต่ คลื่นไส้ อาเจียน ถ่ายอุจจาระเป็นเลือด ตลอดถึงอาการช็อก ตับวายเฉียบพลันจนถึงเสียชีวิตได้ ในผู้ที่ป่วยโรค haemochromatosis ซึ่งเป็นโรคทางพันธุกรรมนั้น จะมีการดูดซึมธาตุเหล็กมากเกินไป การที่มีธาตุเหล็กสูงในตับและหัวใจทำให้เกิดโรคตับแข็ง การทำงานของหัวใจล้มเหลวและตายในที่สุด นอกจากนี้ถ้ามี hydroxy radical ในอุจจาระเนื่องจากมีปริมาณธาตุเหล็กที่ไม่ถูกดูดซึมสูง อาจเป็นปัจจัยทำให้เกิดมะเร็งลำไส้ได้ (Hurrell, 1999)

## 2.2 ชนิดของธาตุเหล็กที่ใช้ในอาหาร

ชนิดของธาตุเหล็กที่ใช้ในอาหาร สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด (Hurrell, 1999) คือ สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้ดี (freely water-soluble compounds) สารประกอบเหล็กที่ละลาย

น้ำได้ต่ำแต่ละลายได้ในกรดเจือจาง และสารประกอบเหล็กที่ไม่ละลายน้ำและละลายในกรดเจือจางได้ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

โดยทั่วไปสารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้ดีจะมี bioavailability ในหนู (rat) และคนสูง เช่นเดียวกับสารประกอบเหล็กที่ละลายได้ในกรดเจือจาง แต่สารประกอบเหล็กที่ละลายในกรดเจือจางได้ต่ำจะมี bioavailability ต่ำถึงปานกลาง ทั้งนี้เป็นเพราะการละลายในน้ำย่อยในกระเพาะต่างกัน เนื่องจากคุณลักษณะของสารประกอบเหล็กและองค์ประกอบของมื้ออาหารที่รับประทาน เช่น การมีสารที่สามารถยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็ก ถึงแม้ว่าในการเสริมธาตุเหล็กต้องเลือกใช้สารประกอบเหล็กที่มี bioavailability สูงสุด แต่สารประกอบเหล็กนี้เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสีและรสชาติที่ไม่เป็นที่ยอมรับในอาหารหลายชนิด ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกสารประกอบเหล็กที่มีประสิทธิภาพในการดูดซึมสูงสุด แต่ไม่ทำให้เกิดปัญหาทางประสาทสัมผัสในอาหารที่เสริมธาตุเหล็ก เกณฑ์ในการเลือกสารประกอบเหล็กสำหรับใช้เสริมในอาหาร (Zoller et al., 1980) มีดังนี้

1. ต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของผลิตภัณฑ์ตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บ และการขนส่งในสภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง
2. ไม่ให้รสหรือสีกับผลิตภัณฑ์
3. มีความเสถียร สารประกอบเหล็กที่ใช้ต้องยังมีคุณค่าทางโภชนาการหลังจากผ่านกระบวนการแปรรูป และหลังจากการเก็บไว้เป็นเวลานาน
4. การเติมสารประกอบเหล็กลงในผลิตภัณฑ์นั้น ต้องมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ

### 2.2.1 Bioavailability

Bioavailability ของธาตุเหล็กคือ ปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายได้รับแล้วถูกดูดซึมและนำไปใช้สำหรับการทำหน้าที่ในร่างกายตามปกติ (Hurrell, 1997a)

การดูดซึมของเหล็กที่เสริมในอาหารโดยพื้นฐานขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำย่อยในกระเพาะ และยังขึ้นกับสารเพิ่มหรือยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็กที่มีในมื้ออาหารและภาวะเหล็กของผู้บริโภค ดังนั้นในการเปรียบเทียบ bioavailability ของสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ ต้องเป็นการวัดเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐานคือ เฟอรัสซัลเฟต โดยถือว่ามีค่า relative bioavailability (RBV) เป็น 100 RBV ของสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของสารประกอบเหล็กที่ใช้ในอาหาร

Compound	Approx %Fe	Average relative		Potential for adverse		Approximate relative cost <sup>1</sup>
		bioavailability		organoleptic changes		
		Rat	Man	Color	Fat oxidation	
<b>Freely water soluble</b>						
Ferrous sulfate.7H <sub>2</sub> O	20	100	100			1.0
Dried ferrous sulfate	33	100	100			0.7
Ferrous gluconate	12	97	89			5.1
Ferrous lactate	19	-	106	High	High	4.1
Ferric ammonium citrate	18	107	-			5.2
Ferrous ammonium sulfate	14	99	-			2.1
Ferric choline citrate	14	102	-			11.0
<b>Poorly water soluble/soluble in dilute acid</b>						
Ferrous fumarate	33	95	100			1.3
Ferrous succinate	35	119	92			4.1
Ferric saccharate	10	92	74			5.2
Ferric glycerophosphate	15	93	-	Low	Low	10.5
Ferrous citrate	24	76	74			3.9
Ferrous tartrate	22	77	62			3.9
Ferric sulfate	22	83	34			1.1
Ferric citrate	17	73	31			4.8
<b>Water-insoluble/poorly soluble in dilute acid</b>						
Ferric pyrophosphate	25	45-58	21-74			2.3
Ferric orthophosphate	28	6-46	25-32			4.1
Sodium iron pyrophosphate	15	14	15			3.5
Elemental Fe powders				Negligible	Negligible	
Electrolytic	97	44-48	5-100			0.5
Carbonyl	98	39-66	5-20			1.0
Reduced	97	24-54	13-148			0.2

<sup>1</sup>Relative to ferrous sulfate.7H<sub>2</sub>O = 1.0 for the same level of total iron

ที่มา Hurrell (1999)

### 2.2.2 ปัญหาทางประสาทสัมผัส (Organoleptic problems)

สารประกอบเหล็กเมื่อเติมในอาหารอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนสีและกลิ่นรสที่ไม่เป็นที่ยอมรับ และยังอาจกระตุ้นให้เกิดการตกตะกอน เช่น เมื่อมีการเติมเฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์ริกแอมโมเนียมซิเตรต (ferric ammonium citrate) ในเกลือ มีผลทำให้เกลือเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล เนื่องจากเกิดออกซิเดชัน (ร่มไพโร สุวรรณิก, 2523) รวมทั้งสารประกอบเหล็กที่มีสีไม่ สามารถเสริมในอาหารที่มีสีอ่อนได้ นอกจากนี้สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้มักทำปฏิกิริยากับสารในอาหาร ทำให้เกิดการเปลี่ยนสี เช่น เมื่อมีการเติมเฟอร์รัสซัลเฟตใน infant cereal พบว่าผลิตภัณฑ์เปลี่ยนเป็นสีเทาหรือสีเขียว และถ้ามีกลิ่นด้วยอยู่ด้วยจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้ม (Hurrell, 1999) หรือการเติมน้ำตาลที่เสริมเหล็กในรูปของเฟอร์รัสซัลเฟต หรือเฟอร์ริกแอมโมเนียมซัลเฟต (ferrous ammonium sulfate) ลงในชาหรือกาแฟ จะทำให้ชาหรือกาแฟเปลี่ยนเป็นสีดำ เนื่องจากเกิดสารประกอบไอร์รอนแทนเนต (iron tannate) (Disler et al., 1975)

สารประกอบเหล็กยังทำให้เกิดรสชาติที่ผิดปกติ โดยเฉพาะในเครื่องดื่มซึ่งเป็นผลมาจาก metallic taste ของเหล็กที่ละลายได้ รวมทั้งเป็นตัวเร่งให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันในอาหาร ทำให้ผลิตภัณฑ์มีอายุการเก็บสั้นลง เช่น ในนมพาสเจอร์ไรส์ที่เติมเฟอร์รัสซัลเฟตจะมี oxidized flavor เกิดขึ้นหลังจากเก็บไว้ 2 วัน (Wang และ King, 1973) หรือใน infant cereal ที่เติมเฟอร์รัสซัลเฟตจะเกิดการออกซิเดชันของไขมันขึ้น ทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค หลังจากเก็บไว้ 3 เดือน (Hurrell et al., 1989)

### 2.2.3 สารประกอบเหล็กที่ละลายในน้ำได้ดี (freely water-soluble iron compounds)

สารประกอบกลุ่มนี้เป็นสารประกอบเหล็กที่มี bioavailability มากที่สุด แต่สามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เสริมธาตุเหล็กกลุ่มนี้ เกิดการเปลี่ยนสีและรสชาติที่ไม่เป็นที่ยอมรับได้มากที่สุดเช่นกัน สารประกอบในกลุ่มนี้จำเป็นสำหรับการเสริมธาตุเหล็กในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

สารประกอบแต่ละชนิดในกลุ่มนี้จะมี bioavailability และความสามารถในการทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและรสชาติในผลิตภัณฑ์ได้ใกล้เคียงกัน เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นสารประกอบที่มีราคาถูกที่สุดและใช้เสริมในผลิตภัณฑ์ infant formulas พาสต้าและแป้งจากธัญพืชที่มีระยะเวลาการเก็บสั้น สารประกอบเหล็กในกลุ่มนี้ยังมี เฟอร์ริกกลูโคเนต (ferrous gluconate) ซึ่งสามารถใช้แทนเฟอร์รัสซัลเฟตได้แต่มีราคาแพง นิยมใช้เสริมใน infant formulas มอลต์สก็ดและน้ำองุ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมี เฟอร์ริกแลคเตต (ferrous lactate) เฟอร์ริกแอมโมเนียมซิเตรต เฟอร์ริกแอมโมเนียมซัลเฟต และเฟอร์ริกโคลีนซิเตรต (ferric choline citrate)



#### 2.2.4 สารประกอบเหล็กที่ละลายในกรดเจือจาง (compounds soluble in dilute acid)

ร่างกายสามารถดูดซึมสารประกอบในกลุ่มนี้ได้ดี และทำให้เกิดปัญหาทางประสาทสัมผัสในผลิตภัณฑ์อาหารน้อยกว่าสารประกอบกลุ่มที่ละลายน้ำ สารประกอบในกลุ่มนี้ได้แก่ เฟอร์รัสฟูมาเรต (ferrous fumarate) เฟอร์รัสซัคซิเนต (ferrous succinate) และ เฟอร์ริกแซ็กคาเรต (ferric saccharate) นิยมใช้สารประกอบเหล็กกลุ่มนี้เสริมในผลิตภัณฑ์ infant cereal (Hurrell et al., 1989) และ chocolate drink powder (Hurrell et al., 1991) สารประกอบเหล็กชนิดอื่นในกลุ่มนี้ แสดงในตารางที่ 2.4

#### 2.2.5 สารประกอบเหล็กที่ละลายในกรดเจือจางได้ต่ำ (compounds poorly soluble in dilute acid)

สารประกอบในกลุ่มนี้ได้แก่ เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต (ferric pyrophosphate) ใช้ในผลิตภัณฑ์ infant cereal, chocolate drink powder, ข้าว เป็นต้น เฟอร์ริกออโรฟอสเฟต (ferric orthophosphate) ใช้ใน infant cereal ส่วน elemental iron powder ใช้เสริมในแป้งสาลี breakfast cereal และ infant cereal (Hurrell, 1992)

สารประกอบในกลุ่มนี้นิยมใช้เสริมในอาหาร เพราะไม่ทำให้เกิดปัญหาทางประสาทสัมผัสกับผลิตภัณฑ์ แต่มีข้อเสียคือ ร่างกายจะดูดซึมได้แตกต่างกันมากเพราะสารประกอบไม่สามารถละลายในน้ำย่อยได้ทันที อาจเนื่องมาจากสารประกอบที่นำมาทดสอบเป็นสารประกอบทางการค้าที่มีคุณลักษณะทางเคมีฟิสิกส์แตกต่างกัน หรืออาจมาจากองค์ประกอบในมื้ออาหารที่มีผลต่อการละลายของสารประกอบเหล็กกลุ่มนี้ในน้ำย่อยของกระเพาะ (ตารางที่ 2.4)

### 2.3 การเสริมธาตุเหล็กในอาหาร

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมธาตุเหล็กในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ในช่วงปี 1991-1998 มีดังต่อไปนี้

Hurrell et al. (1991) รายงานว่าสามารถใช้เฟอร์รัสฟูมาเรต ( $\text{Fe}(\text{C}_4\text{H}_2\text{O}_4)$ ) เสริมในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มช็อกโกแลตผงได้ โดยเติมลงในส่วนผสมก่อนการทำแห้งในสภาวะสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งเครื่องดื่มช็อกโกแลตจะได้รับการยอมรับทางประสาทสัมผัสเมื่อเติมนมหรือน้ำที่มีอุณหภูมิไม่เกิน 80 องศาเซลเซียส แต่ถ้าใช้น้ำหรือนมต้มเดือด เครื่องดื่มที่ได้จะเปลี่ยนสีจากแดงน้ำตาลเป็นสีเทา ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ผลการศึกษาการดูดซึมธาตุเหล็กในมนุษย์ พบว่าสามารถดูดซึมได้ร้อยละ 5.27



Viteri et al. (1995) ทดลองเสริมธาตุเหล็กและวิตามินเอในรูปโซเดียมไอธโรนอีดีทีเอ (NaFeEDTA) และ retinyl palmitate ( $C_{36}H_{60}O_2$ ) ในน้ำตาล โดยเติมในขั้นตอนการเหวี่ยงแยก (centrifuge) น้ำตาลชั้นสุดท้าย ขณะที่น้ำตาลยังมีความชื้นประมาณร้อยละ 2 ก่อนนำไปอบแห้ง ธาตุเหล็กในน้ำตาลที่ได้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีความเสถียร โดยมีปริมาณเหล็ก  $124.3 \pm 18.8$  มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และไม่พบการแยกตัวของโซเดียมไอธโรนอีดีทีเอหรือวิตามินเอ ออกจากน้ำตาลไปที่ก้นถุงภาชนะบรรจุในสภาวะการเก็บปกติ (อุณหภูมิ 15-48 องศาเซลเซียส และความชื้นระหว่างร้อยละ 20-95) แต่ถ้าเก็บไว้ที่สภาวะที่รุนแรง น้ำตาลจะเปลี่ยนสีอย่างช้าๆ เป็นสีน้ำตาล ซึ่งสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหลังจากเก็บไว้ 6 เดือน

Ranganathan, Reddy และ Ramamoorthy (1996) ศึกษาการผลิตเกลือเสริมเหล็กและไอโอดีน (double-fortified salt) โดยผสมเหล็กและไอโอดีนในเกลือ 2 วิธี คือ spray mixing และ dry mixing การผสมแบบ spray mixing ทำโดยนำสารละลายผสมของโพแทสเซียมไอโอไดต์ (KI) โพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ) sodium hexametaphosphate (SHMP) และเฟอร์ริสซัลเฟต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) ที่มีความเข้มข้นของไอโอดีนและเหล็ก 40 และ 1000 ppm ชีดพ่นบนเกลือ (common salt) 100 กิโลกรัม และผสมในอ่างผสมที่มีใบพาย (ribbon blender) จนสารละลายกระจายอย่างทั่วถึง ส่วนการผสมแบบ dry mixing ทำโดยขั้นแรกนำสารเคมีพวก KI,  $KIO_3$ , SHMP และ  $FeSO_4$  (ในปริมาณที่ทำให้มีความเข้มข้นของไอโอดีน 40 ppm และเหล็ก 1000 ppm) มาผสมกับเกลือ 1 กิโลกรัมก่อน จากนั้นนำไปผสมกับเกลือที่เหลือ (99 kg) พบว่า การผลิตเกลือเสริมเหล็กและไอโอดีนแบบ spray mixing เกลือที่ได้มีไอโอดีน 1-2 ppm มีลักษณะเปียกและเยิ้มติดกัน เพราะการเติมเหล็กและไอโอดีนในรูปของสารละลายทำให้เกลือมีความชื้นเพิ่มขึ้นและเกาะตัวกัน จึงต้องลดความชื้นในเกลือโดยการระเหยน้ำออก ทำให้สูญเสียไอโอดีนในระหว่างการระเหยน้ำ (ร้อยละ 95-98) เพราะ  $FeSO_4$  จะถูก hydrolyse เมื่อละลายน้ำ ทำให้สารละลายมีความเป็นกรด KI จึงถูกรีดิวซ์ กลายเป็นไอโอดีนอิสระและระเหยออกไปได้ง่าย และเกลือมีสีน้ำตาลอ่อน เนื่องจาก ferrous iron ( $Fe^{++}$ ) เมื่อละลายน้ำจะเกิดออกซิเดชันกลายเป็น ferric iron ( $Fe^{+++}$ ) ซึ่งให้สีน้ำตาล ส่วนเกลือที่ผลิตได้จากการผสมแบบ dry mixing นั้นจะมีลักษณะที่ดีและไม่มีการสูญเสียไอโอดีน

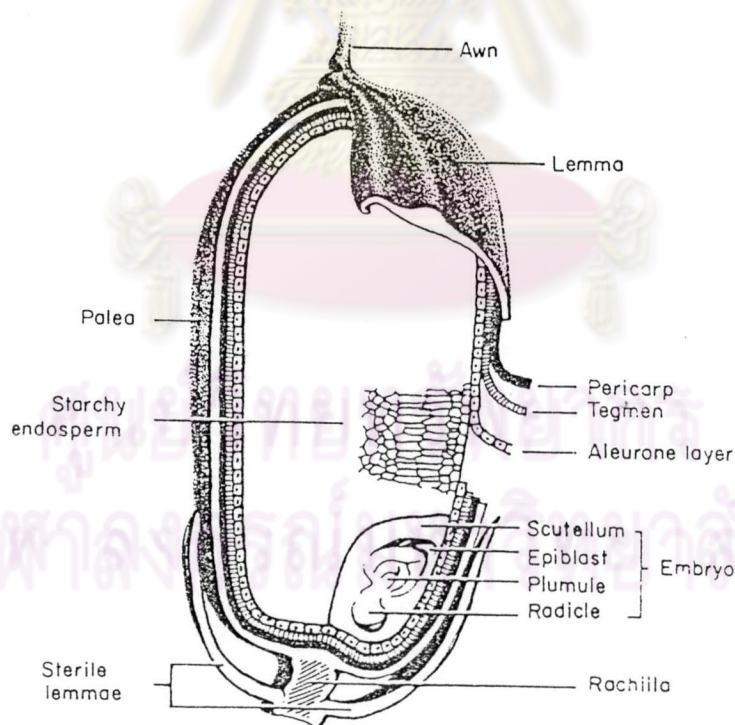
Chavasit และ Tontisirin (1998) รายงานการเสริมไอโอดีน ธาตุเหล็กและวิตามินเอในบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป โดยการเติมลงในเครื่องปรุงให้มีไอโอดีน ธาตุเหล็กและวิตามินเอในปริมาณ 50  $\mu g$  5 mg และ 267  $\mu g$  ตามลำดับ (1 ใน 3 ของ Thai RDI) พบว่าการใช้เฟอร์ริสฟูมาเรต และ Iron EDTA จะทำปฏิกิริยากับเครื่องปรุงรสที่มีเครื่องเทศโดยเฉพาะลูกจันทน์เทศ มีผลให้น้ำซุปลี่ยนเป็นสีดำซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับ ในขณะที่รีดิวส์ไอธโรน (reduced iron) ที่ถูก encapsulated ด้วย hydrogenated oil จะไม่ทำปฏิกิริยากับเครื่องเทศหรือผงเครื่องปรุงรส ดังนั้นจึงเลือกใช้

โพแทสเซียมไฮโดรเจนไดออกไซด์ encapsulated iron และ vitamin A palmitate เสริมลงในเครื่องปรุงร่ง เมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปรสหมูสับโดยใช้ triangle test พบว่าไม่มีความแตกต่าง ( $p>0.05$ ) ระหว่างบะหมี่ที่เติมเครื่องปรุงร่งที่เสริมและไม่เสริมสารอาหารทั้งสามชนิด เมื่อติดตามการเปลี่ยนสีของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปรสเปิดพะไลที่เติมเครื่องปรุงร่งที่เสริมและไม่เสริมสารอาหาร โดยใช้ Munsell color chart ตรวจสอบทุก 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่ามีความแตกต่างของสีหลังจาก 25 นาที

## 2.4 ข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้าสามารถเจริญเติบโตได้ดีทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ข้าวที่ปลูกทั่วไปมี 2 Species คือ *Oryza sativa* L และ *Oryza glaberrima* Steud ซึ่งข้าว *Oryza sativa* เป็นข้าวที่รู้จักกันทั่วไป มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาด ส่วน *Oryza glaberrima* เป็นข้าวที่ปลูกเฉพาะในแอฟริกา (Marshall และ Wadsworth, 1994)

โครงสร้างเมล็ดข้าว (Juliano, 1972; Marshall และ Wadsworth, 1994) เมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา Juliano (1972)



1. แกลบหรือเปลือกข้าว (hull) เป็นส่วนที่ป้องกันเมล็ดข้าวจากแมลงและการเปลี่ยนแปลงความชื้นของเมล็ดข้าวเนื่องจากสภาวะแวดล้อมภายนอก โดยมีน้ำหนักร้อยละ 18-20 ของน้ำหนักข้าวเปลือก มีลักษณะเป็นเยื่อไม้หยาบๆ หุ้มรอบเมล็ดข้าวกลวง ประกอบด้วย เปลือก 2 ฝาประกบกันคนละข้างของเมล็ดตามแนวยาว เปลือกข้าวมีปริมาณโปรตีน ไขมัน สตาร์ชต่ำ แต่มี crude fiber, crude ash ซึ่งส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและมี dietary fiber สูง (ตารางที่ 2.5) นอกจากนี้ยังมีปริมาณแคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส อลูมิเนียม เหล็ก ทองแดงและสังกะสีเล็กน้อย

2. ข้าวกลวง (brown rice) หรือเมล็ดข้าวที่ขัดสีเอาเปลือกออกแล้ว ประกอบด้วย

2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) ลักษณะเป็นเส้นใยประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ epicarp mesocarp (hypocarp) และ endocarp ในชั้นนี้ประกอบด้วยโปรตีน เซลลูโลสและรงควัตถุที่ควบคุมโดยลักษณะพันธุกรรมของข้าว เช่น สีขาว น้ำตาล แดงหรือม่วง เป็นต้น

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลประกอบด้วยเนื้อเยื่อสองชั้นซึ่งมีผนังบาง เซลล์ของเนื้อเยื่อแต่ละชั้นเป็นรูปยาวเรียงตามขวางและเป็นสารพวกไขมัน

2.3 เยื่อแอลูโรน (aleurone layer) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มเมล็ดและห่อหุ้มคัพภะ (embryo) และเอนโดสเปิร์ม (ส่วนที่เป็นแป้ง) ความหนาของเยื่อนี้แตกต่างตามพันธุ์ข้าว ข้าวเมล็ดสั้นมีเยื่อนี้หนากว่าข้าวเมล็ดยาว ชั้นนี้มีโปรตีนสูงนอกจากนี้ยังมีน้ำมัน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

เยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ดและเยื่อแอลูโรนจะถูกขัดสีเป็นส่วนของรำ (bran) ซึ่งมีน้ำหนักประมาณร้อยละ 5-8 ของน้ำหนักข้าวกลวง รำเป็นส่วนของเมล็ดข้าวที่มีคุณค่าทางอาหารมากที่สุด (ตารางที่ 2.5) โดยโปรตีนและไขมันในรำจะอยู่ในส่วนเยื่อแอลูโรน นอกจากนี้รำยังมีวิตามินและแร่ธาตุหลายชนิด

2.4 คัพภะ เป็นส่วนที่จะเจริญไปเป็นต้นอ่อน มีโปรตีนและไขมันสูง

2.5 เอนโดสเปิร์ม คือส่วนของอาหารสะสมอยู่ในชั้นในสุดของเมล็ดข้าว ประกอบด้วยสตาร์ชส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนนอกอยู่ติดกับเยื่อแอลูโรน (subaleurone layer) เป็นส่วนที่มีโปรตีนสูง และชั้นของเนื้อเมล็ดภายใน (starchy endosperm) มีสตาร์ชมากที่สุด เม็ดสตาร์ชมีรูปร่าง 6 เหลี่ยม (hexagonal) ส่วนของ subaleurone layer และบางส่วนของเอนโดสเปิร์มที่ถูกขัดสีออกไปเรียกว่า polish และเมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้วเรียกว่า ข้าวสาร (milled rice หรือ white rice) เป็นส่วนที่มีสตาร์ชมากกว่าส่วนอื่นๆ ของเมล็ดข้าว โดยมีปริมาณไขมันต่ำ มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่ารำและ polish แต่สูงกว่าเปลือกข้าว (ตารางที่ 2.5)



ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร แกลบ รำ คัพภะและ polish  
(% dry basis)

Constituent	Rough	brown	milled	hulls	bran	embryo	polish
Protein (N x 5.95)	6.7-8.3	8.3-9.6	7.3-8.3	2.3-3.2	13.2-17.3	17.7-23.9	13.0-14.4
Crude fat	2.1-2.7	2.1-3.3	0.4-0.6	0.4-0.7	17.0-22.9	19.3-23.8	11.7-14.4
Crude fiber	8.4-12.1	0.7-1.2	0.3-0.6	40.1-53.4	9.5-13.2	2.8-4.1	2.7-3.7
Crude ash	3.4-6.0	1.2-1.8	0.4-0.9	15.3-24.4	9.2-11.5	6.8-10.1	6.1-8.5
Starch	62.1	77.2	90.2	1.8	16.1	2.4	48.3-55.4
Dietary fiber	19.1	4.5	2.7	77.3	27.6-33.3	-	-

ที่มา Marshall และ Wadsworth (1994)

เมล็ดข้าวที่จะนำมาบริโภคได้นั้น ต้องผ่านกระบวนการแปรรูปก่อน โดยนำข้าวเปลือกมากระเทาะเปลือก จนเปลือกข้าวแตกและหลุดออกไป เนื้อข้าวกล้องที่ได้จะถูกนำมาผ่านกรรมวิธีการขัดสี ทำให้เยื่อหุ้มเมล็ดข้าวหรือรำและจมูกข้าว ซึ่งประกอบด้วยสารอาหารและเกลือแร่ต่างๆ หลุดออกไป (ตารางที่ 2.6) เหลือแต่เมล็ดข้าวสีขาว (จำรัส โปร่งศิริวัฒนา, 2534) ซึ่งเป็นที่นิยมของผู้บริโภคมากกว่าข้าวกล้องเนื่องจากลักษณะเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสของตัวข้าวกล้อง และข้าวกล้องต้องใช้เวลาในการหุงมากกว่าข้าวสาร ในบางประเทศมีการบริโภคข้าวที่ผ่านการขัดสีให้ชั้นรำออกไปน้อยลง (undermilled) เพื่อรักษาสารอาหารต่างๆ ที่มีอยู่ในชั้นรำ เช่น ไทอะมิน ไบโอฟลาวิน และไนอะซิน แต่ข้าวที่ได้มีอายุการเก็บรักษาสั้น โดยข้าวจะมีกลิ่นหืนเกิดขึ้นหลังจากเก็บไว้ 2 เดือน ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น (Wadsworth, 1994)

ด้วยเหตุที่ข้าวสารมีปริมาณสารอาหารน้อย จึงมีความพยายามเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของข้าวสาร เพื่อป้องกันการเกิดภาวะขาดสารอาหาร และปรับปรุงภาวะโภชนาการของประชากรที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ซึ่งกรรมวิธีการเพิ่มหรือเสริมสารอาหารในเมล็ดข้าวทำได้ดังนี้

1. การทำข้าวหนึ่ง (parboiled rice) วิธีการดั้งเดิมสำหรับการทำข้าวหนึ่งมีดังนี้ แช่วข้าวเปลือกในน้ำเป็นเวลา 1-3 วัน ขึ้นกับพันธุ์ข้าวที่ใช้และอุณหภูมิของน้ำที่แช่ข้าว ซึ่งอยู่ในช่วงตั้งแต่ 60-82 องศาเซลเซียส ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการแช่ข้าวอาจต้มข้าวเปลือกในน้ำเดือดนาน 20 นาที แล้วนำไปผ่านไอน้ำที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15-20 นาที สตาร์ชในเมล็ดข้าวจะเกิดเจลาตินไนเซชัน แล้วนำมาผึ่งแดดให้แห้งหรือผ่านการอบแห้ง จากนั้นนำมาขัดสีเอาเปลือกออก ข้าวที่ได้มีกลิ่นหอมและมีสีเหลือง (Grist, 1975) ข้าวหนึ่งมีข้อเสียคือ ความร้อนที่ใช้ใน

การนึ่งข้าวจะทำลายสารแอนติออกซิแดนซ์ที่มีอยู่ในข้าวเปลือกตามธรรมชาติ ทำให้ข้าวหนึ่งมีกลิ่นหืนและมีกลิ่นหมัก ข้าวมีสีเหลืองทอง ซึ่งเป็นลักษณะที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ Misaki และ Yasumatsu (1985) รายงานการปรับปรุงวิธีการทำข้าวหนึ่ง โดยการกำจัดอากาศออกจากข้าวเปลือก แล้วแช่ข้าวในน้ำร้อนและมีการให้ความดันร่วมด้วย ซึ่งวิตามินและสารอนินทรีย์ในรำจะเข้าไปอยู่ในเอนโดสเปิร์ม แล้วนำข้าวไปนึ่ง จากนั้นทิ้งให้เย็นก่อนนำไปสี ข้าวที่ได้จากวิธีการนี้เรียกว่า converted rice ซึ่งลดการสูญเสียวิตามินเนื่องจากการล้างข้าวได้ นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงรสชาติของข้าวหนึ่ง โดยการเติมกรดอะซิติกในน้ำที่ใช้แช่ข้าว ข้าวที่ผลิตได้เรียกว่า acid-parboiled rice

## ตารางที่ 2.6 ปริมาณสารอาหารในข้าวกล้องและข้าวสาร

Property	Brown rice	Milled rice	Loss (%)
Weight (% of brown rice)	100	89.9	10
Crude ash (%)	1.56	0.66	62
P (%)	0.38	0.21	50
K (%)	0.26	0.14	52
Mg (%)	0.13	0.058	60
Al (%)	0.006	0.006	10
Ca (%)	0.010	0.006	46
S (%)	0.15	0.14	16
Si (%)	0.041	0.015	67
Cl (%)	0.034	0.031	18
Mn ( $\mu\text{g/g}$ )	16.6	8.4	55
Fe ( $\mu\text{g/g}$ )	12.4	9.0	35
Cu ( $\mu\text{g/g}$ )	5.7	4.7	19
Zn ( $\mu\text{g/g}$ )	22.4	16.4	34
Thiamine ( $\mu\text{g/g}$ )	3.2	0.46	87
Riboflavin ( $\mu\text{g/g}$ )	0.98	0.50	54

ที่มา Wadsworth (1994)



2.การเสริมสารอาหารโดยการเคลือบเมล็ดข้าว (surface coating method) เป็นการเสริมโดยนำธาตุเหล็กและสารอาหารชนิดอื่นมาผสมกับข้าวสาร แล้วเคลือบด้วยสารเคลือบที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะปล่อยธาตุเหล็กและสารอาหารอื่นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดในกระเพาะอาหาร จึงทำให้รักษาสารอาหารไว้ได้ระหว่างการล้างข้าว และเมล็ดข้าวที่ได้จะมีลักษณะและสีเหมือนข้าวปกติ ข้อดีของการเคลือบเมล็ดข้าวคือ สารอาหารมีความคงตัว ไม่ทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่นๆ ในอาหาร วิเคราะห์และตรวจสอบสารอาหารที่เสริมในผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาแพงกว่าการเติมสารอาหารในรูปผงบนเมล็ดข้าว (Hoffpauer และ Wright, 1994)

Peil et al. (1982) ได้ทำการเสริมธาตุเหล็กในรูปปรีดีคัลไอรอนในเมล็ดข้าว เพราะมี bioavailability สูงกว่าเฟอร์ริกออกไซด์ที่นิยมใช้ทั่วไปสำหรับการเสริมธาตุเหล็กในเมล็ดข้าว ร่วมกับวิตามินเอ ไทอะมิน ไนอะซิน ไรโบฟลาวิน โดยวิธีการเคลือบพอลิเมอร์ชนิดที่บริโภคได้ (edible polymer coating) พบว่า สารเคลือบพวกเซลลูโลส (cellulose) ผสม มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารเคลือบ และข้าวที่เสริมธาตุเหล็กและวิตามินด้วยวิธีนี้มีธาตุเหล็ก 2,590 mg/lb (57.10 mg/kg) วิตามินเอ 4,360 mg/lb (96.12 mg/kg) ไทอะมิน 290 mg/lb (6.39 mg/kg) ไนอะซิน 1,340 mg/lb (29.54 mg/kg) และไรโบฟลาวิน 100 mg/lb (2.21 mg/kg) เมื่อนำข้าวดังกล่าวไปหุงพบว่า ปริมาณสารอาหารที่คงอยู่เป็นดังนี้ ธาตุเหล็ก 100 % วิตามินเอ 70 % ไทอะมิน 18 % ไนอะซิน 18 % และไรโบฟลาวิน 21 % ซึ่งธาตุเหล็กและวิตามินเอมีปริมาณเหลืออยู่ในข้าวมากกว่าวิตามินชนิดอื่น เนื่องจากธาตุเหล็กและวิตามินเอไม่ละลายน้ำ เมื่อวิเคราะห์ปริมาณไทอะมิน และวิตามินเอในข้าวที่ผ่านการเคลือบที่เวลา 3 14 และ 31 สัปดาห์ พบว่าปริมาณสารอาหารทั้งสองชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าการเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ทำให้สารอาหารที่ถูกเคลือบมีความเสถียร

Hunnell, Yasumatsu และ Moritaka (1985) รายงานวิธีการเสริมธาตุเหล็กในข้าวโดยเสริมในรูปเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตร่วมกับสารอาหารชนิดอื่น เพราะสารประกอบเหล็กชนิดนี้ไม่มีผลต่อลักษณะปรากฏ กลิ่น และรสชาติของข้าวสุก ในขั้นแรกทำการแช่เมล็ดข้าวในสารละลายกรดที่มีวิตามินบี 1 บี 2 บี 6 ไนอะซิน และกรดแพนโทตินิก แล้วนำมาอบไอน้ำ ทำแห้งแล้วเคลือบด้วยวิตามินอี แคลเซียม และธาตุเหล็ก สุดท้ายเคลือบด้วยสารป้องกันการหลุดของสารอาหารบรรจุข้าวในภาชนะที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อป้องกันการเสื่อมสลายของวิตามินอี พบว่าข้าวที่ได้มีวิตามินบี 1 1.5 mg/g วิตามินบี 2 0.06 mg/g ไนอะซิน 6.0 mg/g กรดแพนโทตินิก 2.34 mg/g วิตามินบี 6 0.08 mg/g วิตามินอี 1.38 mg/g แคลเซียม 8.0 mg/g และเหล็ก 1.2 mg/g ส่วนปริมาณวิตามินและแร่ธาตุที่คงอยู่หลังการหุงเป็นดังนี้ วิตามินบี 1 89 % วิตามินบี 2 88 % ไนอะซิน 92 % กรดแพนโทตินิก 97 % วิตามินบี 6 100 % และวิตามินอี 85 % ส่วน



แคลเซียมและเหล็กไม่มีรายงาน จากการสำรวจผู้บริโภคพบว่า การผสมข้าวชนิดนี้กับข้าวขาวในอัตราส่วน 1 : 200 นั้น ผู้บริโภคยังคงให้การยอมรับทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น และรสชาติของข้าวสุก นอกจากนี้ยังรายงานว่า ผู้หญิงอายุ 49-74 ปี จำนวน 20 คน ที่ได้รับข้าวเสริมคุณค่านี้เป็นเวลา 1 ปี จะมีระดับฮีโมโกลบินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.3 เป็นร้อยละ 14.8

Valdez et al. (1996) ตรวจสอบ bioavailability ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก โดยใช้ ethyl cellulose และ methyl cellulose เป็นสารเคลือบ และใช้ hexane และ isopropyl alcohol เป็นตัวทำละลาย จากมื้ออาหารที่มีข้าวธรรมดา (meal A) และมื้ออาหารที่มีข้าวเสริมธาตุเหล็กในรูปเฟอร์รัสซัลเฟต (meal B) โดยที่ข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ยังไม่ได้หุง มีปริมาณธาตุเหล็ก 5.71 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม เมื่อพิจารณาปริมาณ non-haem iron ทั้งหมด พบว่าจำนวนธาตุเหล็กที่ถูกดูดซึมจาก meal B เพิ่มขึ้นจาก meal A 0.1 mg (ร้อยละ 33) อย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าสามารถใช้เฟอร์รัสซัลเฟตในการเสริมธาตุเหล็กในข้าวได้ และควรพิจารณาใช้สารประกอบเหล็กชนิดอื่นด้วยคือ โซเดียมไอโรนอีดีทีเอ และไอโรนไกลซีน (iron glycine) เพราะสารประกอบเหล็กทั้งสองชนิดจะไม่ได้รับผลกระทบจากสารยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในมื้ออาหาร รวมทั้งการเพิ่มสารเสริมการดูดซึมธาตุเหล็ก (iron enhancer) เช่น กรดแอสคอร์บิก หรือลดสารยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็กในมื้ออาหารเพื่อปรับปรุงการดูดซึมธาตุเหล็ก

3. การทำเมล็ดข้าวเทียม (simulated rice) Kapanidis และ Lee (1996) ทดลองผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็กด้วยวิธีเอกซ์ทรูชัน โดยใช้เฟอร์รัสซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) เพราะเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมี bioavailability สูง โดยละลายเฟอร์รัสซัลเฟตในน้ำ จากนั้นปรับสารละลายให้เป็นกรดก่อนนำไปเติมบนแป้งข้าว แล้วผสมให้เข้ากัน (มีปริมาณเหล็ก 3.3-9.4 มิลลิกรัมต่อแป้งข้าว 1 กรัม) นำไป extruded แล้วทำแห้งที่อุณหภูมิห้อง 2 วัน ซึ่งความชื้นในเมล็ดข้าวเทียมมีประมาณร้อยละ 8 เมื่อนำข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ได้ไปผสมกับข้าวหอมมะลิในอัตราส่วน 1:100 ถึง 1:200 แล้วทดสอบทางประสาทสัมผัสประเมินคุณลักษณะของข้าวที่ผสมก่อนและหลังการหุง ซึ่งคุณลักษณะต่างๆ ของข้าวที่ผสมกับข้าวเสริมธาตุเหล็กไม่แตกต่างจากข้าวหอมมะลิปกติ ยกเว้นการยอมรับรวม เนื่องจากมี metallic aftertaste แต่สามารถแก้ไขได้โดยการลดจำนวนของธาตุเหล็ก และ/หรือเพิ่มอัตราส่วนการเจือจาง

## 2.5 การเสริมธาตุเหล็กในแป้ง

การเสริมธาตุเหล็กและสารอาหารชนิดอื่นในแป้ง ซึ่งส่วนใหญ่มีการวิจัยในแป้งสาลีโดยใช้วิธีการเสริมในรูปแบบผง (Potter และ Hotchkiss, 1998) สารประกอบเหล็กที่ใช้เสริมในแป้งสาลีต้องไม่ทำให้เกิดการหืนของแป้งในระหว่างที่เก็บไว้เป็นเวลานาน โดยแป้งควรมีอายุการเก็บ 18 เดือน

ในแป้งสาลีที่มีไขมันประมาณร้อยละ 1 ซึ่งไขมันเหล่านี้จะเกิดการหืนขึ้นระหว่างการเก็บแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีสารโปรออกซิแดนซ์ (prooxidant) อยู่ด้วย

ชนิดของสารประกอบหลักที่ใช้เสริมในแป้งส่วนใหญ่คือ เพอร์ร็อกซัลเฟต วิตามินอีหรือวิตามินซี เพอร์ริกออกซิฟอสเฟต หรือไฮเดียมเพอร์ริกไพโรฟอสเฟต ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเสริมธาตุเหล็กในแป้ง มีดังนี้

Martin และ Halton (1964) พบว่า แป้งสาลีธรรมชาติที่ไม่ใหม่ (untreated freshly milled flour) ซึ่งมีการเสริมคุณค่าทางอาหารด้วย master-mix ที่ประกอบด้วย วิตามินบี 1 กรดนิโคตินิก และสารประกอบหลักชนิดต่างๆ คือ วิตามินอีหรือวิตามินซี เพอร์ร็อกซัลเฟต เพอร์ริกฟลูออโรโคเนต เพอร์ริกซัลเฟต เพอร์ริกแอมโมเนียมซัลเฟตที่มีสีน้ำตาล (ประกอบด้วยแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) ประมาณร้อยละ 9 ธาตุเหล็กร้อยละ 16.5-18.5 และ hydrated citric acid ประมาณร้อยละ 65 (Budavari et al., 1989) ) และเพอร์ริกแอมโมเนียมซัลเฟตที่มีสีเขียว (ประกอบด้วยแอมโมเนีย ประมาณร้อยละ 7.5 ธาตุเหล็กร้อยละ 14.5-16.0 และ hydrated citric acid ประมาณร้อยละ 75 สารประกอบที่อยู่ในรูปสีเขียวนี้ สามารถถูกวิเศษโดยแสงเป็น ferrous salt ได้ง่ายกว่าสารประกอบที่อยู่ในรูปสีน้ำตาล (Budavari et al., 1989)) โดยให้มีธาตุเหล็ก 0.7 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม เมื่อเก็บไว้ที่ 26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 เดือน แป้งที่ได้ยังคงปราศจากกลิ่นหืน และขนมปังที่ทำจากตัวอย่างแป้งที่เสริมคุณค่าเหล่านี้ ยังคงมีคุณภาพด้านกลิ่น รสชาติ และลักษณะทั่วไปเหมือนขนมปังที่ทำจากแป้งธรรมดา ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารแอนติออกซิแดนซ์ตามธรรมชาติที่มีอยู่ในแป้ง เช่น วิตามินอี ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันของสารประกอบหลักที่เติมลงไป ในแป้ง แต่แป้งสาลีเสริมคุณค่าทางอาหารที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยคลอรีนไดออกไซด์ 17 ppm หลังจากเก็บไว้ที่ 26 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 เดือน ตัวอย่างแป้งทั้งหมดจะมีกลิ่นหืนเกิดขึ้น ซึ่งการหืนจะเกิดอย่างชัดเจนในแป้งที่มีเพอร์ริกฟลูออโรโคเนต ตามด้วยแป้งที่มีเพอร์ริกซัลเฟต ขณะที่ตัวอย่างแป้งที่เก็บที่อุณหภูมิห้อง (15.6-21.1 องศาเซลเซียส) จะไม่พบการหืนอย่างชัดเจน แต่แป้งที่มีเพอร์ริกซัลเฟต และเพอร์ริกฟลูออโรโคเนต กำลังมีการหืนเกิดขึ้น ดังนั้นวิตามินอีหรือวิตามินซี และเพอร์ริกแอมโมเนียมซัลเฟตที่อยู่ในรูปสีเขียวเป็นสารประกอบหลักที่ทำให้เกิดการหืนในแป้งน้อยที่สุด

Harrison et al. (1976) ทดสอบการยอมรับทางด้านกลิ่นของผู้บริโภคที่มีต่อแป้งสาลีไม่ฟอกสีที่มีการเสริมธาตุเหล็ก 6 ชนิด พบว่า เมื่อเก็บไว้ที่สภาวะเร่ง 50 องศาเซลเซียส นาน 8 วัน แป้งที่เสริมด้วยเพอร์ริกซัลเฟตยังคงได้รับการยอมรับทางด้านกลิ่น สำหรับตัวอย่างแป้งที่เสริมด้วยวิตามินอีหรือวิตามินซีมีการเก็บที่ดีกว่า แต่แป้งทุกตัวอย่างยังคงได้รับการยอมรับ เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (23 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 เดือน สำหรับขนมปังที่ทำจากตัวอย่างแป้งที่เสริมด้วยธาตุเหล็กทั้ง 6 ชนิด ในระดับ 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมนั้น ผู้บริโภคไม่พบความแตกต่างทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น หรือรสชาติ และให้การยอมรับขนมปังเหล่านี้ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่



จะใช้เฟอร์ริซัลเฟตเสริมในแป้งสาลีได้ โดยต้องควบคุมสภาวะการเก็บ ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อ การยอมรับของแป้งที่เสริมธาตุเหล็ก

Hurrell (1984, cited in Hurrell, 1997) ทดลองเสริมสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ ได้แก่ เฟอร์ริซัลเฟต เฟอร์ริกลูโคเนต เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต และวีตวีส์ไอร้อนลงใน pre-cooked whole wheat flour โดยให้มีเหล็กในระดับ 15 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม แล้วทำการศึกษาอายุ การเก็บที่ 37 องศาเซลเซียส โดยการวัดเพนเทนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการ oxidative degradation ของกรดลิโนเลอิก ซึ่งการเกิดเพนเทนสัมพันธ์กับการเกิดกลิ่นที่ผิดปกติ พบว่าแป้งที่เสริมด้วย เฟอร์ริซัลเฟตและเฟอร์ริกลูโคเนตมีเพนเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อทดสอบทางประสาท สัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบไม่ยอมรับแป้งที่เสริมธาตุเหล็กทั้ง 2 ชนิดนี้หลังจากเก็บไว้ 4-6 สัปดาห์ เนื่องจากสารประกอบเหล็กทั้งสองชนิดไปกระตุ้นให้เกิดการออกซิเดชันของไขมัน ส่วนแป้งที่เสริม ด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตและวีตวีส์ไอร้อน มีเพนเทนเกิดขึ้นน้อยกว่าและผู้ทดสอบยังคงให้การ ยอมรับหลังจากเก็บไว้ 7 สัปดาห์

ดังนั้นสามารถใช้วีตวีส์ไอร้อน เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตเสริมในแป้งสาลีได้ โดยไม่มีผลใน การเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้ง ทำให้สามารถเก็บแป้งได้เป็นเวลานาน สำหรับ เฟอร์ริซัลเฟตสามารถใช้เสริมในแป้งที่ไม่ต้องการระยะเวลาการเก็บนาน หรือถ้าต้องการเสริมใน แป้งที่ต้องเก็บไว้เป็นเวลานาน ต้องมีการควบคุมสภาวะการเก็บแป้งให้เหมาะสม (อุณหภูมิไม่เกิน 26 องศาเซลเซียส)

Hurrell (1997b) แนะนำให้ใช้โซเดียมไอร้อนอีดีทีเอเสริมในแป้ง เพราะสามารถป้องกัน เหล็กจากการถูกจับ (binding) ด้วยกรดไฟติกที่มีในธัญพืชและเมล็ดพืชตระกูลถั่ว ทำให้ร่างกาย สามารถดูดซึมเหล็กได้ดีขึ้น และไม่เร่งให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันในแป้ง ทำให้สามารถเก็บ แป้งไว้ได้เป็นเวลานาน จากการทดลองเสริมโซเดียมไอร้อนอีดีทีเอ เฟอร์ริซัลเฟต หรือเฟอร์ริซัลเฟตกับโซเดียมอีดีทีเอ ( $\text{Na}_2\text{EDTA}$ ) ในแป้งสาลี ซึ่งระดับของเหล็กคือ 15 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม แล้ววัดการเกิดเพนเทนของแป้งที่เก็บไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส พบว่าแป้งที่ไม่เสริมและเสริม ด้วยโซเดียมไอร้อนอีดีทีเอ มีการเกิดออกซิเดชันของไขมันเล็กน้อยในระหว่างที่เก็บได้ 6 เดือน ส่วนแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริซัลเฟต หรือเฟอร์ริซัลเฟตกับโซเดียมอีดีทีเอ มีการเกิดออกซิเดชันของ ไขมันตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บ แสดงว่าโซเดียมไอร้อนอีดีทีเอเป็นสารประกอบเหล็กที่ดีชนิด หนึ่งสำหรับการเสริมธาตุเหล็กในแป้งหรือธัญพืชที่มีกรดไฟติกเป็นองค์ประกอบ เพราะร่างกายยัง สามารถดูดซึมเหล็กไปใช้ได้และไม่เร่งให้เกิดการออกซิเดชันของไขมันในระหว่างการเก็บ



จากรายงานวิจัยในวารสารปริทัศน์ งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกสารประกอบเหล็กสำหรับการศึกษาการเสริมธาตุเหล็กในเมล็ดข้าวและแป้งข้าว 3 ชนิด คือ เฟอร์ริซัลเฟต เพราะเป็นสารที่มี iron bioavailability สูง เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต เนื่องจากไม่มีผลต่อลักษณะปรากฏ กลิ่น และรสชาติของข้าวสุกที่เสริมธาตุเหล็ก และไม่มีผลในการเร่งการเกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้ง ทำให้สามารถเก็บแป้งได้เป็นเวลานาน และไฮดรอนไกลซีน เพราะเป็นสารที่มี bioavailability สูง และไม่ได้รับผลกระทบจากสารยับยั้งการดูดซึมธาตุเหล็กที่เป็นองค์ประกอบในอาหาร



ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีวภาพ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย