

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ความสำคัญของธาตุไอโอดีน

โดยทั่วไปร่างกายผู้ใหญ่มีไอโอดีนทั้งหมดในร่างกาย 20–50 มิลลิกรัม ไอโอดีนร้อยละ 70-80% อยู่ในต่อมไทรอยด์ (Orten and Neuhaus, 1982) ไอโอดีนเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการสร้างฮอร์โมนไทร็อกซิน (T4) และไตรไอโอดิโรนิน (T3) โดยการสร้างฮอร์โมนทั้ง 2 ชนิดนี้ ต้องอาศัยกรดอะมิโนไทโรซีนและไอโอดีน ฮอร์โมนไทร็อกซินและไตรไอโอดิโรนินนั้นเป็นฮอร์โมนในต่อมไทรอยด์ ซึ่งมีความสำคัญต่อร่างกาย คือ ช่วยในขบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน รวมทั้งช่วยในการทำงานของระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทอัตโนมัติ

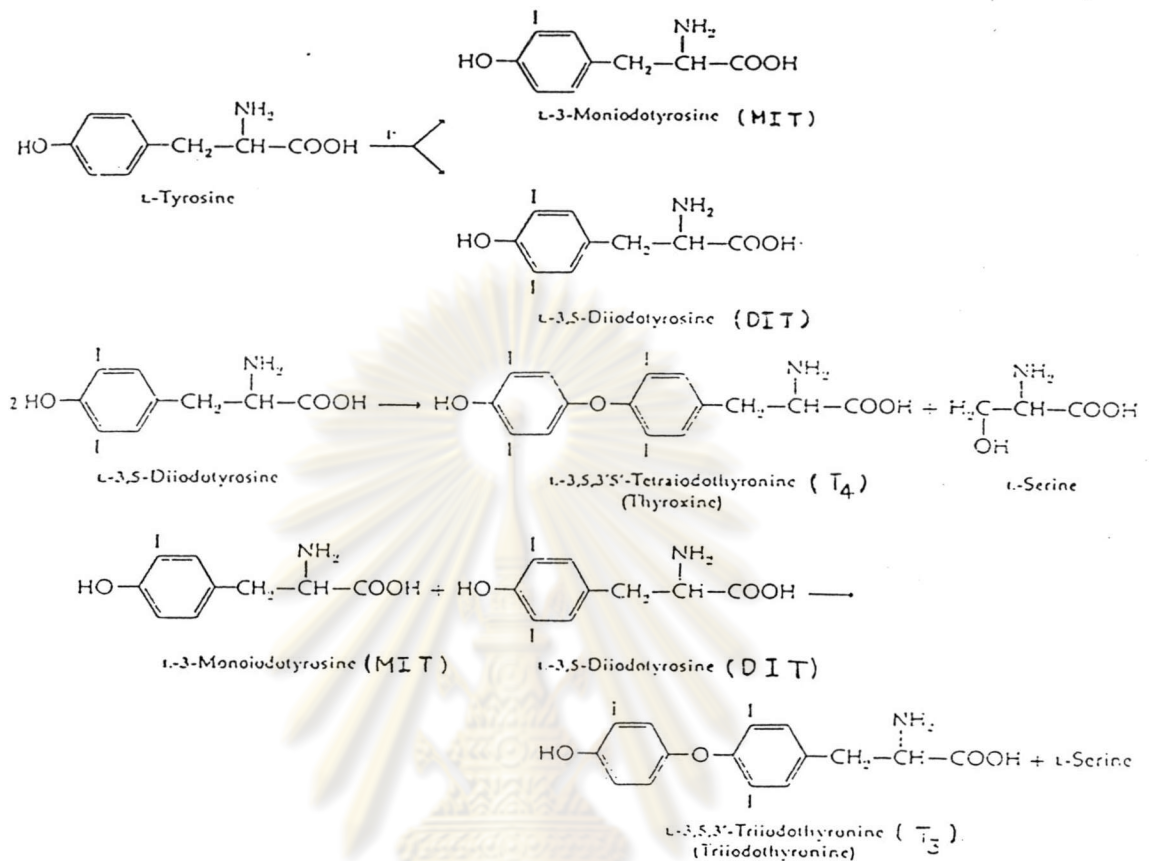
2.1.1 การดูดซึม (Absorption)

ไอโอดีนและไอโอดีนที่รวมกับโปรตีนในอาหารจะถูกรีดิวซ์เป็นไอโอดิดซึ่งเป็นรูปแบบที่ร่างกายดูดซึมนำไปใช้ได้ (Hurrell, 1997) โดยจะถูกดูดซึมบริเวณลำไส้เล็ก (Mc.Williams and Stare, 1981) ไอโอดิดที่ถูกดูดซึมจะผ่านเข้ากระแสเลือดแล้วเข้าสู่ต่อมไทรอยด์เพื่อใช้ในการสร้างฮอร์โมน ส่วนที่เกินความต้องการของร่างกายจะถูกขับถ่ายออกผ่านทางไตในรูปของปัสสาวะ ภายในต่อมไทรอยด์ไอโอดิดจะถูกออกซิไดส์ไปเป็นไอโอดีนด้วยเอนไซม์ thyroid peroxidase และ hydrogen peroxide ดังสมการ

thyroid peroxidase



ไอโอดีนที่ได้จะจับกับ tyrosine residue ที่รวมอยู่กับ thyroglobulin (glycoprotein เฉพาะของต่อมไทรอยด์) เป็น mono- และ diiodothyrosine (MIT และ DIT) จะรวมตัวกันได้เป็น triiodothyronine และ DIT จะรวมตัวกันเองเป็น tetraiodothyronine ซึ่งเป็น active form ของฮอร์โมนไตรไอโอดิโรนินและไทร็อกซิน (White et al., 1973) กลไกการสร้างฮอร์โมนไทร็อกซินและไตรไอโอดิโรนินแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกการสร้างฮอร์โมนไทรอยด์และไตรไอโอดิโอริน

ที่มา : White และคณะ (1973)

2.1.2 แหล่งไอโอดีนในอาหารและความต้องการของร่างกายมนุษย์

การที่ร่างกายได้รับไอโอดีน 50-75 ไมโครกรัมต่อวันสามารถป้องกันการเกิดโรคคอพอกได้ ความต้องการปริมาณไอโอดีนของแต่ละคนนั้นไม่เท่ากันขึ้นกับเพศ อายุ สภาพร่างกาย ซึ่งกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุขได้ระบุปริมาณธาตุไอโอดีนที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เพื่อให้ร่างกายได้รับไอโอดีนเพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย โดยเฉลี่ยแล้วร่างกายต้องการไอโอดีนประมาณวันละ 150 ไมโครกรัม (กรมอนามัย, 2532)

ปริมาณไอโอดีนในแหล่งอาหารตามธรรมชาติขึ้นกับปริมาณไอโอดีนในดินและแหล่งน้ำ แหล่งอาหารที่มีปริมาณสูง ได้แก่ อาหารทะเลต่างๆ โดยเฉพาะ หอยนางรม เกล็ดไอโอดีน

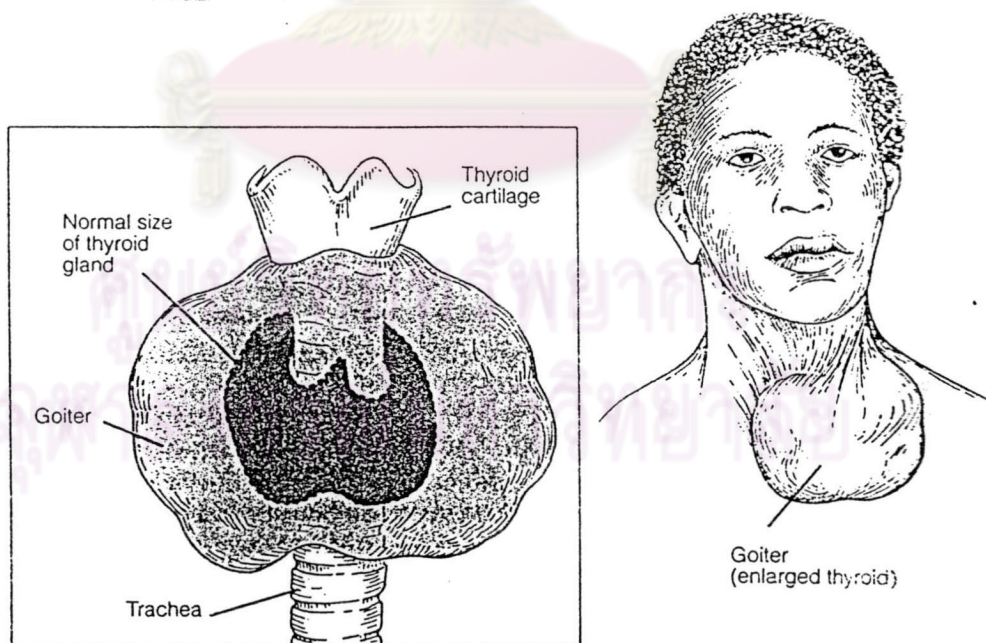
ตารางที่ 2.1 ความต้องการไอโอดีน เหล็กและสังกะสีประจำวันสำหรับคนไทย

	Age	Iodine (μg)	Iron(mg)	Zinc(mg)
	(months)			
Infants	under 3	-	-	-
	3 – 5	40	6	3
	6 – 8	50	7	5
	9 – 11	50	8	5
	(years)			
Children	1 – 3	70	10	10
	4 – 6	90	10	10
	7 – 9	120	10	10
Boys	10 – 12	150	12	15
	13 – 15	150	12	15
	16 – 19	150	10	15
Girls	10 – 12	150	15	15
	13 – 15	150	15	15
	16 – 19	150	15	15
Men ,Women	20 - 29	150	10,15	15
	30 – 39	150	10,15	15
	40 - 49	150	10,15	15
	50 – 59	150	10	15
	>60	150	10	15
Pregnant		175	45	20
Lactating	0 – 5 months postpartum	200	15	25
	>6 months postpartum	200	15	25

ที่มา : กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข พ.ศ. 2532

2.1.3 การขาดไอโอดีน (Iodine deficiency) และผลเสียของการมีไอโอดีนมากเกินไปในร่างกาย

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นว่าไอโอดีนจำเป็นต่อการสร้างฮอร์โมนไทร็อกซิน (T4) และไตรไอโอโดไทรโรนีน (T3) เป็นฮอร์โมนในต่อมไทรอยด์ที่อยู่ภายใต้การควบคุมของต่อมใต้สมองส่วนหน้า ซึ่งทำหน้าที่หลั่งฮอร์โมนอีกชนิดหนึ่ง เรียกว่า ไทรอยด์สติมูเลตติ้งฮอร์โมน (thyroid stimulating hormone) หรือ TSH ฮอร์โมน TSH จะทำหน้าที่กระตุ้นให้ต่อมไทรอยด์สร้างฮอร์โมน T4 และ T3 เมื่อร่างกายมีฮอร์โมน T4 และ T3 มากพอแล้วจะส่งสัญญาณให้ต่อมใต้สมองส่วนหน้าลดการผลิตฮอร์โมน TSH เพื่อไม่ให้มี T4 และ T3 มากเกินไป เมื่อร่างกายได้รับไอโอดีนไม่พอ จะมีผลกระทบต่อการทำงานของต่อมไทรอยด์ ทำให้มีปริมาณ T4 ลดต่ำลง ทำให้เสียสมดุลในการควบคุมการทำงานของต่อมไทรอยด์ โดยฮอร์โมน TSH จะมีระดับสูงขึ้น และกระตุ้นให้เซลล์ของต่อมไทรอยด์แบ่งตัวมากขึ้น พร้อมทั้งขยายใหญ่ขึ้นด้วย มีผลให้ต่อมไทรอยด์มีขนาดโตขึ้น ทำให้คอโตซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า คอพอก (goiter) แสดงในรูปที่ 2.2 การขาดไอโอดีนเกิดได้ทุกช่วงอายุ โดยเฉพาะถ้าเกิดในหญิงมีครรภ์ แม่อาจแท้งบุตร หรือเด็กที่คลอดออกมามีความพิการ เป็นใบ้ หูหนวก ปัญญาอ่อนช่วยเหลือตัวเองไม่ได้ ซึ่งเรียกลักษณะดังกล่าวว่า เครตินิซึม (cretinism) ส่วนถ้าร่างกายได้รับไอโอดีนในปริมาณมากเกินไปก็จะทำให้เป็นโรคคอพอกได้เช่นเดียวกันกับเมื่อร่างกายขาดไอโอดีน (Williams, 1988)



รูปที่ 2.2 โรคคอพอกซึ่งเกิดจากการขาดธาตุไอโอดีน

ที่มา : Williams (1988)

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมไอโอดีนไปใช้

ความสามารถของร่างกายที่ดูดซึมไอโอดีนไปใช้ (Iodine bioavailability) หมายถึง ปริมาณไอโอดีนที่ร่างกายสามารถดูดซึมจากอาหารและใช้ในการผลิตไทรอยด์ฮอร์โมน (Hurrell, 1997)

ในอาหารมีองค์ประกอบบางชนิดที่สามารถขัดขวางการดูดซึมไอโอดีนของร่างกายทำให้ใช้ประโยชน์ได้น้อยลง ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า goitrogens พบในอาหารทั่วไปที่บริโภคโดยเฉพาะพืชตระกูล *Brassica* เช่น กะหล่ำปลี หัวผักกาด เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในมันสำปะหลัง และข้าวฟ่าง goitrogens หลักที่พบในพืช คือ สารจำพวก glucosides ที่มี sulfur เป็นองค์ประกอบ (glucosinolates) (Fenwick and Heaney, 1983) glucosinolates ที่สำคัญ มี 2 ชนิด คือ thiocyanates ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนย้ายไอโอดีนไปยังต่อมไทรอยด์ อีกชนิดหนึ่ง คือ oxazolidine-2-thiones จะยับยั้งการเกิด iodination ของ thyroglobulin และการรวมตัวของ iodotyrosine residue

สารประกอบ phenolic บางชนิดที่มีอยู่ในถั่วลันเตา ถั่วเหลือง และข้าวฟ่าง หรือสารประกอบ phenolic บางชนิดที่มีอยู่ในน้ำดื่ม เช่น resorcinol อาจเป็นสาร goitrogens ได้ (Gaitan, 1990)

2.1.5 รูปแบบของไอโอดีนที่ใช้ในอาหาร

สารประกอบไอโอดีนที่นิยมใช้ในอาหารมี 2 รูปแบบ คือ อัลคาไลด์ไอโอไดด์ และ อัลคาไลด์ไอโอเดท โดยปกติแล้วไอโอดีนมีสมบัติระเหยเป็นไอได้ง่ายเมื่อสัมผัสกับแสงแดดและความร้อน (McDowell, 1992) ในการเลือกใช้สารประกอบไอโอดีนควรพิจารณาถึงปริมาณการใช้และความคงตัวของสภาพอากาศของประเทศนั้นๆ เพื่อลดการสูญเสียปริมาณไอโอดีน (ฉัตรชัย เจนการวณิช, 2542) ประเทศไทยมีสภาพอากาศแบบร้อนชื้น ซึ่งอัลคาไลด์ไอโอเดทมีความคงตัวของสภาพที่ต้องสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าอัลคาไลด์ไอโอไดด์ โดยเฉพาะในสภาพอากาศแบบร้อนชื้นที่เป็นสภาวะเอื้อต่อการเกิด oxidation อัลคาไลด์ไอโอเดทมักอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของเกลือและมีความสามารถละลายในน้ำได้น้อยกว่าและไม่ระเหยง่ายเหมือนอัลคาไลด์ไอโอไดด์ จึงสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งไอโอดีนในอาหารคนโดยไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายเมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสม (กุลยา จันทรอรุณ, 2533; George and Gessner, 1966; McDowell, 1992) ซึ่งสมบัติทางเคมีของไอโอดีนรูปแบบต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของสารประกอบไอโอดีน (Kutsky, 1981)

I ₂ Compounds	Reactions		Solubility		Density	MW	MP (°C)	XL form	Color	Appearance	%Element		
	Heat (°C)	Alr	H ₂ O (g/100cc)	Alc.								Eth.	Acid
NaI	BP 1304°	dellq. alk. pH8-9	184	S	NA	NA	3.67	-149.9	651°	cubic	col./wh.	C, G	-84.7
KI	BP 1330°	dellq. alk. pH7-9	144	S	SS	NA	3.12	-166.0	686°	cubic hex.	col./wh.	C, G, P	-76.5
KIO ₃	d. > 100°	NA	8.5	I	NA	NA	3.89	-214.0	560°	monocl.	col./wh.	C, P	-18.3

อักษรย่อ: dellq. = deliquesces; Alc. = alcohol; Eth. = ether; I = insoluble; SS = slightly soluble; S = soluble; hyd. = hydrous; anh. = anhydrous; d. = decomposes; XL = crystal; Powd. = powder; col. = colored; wh. = white; C = crystalline; G = granular; P = powder; MW = molecular weight; MP = melting point; NA = not available; alk. = alkaline; hex. = hexagonal; monocl. = monoclinic; BP = boiling point

เมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีของไอโอดีนรูปแบบต่างๆข้างต้น งานวิจัยนี้เลือกสารประกอบไอโอดีนในรูปของโพแทสเซียมไอโอเตทในการเสริมไอโอดีนในข้าว เนื่องจากมีสมบัติที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งของไอโอดีนในอาหารคนโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค(กุลยา จันทรอรุณ, 2533; George and Gessner, 1966; McDowell, 1992) และเหมาะสมกับสภาพอากาศของประเทศไทย

2.2 ความสำคัญของธาตุเหล็ก

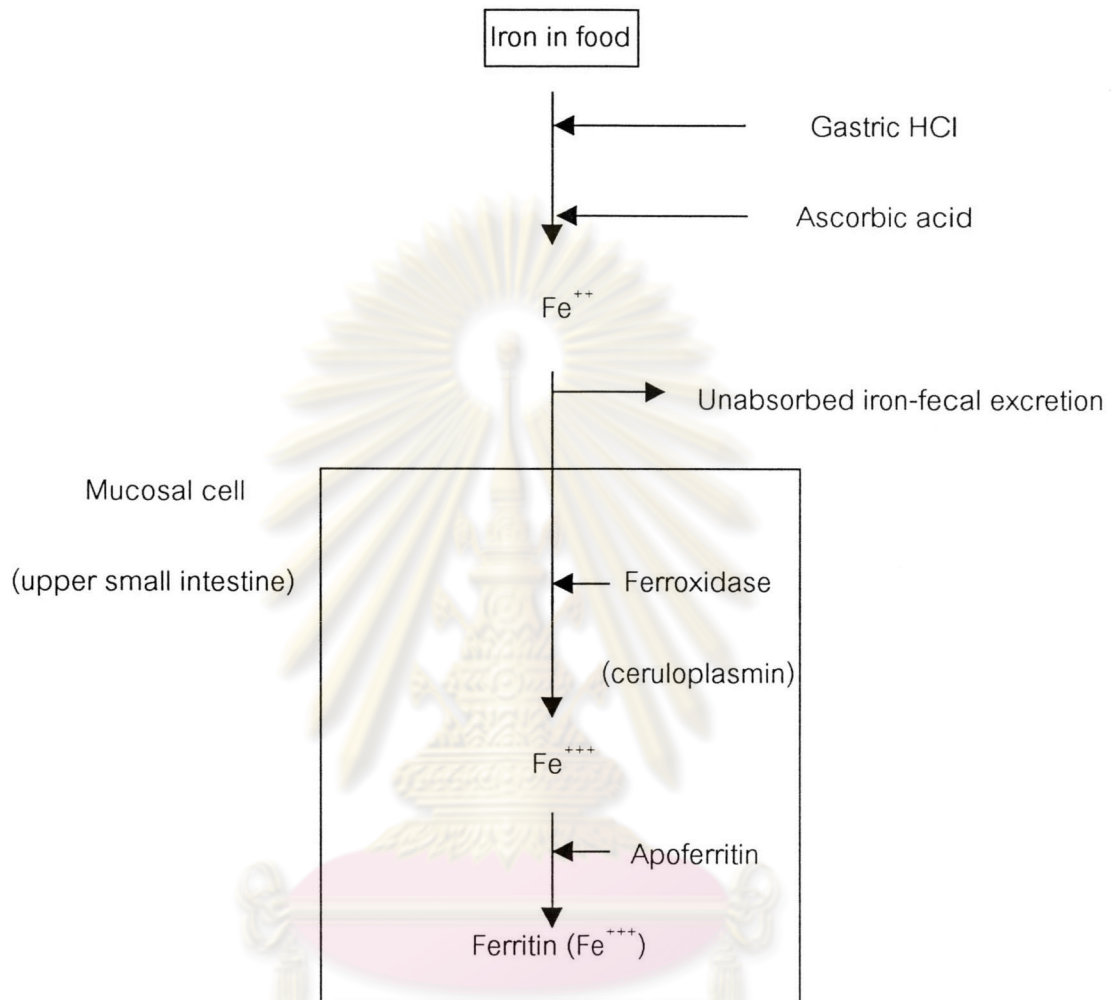
ธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่ในร่างกายเพียงเล็กน้อย (trace element) มีอยู่ในร่างกายประมาณ 3-5 กรัม (Orten and Neuhaus, 1982) ซึ่งอยู่ในเลือดประมาณร้อยละ 55-60 ในกล้ามเนื้อประมาณร้อยละ 3 และยังมีเก็บไว้ในตับ ม้าม ไชกระดูกและไต ธาตุเหล็กมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์โปรตีนฮีโมโกลบินและไมโอโกลบินซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงออกซิเจนไปยังส่วนต่างๆของร่างกาย นอกจากนี้ธาตุเหล็กยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของขบวนการเมตาบอลิซึมคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน เอ็นไซม์เหล่านี้ ได้แก่ เอ็นไซม์ไซโตโครมออกซิเดส เอ็นไซม์เปอร์ออกซิเดส และเอ็นไซม์คะตะเลส เป็นต้น (Mc.Williams and Stare, 1981)

2.2.1 การดูดซึม (Absorption)

ร่างกายดูดซึมเหล็กบริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น ปกติร่างกายจะดูดซึมเหล็กประมาณ 10% ของเหล็กที่มีอยู่ในอาหาร แต่บางสภาวะของร่างกาย เช่น สภาวะที่ร่างกายสูญเสียเลือดมาก ร่างกายจะดูดซึมเหล็กมากกว่าสภาวะร่างกายปกติถึง 10-20 เท่า การดูดซึมที่มากกว่าปกตินี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเหล็กที่สะสมไว้ในตับและอวัยวะอื่นๆในรูปของโปรตีนที่รวมตัวกับเหล็ก คือ เฟอร์ริติน (ferritin) และ ฮีโมซิเดอริน (hemosiderin)

การดูดซึมเหล็กในอาหารเกิดขึ้นโดยเหล็กถูกปล่อยออกมาจากอาหารโดยน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร (ในรูปของ Fe^{++}) ซึ่งสามารถจับกับกรดแอสคอร์บิก น้ำตาลและกรดอะมิโน ซึ่งสาร chelate เหล่านี้สามารถละลายในของเหลวที่มีฤทธิ์เป็นด่างในลำไส้เล็กส่วนที่เป็นดูโอดินัม (duodenum) และ เจจูนัม (jejunum) ซึ่งการดูดซึมเหล็กเกิดขึ้นบริเวณนี้ โปรตีนที่ผนังลำไส้เล็ก (apoferritin) จะรับเหล็กที่ผนังลำไส้เล็กส่วนบน ซึ่งจะควบคุมการดูดซึมเหล็ก เมื่อร่างกายต้องการเหล็กอาจมีสาเหตุจากการสูญเสียเลือดและมีผลทำให้สร้างเม็ดเลือดแดงมากขึ้น ธาตุเหล็กก็จะเคลื่อนย้ายออกจากผนังลำไส้เล็ก ทำให้มีการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหารมากขึ้นจนร่างกายมีธาตุเหล็กมากพอ เมื่อเซลล์ที่ผนังลำไส้เล็กได้รับเหล็กจนอิ่มตัว ซึ่งอยู่ในรูปของเฟอร์ริติน มี

ผลทำให้การดูดซึมเหล็กลดลง (Orten and Neuhaus, 1982) กลไกการดูดซึมเหล็กของร่างกายแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กลไกการดูดซึมเหล็กของร่างกาย

ที่มา : Orten และ Neuhaus (1982)

2.2.2 แหล่งเหล็กในอาหารและความต้องการของร่างกายมนุษย์

ในแต่ละวันร่างกายมีการสูญเสียเหล็กประมาณวันละ 1-2 มิลลิกรัม ดังนั้นเพื่อเป็นการรักษาสมดุลของปริมาณเหล็กในร่างกาย ในแต่ละวันควรได้รับเหล็กให้เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ซึ่งความต้องการธาตุเหล็กของแต่ละบุคคลนั้นไม่เท่ากัน ขึ้นกับ เพศ อายุ สภาพร่างกาย กรรมอนามัย กระบวนการทางสุขภาพได้ระบุปริมาณเหล็กที่ควรได้รับประจำวันสำหรับคนไทย

ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยเฉลี่ยแล้วร่างกายต้องการเหล็กประมาณวันละ 15 มิลลิกรัม (กรมนานามัย, 2532)

แหล่งอาหารที่มีปริมาณเหล็กสูง ได้แก่ เนื้อสัตว์ ตับ ไข่ อาหารทะเล เป็นต้น ธาตุเหล็กในอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ heme iron และ non-heme iron ซึ่งคุณลักษณะของ heme iron และ non-heme iron แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของ heme iron และ non-heme iron

Heme	Nonheme
แหล่งอาหาร	แหล่งอาหาร
-ไม่พบในแหล่งอาหารที่เป็นพืช	-พบในแหล่งอาหารที่เป็นพืช
-40%ของเหล็กที่มีในแหล่งอาหารที่เป็นเนื้อสัตว์	-60%ของเหล็กที่มีในแหล่งอาหารที่เป็นเนื้อสัตว์
อัตราการดูดซึม	อัตราการดูดซึม
เร็ว ; การขนส่งและการดูดซึมสมบูรณ์	ช้า ; จับตัวแน่นโมเลกุลของสารอินทรีย์

ที่มา : Williams (1988)

2.2.3 การขาดเหล็ก (Iron deficiency) และผลเสียของการมีเหล็กมากเกินไปในร่างกาย

การขาดเหล็กทำให้เกิดภาวะโลหิตจาง สาเหตุที่สำคัญที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง คือ การได้รับเหล็กจากอาหารไม่เพียงพอ หรือจากการดูดซึมธาตุเหล็กจากอาหารที่รับประทานได้ไม่ดี เนื่องจากชนิดและรูปแบบของเหล็กที่ใช้ หรือมีการเสียเลือดอย่างเรื้อรัง และภาวะที่ร่างกายต้องการเหล็กมากขึ้น

การขาดเหล็กในร่างกายแบ่งออกเป็น 3 ระยะ (ปราณิต ผ่องแผ้ว, 2539) คือ

ระยะแรก การสะสมธาตุเหล็กในตับ ม้ามและไขกระดูก จะลดลงขนานกันกับการลดลงของเฟอร์ริตินในซีรัมหรือพลาสมา เมื่อมีการลดระดับของธาตุเหล็กในไขกระดูกลง

ระยะที่สอง ธาตุเหล็กที่ขนส่งอยู่ในกระแสเลือดลดลง โดยที่มีระดับธาตุเหล็กในซีรัมลดลง และ total iron-binding capacity จะลดลงเช่นเดียวกัน

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

ผลเสียของภาวะโลหิตจางจากการขาดธาตุเหล็ก (วิชัย ต้นไพจิตร, 2530)

1. ประสิทธิภาพการทำงานด้อยลง
2. ผลเสียต่อการตั้งครรภ์ พบว่า อัตราการตายและพิการของแม่และลูกในครรภ์เพิ่มขึ้น เสี่ยงต่อการคลอดก่อนกำหนด
3. ภูมิคุ้มกันโรคต่ำ
4. เด็กที่ขาดธาตุเหล็กจะมีประสิทธิภาพการเรียนรู้ต่ำกว่าปกติ

แต่ถ้าร่างกายได้รับธาตุเหล็กมากเกินไปก็ทำให้เกิดอันตรายได้ จะทำลายตับ ตับอ่อน หัวใจและอวัยวะอื่นๆ ทำให้การทำงานต่างๆ แปรปรวนได้ ถ้าเด็กได้รับธาตุเหล็กมากกว่า 500 มิลลิกรัม จะทำให้เกิดอาการพิษเหล็กอย่างเฉียบพลันมีอาการตั้งแต่คลื่นไส้ อาเจียน ถ่ายอุจจาระเป็นเลือด ตลอดจนถึงอาการช็อก ตับวายอย่างเฉียบพลันจนเสียชีวิตได้ ปริมาณสูงสุดที่ปลอดภัยในการบริโภคคือ 60-75 มิลลิกรัมต่อวัน ซึ่งความเสี่ยงจากการเกิดพิษเฉียบพลันจากธาตุเหล็กที่เสริมเข้าไปในอาหารเป็นไปได้ยาก ในผู้ที่ป่วยโรค haemochromatosis ซึ่งเป็นโรคทางพันธุกรรมนั้น จะมีการดูดซึมธาตุเหล็กมากกว่าปกติ การที่ธาตุเหล็กสูงในตับและหัวใจทำให้เกิดโรคตับแข็ง การทำงานของหัวใจล้มเหลวและตายในที่สุด นอกจากนี้ถ้ามี hydroxy radical ในอุจจาระเนื่องจากมีธาตุเหล็กที่ไม่ถูกดูดซึมสูง อาจเป็นปัจจัยทำให้เกิดมะเร็งลำไส้ได้ (Hurrell, 1999)

2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมเหล็กไปใช้

ในอาหารมีองค์ประกอบที่สามารถขัดขวางความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมเหล็กไปใช้และมีองค์ประกอบที่ช่วยให้ความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมเหล็กไปใช้ประโยชน์ได้ดียิ่งขึ้น

องค์ประกอบที่สามารถขัดขวางความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมเหล็กไปใช้ ได้แก่ กรดไฟติก ซึ่งมีอยู่มากในธัญพืช เมล็ดถั่ว เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ร่างกายดูดซึมเหล็กไปใช้น้อยลง รวมทั้งสารประกอบพอลิฟีนอล แคลเซียม และโปรตีนบางชนิด

ส่วนองค์ประกอบที่ช่วยให้ร่างกายดูดซึมเหล็กไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก จากผักและผลไม้ ซึ่งจะเปลี่ยนเฟอริกไอออน (Fe^{+++}) ไปเป็นเฟอรัสไอออน (Fe^{++}) ซึ่งเป็น form ที่ถูกดูดซึม และเปปไทด์ที่ถูกย่อยไปบางส่วนจากเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ

2.2.5 รูปแบบของเหล็กที่ใช้ในอาหาร

รูปแบบของเหล็กที่ใช้ในอาหาร สามารถแบ่งเป็น 3 ชนิด (Hurrell, 1999) ได้แก่ สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้ดี (freely water-soluble compounds) สารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้ต่ำแต่ละลายได้ในกรดเจือจาง (compounds soluble in dilute acid) และสารประกอบเหล็กที่ไม่ละลายน้ำและละลายในกรดเจือจางได้ต่ำ (compounds poorly soluble in dilute acid) การดูดซึมของเหล็กที่เสริมในอาหารนั้นขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร และยังขึ้นกับสารเพิ่มหรือยับยั้งการดูดซึมที่มีอยู่ในอาหารที่บริโภคและภาวะเหล็กของผู้บริโภค ดังนั้นในการเปรียบเทียบ bioavailability ของสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ ต้องเป็นการวัดเปรียบเทียบกับสารประกอบมาตรฐาน คือ เฟอรัสซัลเฟต โดยถือว่ามีค่า relative bioavailability (RVB) เป็น 100 RVB ของสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะของสารประกอบเหล็กดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของสารประกอบเหล็กที่ใช้ในอาหาร

Compound	Approx %Fe	Average relative		Potential for adverse		Approximate relative cost ¹
		bioavailability		organoleptic changes		
		Rat	Man	Color	Fat oxidation	
Freely water soluble						
Ferrous sulfate.7H ₂ 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
Poorly water soluble/soluble in dilute acid						
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
Water-insoluble/poorly soluble in dilute acid						
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						
Electrolytic	97	44-48	5-100	Negligible	Negligible	0.5
Carbonyl	98	39-66	5-20			1.0
Reduced	97	24-54	13-148			0.2

¹Relative to ferrous sulfate.7H₂O = 1.0 for the same level of total iron

ที่มา:Hurrell (1999)

โดยทั่วไปสารประกอบเหล็กที่ละลายน้ำได้ดีจะมี bioavailability ในหนูและคนสูง เช่นเดียวกับสารประกอบเหล็กที่ละลายได้ในกรดเจ็จจาง แต่สารประกอบเหล็กที่ละลายในกรดเจ็จจางได้ดี่าจะมี bioavailability ต่ำถึงปานกลาง ในการเสริมธาตุเหล็กในอาหารต้องเลือกสารประกอบเหล็กที่มี bioavailability สูง แต่สารประกอบเหล็กเหล่านี้ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีและรสชาติของอาหารทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นในการเลือกรูปแบบของเหล็กที่ใช้เสริมในอาหารต้องเลือกรูปแบบของเหล็กที่ร่างกายสามารถดูดซึมได้ดีและไม่ทำให้เกิดปัญหาทางประสาทสัมผัสเกณฑ์ในการเลือกสารประกอบเหล็กสำหรับใช้เสริมในอาหาร (Zoller et al., 1980) มีดังนี้

1. ต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ตลอดช่วงระยะเวลาเก็บ และการขนส่งในสภาวะที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง
2. ไม่ให้รสหรือสีกับผลิตภัณฑ์
3. มีความเสถียร คือสารประกอบเหล็กยังคงคุณค่าทางโภชนาการ หลังผ่านกระบวนการแปรรูปหรือหลังจากเก็บไว้เป็นเวลานาน
4. การเติมสารประกอบเหล็กลงผลิตภัณฑ์ต้องมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ

ชิตติگان เมฆจรัสกุล (2545) ได้ศึกษารูปแบบของสารประกอบเหล็กที่ใช้เสริมในเมล็ดข้าว โดยสารประกอบเหล็กที่ใช้ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต ไอร์ออนไกลซีน และเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต พบว่า เฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนเหมาะสำหรับการใช้เสริมธาตุเหล็กบนเมล็ดข้าวโดยการเคลือบด้วยเจลแป้งข้าว เนื่องจากข้าวเสริมเหล็กในรูปแบบเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีการคงเหลือของปริมาณเหล็กหลังข้าวผ่านการล้างสูงกว่าข้าวเสริมเหล็กในรูปแบบเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต อีกทั้งสารประกอบเหล็กทั้ง 2 ชนิดมี iron bioavailability สูง

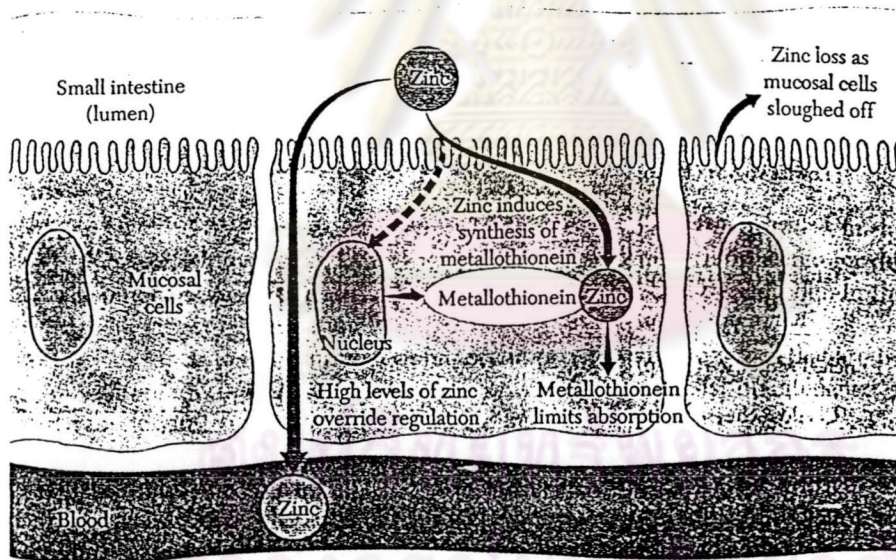
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เฟอร์รัสซัลเฟต เพราะ มี iron bioavailability สูง ราคาถูก และสามารถเคลือบติดบนข้าวได้ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้เป็นแหล่งของเหล็กในอาหารคนโดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค (ชิตติگان เมฆจรัสกุล, 2545; Trinidad et al., 2002; Florentino and Pedro, 1998; Kapanidis and Lee, 1996)

2.3 ความสำคัญของธาตุสังกะสี

สังกะสีเป็นแร่ธาตุที่จำเป็นต่อร่างกายพบในอวัยวะ เนื้อเยื่อและของเหลวในร่างกาย ปริมาณสังกะสีทั้งหมดในร่างกายมี 1-2 กรัม ส่วนใหญ่พบในกระดูกและกล้ามเนื้อประมาณ 90% ธาตุสังกะสีมีความสำคัญต่อร่างกายเนื่องจากเป็นส่วนประกอบและช่วยในการทำงานของ เอนไซม์มากกว่า 200 ชนิด เช่น DNA และ RNA polymerases ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของ ฮอริโมน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อกระบวนการแสดงลักษณะทางพันธุกรรม ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย การรักษาบาดแผล การเจริญเติบโตของวัยทารก วัยเด็กและวัยรุ่น (Sandstrom, 1997)

2.3.1 การดูดซึม (Absorption)

ร่างกายจะดูดซึมสังกะสีจากอาหารที่ได้รับบริเวณลำไส้เล็ก โดยจะเคลื่อนย้าย ผ่านเยื่อบุลำไส้ หรือรวมตัวกับ metallothionein ไปยังกระแสเลือด เพื่อไปยังบริเวณส่วนต่างๆ ของร่างกาย (Smolin and Grosvenor, 2000) กลไกการดูดซึมสังกะสีในร่างกายแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซึมสังกะสีในร่างกาย

ที่มา : Smolin และ Grosvenor (2000)

2.3.2 แหล่งสังกะสีในอาหารและความต้องการของร่างกายมนุษย์

ความต้องการธาตุสังกะสีของแต่ละบุคคลไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นกับเพศ อายุ สภาพร่างกาย กรรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุขได้ระบุปริมาณธาตุสังกะสีที่ร่างกายควรได้รับในแต่ละวัน ซึ่ง

แสดงในตารางที่ 2.1 โดยเฉลี่ยร่างกายต้องการสังกะสีประมาณวันละ 15 มิลลิกรัม ความต้องการธาตุสังกะสีของร่างกายอาจเพิ่มขึ้นได้ในบางกรณี เช่น เมื่อมีการติดเชื้อ ท้องเสีย เป็นต้น

สังกะสีพบในอาหารที่มีแหล่งมาจากพืชและสัตว์ โดยร่างกายจะดูดซึมสังกะสีที่มาจากสัตว์ได้ดีกว่าสังกะสีที่มาจากแหล่งอาหารที่เป็นพืชเนื่องจากสังกะสีที่อยู่ในพืชมักจะรวมตัวกับไฟเตทซึ่งเป็นรูปแบบที่ร่างกายดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้ไม่ดี แหล่งอาหารที่มีสังกะสีมาก ได้แก่ อาหารทะเล โดยเฉพาะหอยนางรม เนื้อสัตว์ ตับ ไข่ และผลิตภัณฑ์นมชนิดต่างๆ ส่วนธัญพืช ได้แก่ ข้าว ข้าวสาลี และข้าวโพดมีสังกะสีอยู่น้อย สำหรับผักและผลไม้แทบจะไม่มีสังกะสีอยู่เลย

2.3.3 การขาดสังกะสี (Zinc deficiency) และผลเสียของการมีสังกะสีมากเกินไปในร่างกาย

การขาดสังกะสีอาจเกิดขึ้นได้จากการรับประทานอาหารที่มีสังกะสีน้อย เสียเลือด เสียสังกะสีไปในเหงื่อเมื่อมีอากาศร้อน ความบกพร่องในการดูดซึมสังกะสีในภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับฮอร์โมนต่างๆ เมื่อเป็นโรคต่างๆ เช่น เอดส์ เบาหวาน ตับแข็ง เป็นต้น อาการของผู้ที่มีภาวะการขาดสังกะสี อาจมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรุนแรงของการขาด ถ้าร่างกายขาดธาตุสังกะสีจะทำให้การเจริญเติบโตช้า เบื่ออาหาร ภูมิคุ้มกันโรคต่ำ อูจจาระร่วง การรับรสของลิ้นผิดปกติ แผลหายช้า และการมองเห็นในที่มืดผิดปกติ ในหญิงตั้งครรภ์อาจทำให้ทารกในครรภ์พิการ ถ้าขาดธาตุสังกะสีอย่างรุนแรงอาจเสียชีวิตได้ (วิชัย ต้นไพจิตร, 2530; ธิดา นิงสานนท์และคณะ, 2535)

ถ้าร่างกายได้รับสังกะสีมากเกินไป (10-30 เท่าของ RDA) เป็นเวลา 2-3 สัปดาห์ มีรายงานว่าเป็นสาเหตุให้ภูมิคุ้มกันอ่อนแอและมีผลในการลดระดับคอเลสเตอรอลชนิด high density lipoprotein (Vadlamani et al.,1999) อาจจะทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ท้องร่วง และมีไข้ (Brown and Wuehler, 2000) นอกจากนี้ยังอาจรบกวนการดูดซึมแร่ธาตุชนิดอื่นๆของร่างกาย เช่น ทองแดง เป็นต้น

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถของร่างกายที่จะดูดซึมสังกะสีไปใช้

ปริมาณสังกะสีที่จะถูกดูดซึมนั้นขึ้นกับปริมาณสังกะสีที่มีอยู่ในอาหารที่ร่างกายได้รับว่ามีมากหรือน้อยเพียงใด และยังขึ้นกับองค์ประกอบของอาหารนั้นๆด้วยว่ามีสารที่ขัดขวางหรือช่วยให้ร่างกายดูดซึมสังกะสีไปใช้ประโยชน์ ซึ่งสารสำคัญที่ขัดขวางการดูดซึมธาตุสังกะสีของร่างกายคือ ไฟเตท ซึ่งมักจะมีอยู่ในแหล่งอาหารที่มาจากพืช เช่น ถั่วเหลือง ข้าวฟ่าง เป็นต้น โดยไฟเตทจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสังกะสี ทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมสังกะสีไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากสารอื่นอีก เช่น ออกซาเลท ทองแดง ดีบุก แคลเซียม เป็นต้น

ส่วนกรดอะมิโน กรดแอสคอร์บิก และสารอินทรีย์ที่เพิ่มความสามารถในการละลายในกรด กระเพาะอาหาร ก็สามารถทำให้ร่างกายดูดซึมสังกะสีไปใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น (Sandstrom, 1997)

2.3.5 รูปแบบของสังกะสีที่ใช้ในอาหาร

ในการเลือกรูปแบบสารประกอบสังกะสีที่จะใช้ในอาหารต้องคำนึงถึงราคา สมบัติทาง ประสาทสัมผัส และ bioavailability โดยทั่วไปสารประกอบสังกะสีมีสีขาวและมีความไวต่อ ปฏิกิริยาทางเคมี น้อยกว่าเหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในเรื่องของสี ความเสถียรและอายุการเก็บ (Peter, 1999) ซึ่งลักษณะของสังกะสีรูปแบบต่างๆแสดงในตารางที่ 2.5 FDA ของอเมริกาได้ กำหนดสารประกอบสังกะสีที่เป็น generally recognized as safe (GRAS) ไว้ 5 ชนิด คือ zinc chloride zinc gluconate zinc oxide zinc stearate และ zinc sulfate แต่ที่มักใช้ในการเสริม ลงในอาหารบ่อยๆ คือ zinc oxide และ zinc sulfate เนื่องจากมีราคาถูกกว่าสารประกอบสังกะสี ชนิดอื่นๆ แต่จะนิยมใช้ zinc sulfate มากกว่าเนื่องจากร่างกายดูดซึมได้ดีกว่า (Brown and Wuehler, 2000) ในประเทศตุรกี ได้มีรายงานว่าขนมปังที่มีการเสริมสังกะสีสามารถป้องกันการ ขาดสังกะสีในเด็กได้ มีการศึกษา bioavailability ของ สังกะสีใน forms ต่างๆ ในขนมปังแล้วให้ หนูกิน พบว่า สังกะสีในรูปแบบต่างๆ ยกเว้น zinc carbonate ไม่มีความแตกต่างในเรื่องของการ ดูดซึมสังกะสี ซึ่งงานวิจัยนี้ได้อ้างว่าสารประกอบสังกะสีใน forms ต่างๆ มีความเหมาะสมสำหรับการเสริมลงในผลิตภัณฑ์ประเภทขนมปัง (Ranhotra et al., 1977)

จากที่กล่าวมา ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ zinc sulfate เป็นแหล่งของสังกะสีในการเสริมแร่ ธาตุบนเมล็ดข้าวโดยการเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์ธรรมชาติ เนื่องจาก zinc sulfate สามารถใช้ เติมนำเข้าในอาหารได้โดยไม่เป็นอันตราย (Hunt et al., 2002)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสังกะสีรูปแบบต่างๆ

Compound	Colour	Taste	Odour	Solubility in water (at 20°C)	Other solvents
Zinc acetate	White	Astringent	Slight odour of acetic acid	Soluble	Alcohol
Zinc carbonate	White	Astringent	Odourless	Practically insoluble	Dilute acid, alkalis, solution of NH_4^+ salts
Zinc chlorid ^e t	White	Astringent	Odourless	Soluble	Alcohol, glycerol, ether, HCl, acetone
Zinc citrate	White	na	Odourless (in powder form)	Slightly soluble	Dilute mineral acids, alkali hydroxides
Zinc gluconate [†]	White	na	Odourless	Soluble	Alcohol
Zinc lactate	White	na	Odourless	Slightly soluble	na
Zinc methionine	White	Slightly sour and bitter	Vanilla	Soluble	na
Zinc oxide [†]	White, gray, or yellowish white	Bitter, astringent	Odourless	Practically insoluble	Dilute acids, alkalis, ammonia, ammonium carbonate
Zinc stearate [†]	White	na	Faint	Insoluble	Acids, benzene
Zinc sulfate anhydrous [†]	Colourless	na	Odourless	Soluble	na
Zinc sulfate heptahydrate ^{††}	Colourless	Astringent	Odourless	Soluble	Glycerol (insoluble in alcohol)

na = information not available.

^{*}Adapted from Budavari et al. 1996; Davidsson 1999; P. Ranum; American Ingredients Company, Kansas City, MO, USA, personal communication.

[†]Compound generally recognized as safe (GRAS designation) (National Archives and Records Administration 1999).

^{††}Monohydrate does not clump so is more convenient than heptahydrate in warm climates.

ที่มา : Brown และ Wuehler (2000)

2.4 การเสริมไอโอดีน เหล็ก และสังกะสีในอาหาร

ได้มีงานวิจัยที่เสริมไอโอดีน เหล็ก และสังกะสี ในอาหาร เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของอาหารให้มากขึ้นและใช้เป็นแนวทางแก้ปัญหาทุพโภชนาการของประชากร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

Cort และคณะ (1976) ได้เสริมวิตามินและแร่ธาตุต่างๆ รวมทั้งสังกะสีในรูปแบบ zinc oxide ในข้าวด้วยวิธีการเคลือบ ซึ่งเมื่อเก็บที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าการคงเหลือของวิตามินและแร่ธาตุยังคงมีปริมาณสูงอยู่ (วิตามินเอ 90% วิตามินอี 100% กรดโฟลิกและไพริดอกซิน 90%)

Ranganathan และคณะ (1996) เปรียบเทียบวิธีการเสริมไอโอดีนและเหล็กในเกลือ (Doubled-fortified salt) ระหว่าง วิธี spray mixing และ dry mixing พบว่าการเสริมไอโอดีนและเหล็กในเกลือด้วยวิธี spray mixing เกลือมีสีน้ำตาลเนื่องจากความชื้นจะเร่งปฏิกิริยา oxidation ของ ferrous iron ไปเป็น ferric iron ซึ่งทำให้เกิดสี ferrous sulfate เกิดปฏิกิริยา hydrolysis เมื่อละลายในน้ำ สารละลายจึงมีสภาวะเป็นกรด ทำให้ KIO_3 ถูกรีดิวซ์มีผลให้ปริมาณไอโอดีนลดลง ในขณะที่การเสริมไอโอดีนและเหล็กในเกลือด้วยวิธี dry mixing จะไม่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นการเสริมเหล็กและไอโอดีนในเกลือด้วยวิธี dry mixing จะทำให้ได้เกลือที่มีคุณภาพดีและเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ในทางอุตสาหกรรมมากกว่าวิธี spray mixing

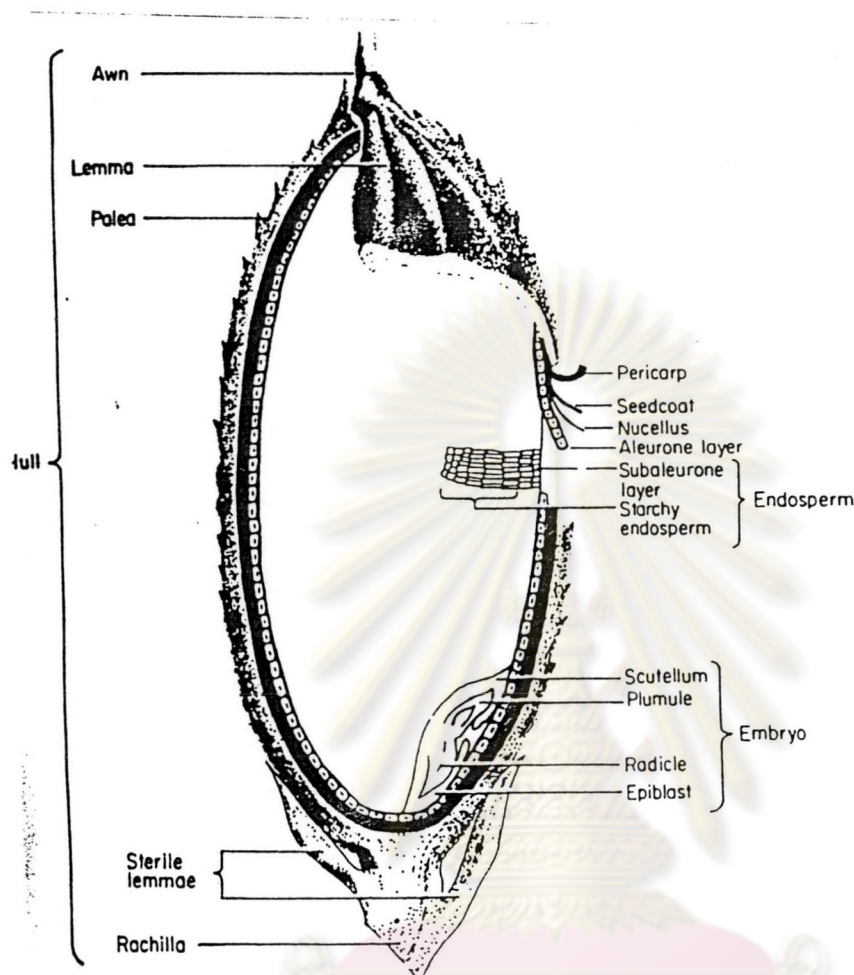
Saldamli และคณะ (1996) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะลดการเกิดภาวะขาดสังกะสีในเด็กช่วงอายุ 7-11 ปี โดยให้ขนมปังที่เสริมสังกะสีในรูป zinc acetate เป็นเวลา 3 เดือน พบว่าในเด็กกลุ่มที่ได้รับขนมปังเสริมสังกะสีเป็นเวลา 90 วัน มีการเพิ่มขึ้นของระดับสังกะสีในซีรัมและ leukocyte อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.01$) ส่วนกลุ่มที่ไม่ได้รับขนมปังเสริมสังกะสี (กลุ่มควบคุม) ไม่พบการเพิ่มขึ้นของระดับสังกะสีในซีรัมและ leukocyte อย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$)

2.5 ข้าว

ข้าวเป็นพืชตระกูลหญ้า จัดอยู่ใน genus *Oryza* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในเขตอบอุ่นและเขตร้อน ข้าวที่ปลูกโดยทั่วไปมี 2 สายพันธุ์ คือ *Oryza sativa* L และ *Oryza glaberrima* Steud แต่ที่นิยมบริโภค มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาด คือ *Oryza sativa* L ส่วน *Oryza glaberrima* Steud มีจำนวนน้อย ปลูกขึ้นเฉพาะในแอฟริกา (Marshall and Wadsworth, 1994)

โครงสร้างของเมล็ดข้าวประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเมล็ดข้าว

ที่มา : Marshall และ Wadsworth (1994)

1. เปลือกแข็งหุ้มเมล็ดหรือแกลบ (hull) เป็นส่วนที่หุ้มอยู่ภายนอก ปกคลุมส่วนที่บริโภคนได้ซึ่งก็คือข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) ส่วนนี้มีน้ำหนักประมาณ 18-20% ทำหน้าที่ช่วยป้องกันแมลงและต้านการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของปริมาณความชื้นของเมล็ดที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อม แกลบประกอบด้วย lemma และ palea ซึ่งจะประกบกันตามแนวยาวของเมล็ด ในส่วนของแกลบนี้จะมีปริมาณโปรตีน ไขมันและแป้งต่ำ แต่จะมีปริมาณ crude fiber (โดยเฉพาะซิลิกา) dietary fiber สูง และมีปริมาณแคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม แมงกานีส อะลูมิเนียม เหล็ก ทองแดงและสังกะสีน้อย

2. ส่วนที่บริโภคนได้ หรือ ข้าวกล้อง (caryopsis หรือ brown rice) ซึ่งแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆดังนี้

2.1 เยื่อหุ้มผล (pericarp) เป็นส่วนผิวนอกของข้าวกล้อง ลักษณะเซลล์เป็นรูปแฉง มีองค์ประกอบเคมีเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ให้โครงสร้าง เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมี โปรตีน ไขมัน รวมทั้งแร่ธาตุต่างๆ เมื่อแกะเปลือกนอกของเมล็ดออกจะได้เมล็ดข้าวที่เราเรียกว่า ข้าวกล้อง ซึ่งมีสีต่างๆ กันตั้งแต่ขาว น้ำตาลอ่อนจนถึงแดง สีเหล่านั้นคือ สีของเนื้อเยื่อชั้น เพอริคาร์พนั่นเอง

2.2 เยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen หรือ seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผล เป็นเซลล์บางรูป ร้างยาวรี เซลล์ชั้นในมีสารให้สี ทำให้เมล็ดมีสีต่างๆ นอกจากนี้ยังเป็นชั้นที่มีสารพวกไขมัน จึงมี สมบัติในการป้องกันไม่ให้น้ำเข้าสู่เมล็ด

2.3 ชั้นแอลูโรน (aleurone layer) เป็นเนื้อเยื่อชั้นนอกสุดของส่วนที่เป็นแป้ง จำนวนชั้นของเนื้อเยื่อแอลูโรนขึ้นกับพันธุ์ข้าวและสิ่งแวดล้อม โดยข้าวเมล็ดสั้นจะมีเนื้อเยื่อชั้นนี้ นานกว่าข้าวเมล็ดยาว

2.4 คัพภะ (embryo) ประกอบด้วยส่วนที่จะเจริญเป็นยอดอ่อน (plumule) ส่วนที่จะงอกเป็นรากแรกกำเนิด (radicle) ทั้งสองส่วนนี้ยึดติดในส่วนที่เรียกว่า มีโซคอตทิล (mesocotyl) ยอดอ่อนจะห่อหุ้มด้วยลักษณะที่คล้ายใบ เรียกว่า เยื่อหุ้มยอดอ่อน (coleoptile) ส่วนของคัพภะทั้งหมดจะอยู่ในเนื้อเยื่อแอลูโรน องค์ประกอบสำคัญในส่วนนี้ ได้แก่ ไขมันและ โปรตีน

เยื่อหุ้มผล เยื่อหุ้มเมล็ด ชั้นแอลูโรน และคัพภะ จะถูกขัดสีเป็นส่วนของรำ (bran) ซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 5-8% รำเป็นส่วนที่มีคุณค่าทางอาหารสูง เนื่องจากอุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน วิตามินและแร่ธาตุต่างๆ

2.5 เอนโดสเปิร์ม (endosperm) เป็นส่วนที่อยู่ชั้นในสุดของเมล็ดข้าว มีสตาร์ช เป็นองค์ประกอบหลักและมีโปรตีนอยู่บ้าง โดยสตาร์ชจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่ม (starch compound) กลุ่มสตาร์ชหลายๆกลุ่มจะอยู่รวมกันและมีกลุ่มของโปรตีน (protein body)แทรกอยู่ เม็ดสตาร์ชมี รูปร่าง 6 เหลี่ยม (hexagonal) ส่วนของ subaleurone layer และบางส่วนของเอนโดสเปิร์มที่ถูกขัด สีออกไปเป็นส่วนของ polish เมล็ดข้าวที่ผ่านการขัดสีแล้ว เรียกว่า ข้าวขัดขาวหรือข้าวสาร (milled rice หรือ white rice) ซึ่งเป็นส่วนที่มีสตาร์ชมากกว่าส่วนอื่นๆ ของเมล็ดข้าว โดยมี ปริมาณไขมันต่ำ มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่ารำและ polish แต่สูงกว่าเปลือกแข็งหุ้มเมล็ด (ตาราง ที่ 2.6)

ตารางที่ 2.6 ร้อยละองค์ประกอบของข้าวเปลือก ข้าวกล้อง ข้าวสาร แกลบ รำ คัพภะ และ polish (%dry basis)

Constituent	rough	brown	milled	hulls	bran	embryo	polish
Protein(Nx5.95)	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)

ข้าวเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงาน โปรตีน เกลือแร่และวิตามิน โดยทั่วไปเกลือแร่และวิตามินจะอยู่บริเวณผิวนอกเมล็ดและคัพภะมากกว่าในเอนโดสเปิร์ม ดังนั้นการขัดสีข้าวจึงทำให้สูญเสียวิตามินและเกลือแร่ (Juliano, 1993) คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว (Juliano, 1993) แสดงในตารางที่ 2.7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 คุณค่าทางโภชนาการของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว(Juliano, 1993)

คุณค่าทางโภชนาการ (ต่อข้าว100กรัม)	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว
ความชื้น (กรัม)	14.0	14.0
พลังงาน (กิโลแคลอรี)	363-385	349-373
โปรตีน (กรัมไนโตรเจน*5.95)	7.1-8.3	6.3-7.1
ไขมัน (กรัม)	1.6-2.8	0.3-0.5
คาร์โบไฮเดรต (กรัม)	73-87	77-89
เส้นใย (กรัม)	0.6-0.7	0.2-0.5
เถ้า (กรัม)	1.0-1.5	0.3-0.8
ไทอะมิน (มิลลิกรัม)	0.3-0.6	0.02-0.11
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม)	0.04-0.14	0.02-0.06
ไนอะซิน (มิลลิกรัม)	3.5-5.3	1.3-2.4
ไพริดอกซิน (มิลลิกรัม)	0.5-0.9	0.04-0.12
วิตามินเอ (มิลลิกรัม)	0.8-2.5	0.01-0.03
แคลเซียม (มิลลิกรัม)	10.0-50.0	10.0-30.0
ฟอสฟอรัส (กรัม)	0.17-0.43	0.08-0.15
เหล็ก (มิลลิกรัม)	0.20-5.2	0.2-2.8
สังกะสี (มิลลิกรัม)	0.6-2.8	0.6-2.3

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าข้าวขัดขาวมีปริมาณวิตามินและแร่ธาตุน้อยกว่าข้าวกล้อง เนื่องจากสูญเสียวิตามินและแร่ธาตุในขั้นตอนการขัดสี นอกจากการขัดสีข้าวแล้ว ยังมีสาเหตุอื่นอีกที่มีผลทำให้ข้าวสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ เช่น การล้างข้าว การหุงต้ม และการเก็บรักษา เป็นต้น

ดังที่กล่าวข้างต้นว่าข้าวสารหรือข้าวขัดขาวมีวิตามินและแร่ธาตุในปริมาณน้อย และเมื่อข้าวสารผ่านกระบวนการล้างหรือหุงต้ม ก็จะทำให้สูญเสียวิตามินและแร่ธาตุมากขึ้น จึงมีความพยายามที่จะเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของข้าวสารให้มากขึ้น เพื่อป้องกันภาวะขาดสารอาหาร และปรับปรุงภาวะทางโภชนาการของประชากรที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักให้ดีขึ้น ซึ่งวิธีการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการหรือการเสริมสารอาหารในเมล็ดข้าว มีหลายวิธีดังนี้

1. การขัดสีข้าวให้ชั้นรำข้าวออกไปน้อยลง (undermilling) เนื่องจากในชั้นรำข้าวมีสารอาหารอยู่มากมาย เช่น วิตามินบี จำพวก ไทอะมิน ไรโบฟลาวิน ไนอะซิน ถ้าขัดสีรำข้าวออกไปมากจะทำให้สูญเสียสารอาหารเหล่านี้ไปมาก ตามระดับของการขัดสี ดังนั้นการขัดสีรำข้าวออกไปน้อยลง (undermilling) จึงเป็นวิธีที่รักษาคุณค่าทางโภชนาการของข้าววิธีหนึ่ง แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัด คือ สมบัติตามธรรมชาติของข้าวแต่พันธุ์ที่จำกัดระดับการขัดสี ทำให้ยากในการที่จะคงที่ระดับการสี (Bramall, 1986) ในชั้นรำข้าวยังมีไขมันอยู่ ดังนั้นถ้าขัดสีชั้นรำข้าวออกไปน้อย ทำให้อายุการเก็บของข้าวลดลง เนื่องจากไขมันที่ชั้นรำข้าวจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่งผลให้ข้าวมีกลิ่นหืน สีขาวลดลง ทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค (Grist, 1975; Juliano, 1993)

2. การทำข้าวหนึ่ง (parboiled rice) มีวิธีการทำ คือ แช่ข้าวในน้ำ จากนั้นให้ความร้อนและทำให้แห้งโดยตากแดด จากนั้นทำการขัดสี พบว่า ไทอะมิน 50-90% ที่อยู่ในคัพภะและรำจะเข้าไปในเอนโดสเปิร์ม (Juliano, 1993) เพราะการนี้จะทำให้สตา์ชภายในเมล็ดข้าวเกิดเจลาติไนเซชัน ทำให้สารอาหารต่างๆกระจายเข้าไปในเมล็ดและคงอยู่ในข้าวสารหลังผ่านการขัดสี จึงเป็นสาเหตุให้ข้าวหนึ่งมีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขัดขาว (Grist, 1975) แต่การทำข้าวหนึ่งมีข้อเสีย คือ ข้าวหนึ่งที่ได้จะมีสีเหลือง มีกลิ่นหืนและกลิ่นหมัก เนื่องจากความร้อนในการนี้ข้าวจะทำลายสารกันหืน (antioxidant) ที่มีอยู่ในเมล็ดข้าวเปลือกธรรมชาติ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ข้าวหนึ่งได้รับการยอมรับน้อยกว่าข้าวขัดขาวธรรมดา (Bramall, 1986)

3. การเสริมสารอาหารลงไปในเมล็ดข้าว ซึ่งทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การเสริมสารอาหารในรูปผง (Powder enrichment) จะนำสารอาหารที่ต้องการเสริมในรูปผงมาผสมกันก่อนเป็น preblended powder mixture จากนั้นจึงเติมลงในข้าว สำหรับ parboiled rice สารอาหารที่นำมาผสมกันก่อนนั้นจะถูกเติมลงในข้าวหลังจากขั้นตอนการขัดขาว เนื่องจากความร้อนและความชื้นบนผิวเมล็ดทำให้ผงของสารอาหารที่เสริมเข้าไปนั้นสามารถติดอยู่บนผิวเมล็ดได้ ถึงแม้การเสริมสารอาหารในรูปผงมีราคาถูกกว่าการเสริมสารอาหารในข้าววิธีอื่น แต่มีการสูญเสียสารอาหารสูงกว่าวิธีอื่นถ้าข้าวถูกล้างก่อนหุง มีการสูญเสียสารอาหารที่เสริมเข้าไปประมาณ 20-100% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้และระยะเวลาในการหุงข้าว (Hoffpauer, 1992) ส่วนข้อเสียอื่น ๆ ของการเสริมสารอาหารในรูปผง คือ วิตามินและแร่ธาตุมีความคงตัวน้อย และอาจทำปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่นในอาหาร (Hoffpauer, 1992)

- การเสริมสารอาหารทั้งเมล็ด (Whole grain enrichment) ในทางอุตสาหกรรมจะเรียก premix สารอาหารจะถูกเติมลงในเมล็ดข้าวตามด้วยการเคลือบสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งสารอาหารจะไม่ถูกล้างออก premix grain จะมีสารอาหารสูง ดังนั้นจึงนำมาผสมกับข้าวขัดขาวที่ไม่ได้เสริมสารอาหารลงไป โดยทั่วไปจะใช้สัดส่วนข้าวที่เสริมสารอาหาร 1 เมล็ดผสมกับข้าวที่ไม่

ได้เสริมสารอาหาร 200 เมล็ด เพื่อให้ได้ระดับของสารอาหารที่ต้องการในผลิตภัณฑ์สุดท้าย สหพันธ์บริษัทแรกเกี่ยวกับการเสริมวิตามินลงในข้าวโดยใช้ premix method ซึ่งพัฒนาในช่วงปี 1940-1949 โดย Hoffmann-La Roche มีวิธีการคือ สเปรย์สารละลายกรดซัลฟูริกที่มี thiamin (thiamin hydrochloride) และ niacin (nicotinamide) จากนั้นทำแห้งและเคลือบด้วยสาร protective coating ตามด้วย talcum powder และ เหล็ก (ferric orthophosphate) ในปี 1955 บริษัท Merck ได้จดสิทธิบัตรวิธีการเสริมวิตามินและแร่ธาตุโดยมีวิธีการเช่นเดียวกันแต่เปลี่ยนสารละลายกรดและสารที่ใช้ในการเคลือบ ต่อมาบริษัท Wright Enrichment ได้พัฒนาการเสริมสารอาหารลงในข้าวโดยรวมวิธีของ Hoffmann-La Roche และ Merck วิธีของ Hoffmann-La Roche ได้ถูกนำกลับมาใช้ใหม่และทำให้ง่ายขึ้นโดย Ricegrowers Co-operative Ltd. (RCL) ในประเทศออสเตรเลีย (Bramall, 1986) ผู้พัฒนาวิธีของบริษัท RCL ได้รายงานถึงปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้วิธีของ Hoffmann-La Roche คือ การเกิดสีน้ำตาลซึ่งอาจมีสาเหตุจากการเกิด ferric sulfate ซึ่งสามารถกำจัดปัญหานี้ได้โดยการเลือกสารละลายกรดที่จะนำมาใช้ ข้าวที่ผลิตด้วยวิธีของบริษัท RCL จะมีราคาถูกเนื่องจากใช้วัตถุดิบน้อยลง ทำได้ง่ายขึ้นและลดค่าแรงคนงาน

มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการเสริมวิตามินและแร่ธาตุในข้าวโดยวิธีการเคลือบ เช่น

Peil และคณะ (1982) ทำการเสริม วิตามินบี1(thiamin) วิตามินบี3(niacin) วิตามินบี2 (riboflavin) วิตามินเอ และ เหล็กในข้าว โดยศึกษาชนิดของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการเคลือบข้าวเพื่อรักษาสารอาหารให้คงอยู่ในระหว่างการหุง พบว่าสารเคลือบพวก cellulose มีสมบัติเป็นสารเคลือบที่ดีกว่า starch และเมื่อนำไปหุงมีการคงเหลืออยู่ของ thiamin 18% niacin 18% riboflavin 21% iron 100% และ vitamin A 70% ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเหล็ก และ vitamin A มีการคงเหลืออยู่มากกว่า thiamin niacin และ riboflavin เนื่องจากเหล็ก และ vitamin A ไม่ละลายน้ำ ถึงแม้จะหุงในปริมาณน้ำที่มากก็ไม่ทำให้สูญเสียในระหว่างหุง และเมื่อวิเคราะห์ thiamin ในสัปดาห์ที่ 3 14 และ 31 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านความเข้มข้นของสารอาหารซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารอาหารเหล่านี้เสถียรใน polymer coating

อารี อองควิเศษไพบูลย์ (2534) ศึกษาการเสริม วิตามินบี1(thiamin) วิตามินบี2 (riboflavin) วิตามินบี3(niacin) วิตามินบี6(pyridoxine) แคลเซียม และฟอสฟอรัส ในข้าว 3 พันธุ์ คือ พันธุ์ข้าวเส้าไห้ ข้าวหอมมะลิ และข้าวขาวตาแห้ง โดยวิธีการเคลือบ พบว่า ข้าวพรีมิกซ์ทั้ง 3 พันธุ์ มีปริมาณ thiamin riboflavin niacin วิตามินบี 6 แคลเซียม และฟอสฟอรัส ใกล้เคียงกัน ข้าวพรีมิกซ์จะมีลักษณะสีเหลืองอ่อนทั้งนี้ มีสาเหตุจากการเสริม riboflavin และการคงเหลือของวิตามินหลังหุงมีดังนี้ thiamin 96% riboflavin 96% niacin 96% pyridoxine 97%

ชุตติมา อัครเสถียร (2543) ศึกษาการเสริมไอโอดีนในข้าว 2 พันธุ์ (ข้าวคลองหลวง 1 และข้าวพันธุ์แพร์ 1) เคลือบด้วยเจลแบ่งข้าว (แบ่งข้าวเจ้าและแบ่งข้าวเหนียว) และสารพอลิเมอร์ผสม (Hydroxypropyl methylcellulose และ methylcellulose) พบว่า ร้อยละการคงเหลือของปริมาณไอโอดีนหลังการล้างอยู่ในช่วงร้อยละ 61.21-99.01 นอกจากนี้ สีของข้าวพันธุ์คลองหลวง 1 ที่เคลือบด้วยเจลแบ่งข้าวทั้ง 2 ชนิดมีสีขาวกว่าที่เคลือบด้วยสารละลายพอลิเมอร์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และเมื่อทำการประเมินทางประสาทสัมผัสของข้าวเคลือบหุงสุกในด้านสี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส การเกาะตัว และความชอบรวม ใช้ผู้ทดสอบชิมทั้งฝึกฝน 15 คนและแบบทดสอบแบบ scoring test พบว่าเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วข้าวเคลือบทั้ง 2 พันธุ์ที่เคลือบด้วยเจลแบ่งข้าวทั้ง 2 ชนิดมีคะแนนเฉลี่ยด้านความชอบรวมสูงกว่าข้าวที่เคลือบด้วยเจลพอลิเมอร์

ปัจจุบันมีการเสริมสารอาหารลงในข้าวในรูปแบบของการทำ enriched simulated หรือ synthetic rice grains ทำโดยเติมวิตามินและแร่ธาตุในแบ่งข้าวเจ้า จากนั้นทำเป็นเมล็ดข้าวเทียมโดยผ่าน extruder เพื่อให้มีลักษณะคล้ายเมล็ดข้าว เมล็ดที่เสริมวิตามินและแร่ธาตุจะถูกผสมกับข้าวขัดขาวปกติเพื่อให้มีปริมาณสารอาหารตามต้องการในผลิตภัณฑ์สุดท้าย มีงานวิจัยที่ทำการเสริมเหล็ก (ferrous sulfate heptahydrate) ลงในข้าวโดยใช้วิธีนี้ พบว่า enriched simulated หรือ synthetic rice grains หลังจากผ่านการ extruded มีสีที่เข้ากันได้กับเมล็ดข้าวขัดขาวปกติ แต่เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานอาจเกิดสีที่ไม่ต้องการได้ (Kapanidis and Lee, 1996) ในปัจจุบันวิธีนี้ยังไม่ใช้ในทางการค้า แต่มีการศึกษาเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของการใช้เทคโนโลยีนี้ในการเสริมวิตามินเอลงในข้าว

ยังมีวิธีง่าย ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเสริมแคลเซียมลงในข้าว โดยเสริมให้มีปริมาณแคลเซียมตามมาตรฐานที่กำหนดโดยอเมริกา (ปริมาณแคลเซียม 110-220 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม) (Lee et al., 1995; Hettiarachchy, Gnanasambandam and Lee, 1996) ซึ่งทำโดยแช่ข้าวขัดขาวในสารละลาย calcium lactate ความเข้มข้น 0.5 - 3.0 % ในสัดส่วน 0.5 - 2.5 w/v เป็นเวลา 0.5 - 5 ชั่วโมง อบข้าวด้วยไอน้ำและทำให้แห้ง พบว่า ข้าวที่แช่ในสารละลาย calcium lactate ความเข้มข้น 3% โดยใช้อัตราส่วนข้าวต่อสารละลาย calcium lactate เท่ากับ 1:0.75 w/v เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ให้ปริมาณแคลเซียมมากที่สุด ในเรื่องของสี ข้าวที่เสริมแคลเซียมไม่มีส่วนทำให้เกิดสีที่ไม่ต้องการซึ่งทำให้ผู้บริโภคยอมรับและระดับแคลเซียมที่เสริมเข้าไปไม่มีผลในด้านความแน่นเนื้อของข้าวที่ผ่านการหุง และพบว่ามี การสูญเสียแคลเซียมน้อยเมื่อผ่านการล้างข้าว

จากรายงานวารสารปริทัศน์ งานวิจัยนี้ได้เสริมไอโอดีน เหล็ก และสังกะสีในเมล็ดข้าว โดยศึกษาสารพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบ เพื่อเป็นการพัฒนาวิธีการเคลือบให้มีประสิทธิภาพ

และทำให้ข้าวมีคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้น ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางป้องกันภาวะโรคขาดสารอาหารของประชากรในประเทศได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย