

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์การทดลอง

4.1 ผลการศึกษาความถูกต้องและความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็ก

4.1.1 ความถูกต้องและความแม่นยำในการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

Atomic absorption spectrophotometry (AAS) เป็นเทคนิคที่สำคัญในการวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุในอาหาร เพราะเป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะและความไว (specific and sensitive) (Cowley, 1978; Ilnat, 1984) การวิเคราะห์โดย AAS สามารถทำได้ 2 วิธี คือ Flame AAS ซึ่งจะใช้เมื่อแร่ธาตุที่จะวิเคราะห์มีความเข้มข้นสูงพอ หรือใช้วิธี Graphite furnace (GFAAS) เมื่อแร่ธาตุที่จะวิเคราะห์มีความเข้มข้นต่ำ ในทางปฏิบัตินิยมใช้ Flame AAS เพราะใช้เวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าและมีความไวต่อ interference น้อยกว่า การหาปริมาณธาตุเหล็กในอาหารส่วนใหญ่จะใช้วิธี Flame AAS (Jorhem, 1993) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เทคนิค Flame AAS สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็ก

การเตรียมตัวอย่างอาหารที่จะวิเคราะห์หาปริมาณแร่ธาตุนั้น ต้องขจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างออกจนได้สารละลายที่มีเพียงสารอนินทรีย์ที่เป็นแร่ธาตุ โดยวิธีการขจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างอาหารที่นิยมใช้มี 2 วิธี (Cowley, 1978; Ilnat, 1984; Jorhem, 1993) คือ wet digestion และ dry ashing ที่อาจมีหรือไม่มีกรดเติม ashing aid วิธี wet digestion ทำได้โดยการย่อยตัวอย่างอาหารด้วยกรดเข้มข้น อาจใช้กรดไนตริก (HNO_3) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) หรือกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) วิธีนี้เป็นวิธีที่รวดเร็ว ใช้อุณหภูมิต่ำและตัวอย่างอยู่ในสถานะที่เป็นของเหลว แต่มีข้อเสียคือ ใช้ตัวอย่างน้อยและสารละลายตัวอย่างที่ย่อยได้ต้องนำมาเจือจางก่อนวิเคราะห์ มีผลให้ detection limit ต่ำ โดยเฉพาะเมื่อวิเคราะห์ด้วย Flame AAS ส่วนวิธี dry ashing ทำโดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง ทำให้อาจมีการสูญเสียแร่ธาตุไปโดยการระเหยหรือติดที่ถ้วยครุชชีเบล นอกจากนี้การเตรียมตัวอย่างโดยวิธีนี้ใช้เวลานาน แต่ข้อดีของวิธีนี้คือ ใช้สารเจือจางแก้ตัวอย่างปริมาณน้อย ทำให้ detection limit สูงกว่าวิธี wet digestion (Cowley, 1978; Jorhem, 1993)

ประไพศรี ศิริจักรวาล, รัชณี คงคาอุยฉาย และประภาศรี ภูวเสถียร (2531) ได้ประเมินวิธีการขจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างอาหารโดยวิธี wet digestion และ dry ashing เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุพบว่า การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุเหล็กสามารถเลือกใช้วิธีการขจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่างได้ทั้ง 2 วิธี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธี wet digestion ในการเตรียมตัวอย่างเพื่อหาปริมาณธาตุเหล็ก

เนื่องจากในงานวิจัยต้องมีการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กในข้าวและแป้ง ซึ่งมีปริมาณน้อย ทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องศึกษาความถูกต้องและความแม่นยำของวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กก่อนทำการวิจัยขั้นต่อไป

ความถูกต้อง (accuracy) ของการวิเคราะห์ปริมาณสาร หมายถึง ค่าที่วิเคราะห์ได้ต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของสารนั้น ส่วนความแม่นยำ (precision) หมายถึง ค่าที่วิเคราะห์ได้ในกรณีวิเคราะห์ซ้ำของสารตัวอย่างเดียวกันมีค่าใกล้เคียงกัน (Pomeranz และ Meloan, 1994) โดยใช้สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (CV) เป็นดัชนีชี้วัดความแม่นยำ ในการทดลองครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กในน้ำนม Alacta-NF (ANF) (ปริมาณเหล็กที่ระบุไว้ข้างกล่องเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อ 180 มิลลิลิตร) จำนวน 8 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความถูกต้องและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ปริมาณเหล็กในน้ำนม ANF ที่มีปริมาณเหล็ก 2 มิลลิกรัมต่อ 180 มิลลิลิตร

ปริมาณเหล็ก ที่วัดได้ (mg/180 ml)	ความถูกต้อง (%)	ปริมาณเหล็ก (mg/180ml) mean±SD	CV (%)	ความถูกต้อง (%) mean±SD
2.070	103.50	2.097±0.116	5.53	104.85±5.79
2.016	100.80			
1.872	93.60			
2.160	108.00			
2.142	107.10			
2.178	108.90			
2.250	112.50			
2.088	104.40			

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณเหล็กในน้ำนมที่วิเคราะห์ได้ มีค่าเฉลี่ย 2.097 มิลลิกรัมต่อ น้ำนม 180 มิลลิลิตร เมื่อคำนวณความถูกต้องและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของการวิเคราะห์ ปริมาณเหล็กในน้ำนม พบว่ามีความถูกต้องร้อยละ 104.85 และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 5.53 โดยมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ (Pomeranz และ Meloan, 1994 ; Belarra et al., 1996)

4.1.2 %Recovery ของการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

การหา %Recovery ทำได้โดยการเติมสารบริสุทธิ์ที่ต้องการวิเคราะห์และทราบปริมาณลงในตัวอย่าง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณสารทั้งหมดที่มีในตัวอย่าง จากนั้นคำนวณปริมาณสารที่เติมลงไป (Pomeranz และ Meloan, 1994) ในการทดลองนี้ได้วิเคราะห์ปริมาณเหล็กทั้งหมดในน้ำนม ANF (บ่นขลภาวะบ่งว่ามีปริมาณเหล็ก 2 มิลลิกรัมต่อน้ำนม 180 มิลลิลิตร) ที่เติมสารละลายเฟอร์ริสซัลเฟตที่มีปริมาณเหล็กเติมในน้ำนมเท่ากับ 3.53 มิลลิกรัมต่อ 180 มิลลิลิตร ดังนั้นปริมาณเหล็กทั้งหมดคือ 2+3.53 เท่ากับ 5.53 มิลลิกรัมต่อ 180 มิลลิลิตร ผลการทดลองจากการวิเคราะห์ 8 ซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 %Recovery ของการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก

ปริมาณเหล็กที่วัดได้ (mg/180ml)	ความถูกต้อง (%)	ปริมาณเหล็ก (mg/180 ml) mean±SD	CV (%)	Recovery (%)	ความถูกต้อง (%) mean±SD
5.742	103.83	5.510±0.157	2.85	99.43	99.64±2.84
5.688	102.86				
5.508	99.60				
5.544	100.25				
5.346	96.67				
5.526	99.93				
5.454	98.63				
5.274	95.37				

ผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณเหล็กในน้ำนมที่มีการเติมสารละลายเฟอร์ริสซัลเฟต มีความถูกต้องและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนร้อยละ 99.64 และ 2.85 ตามลำดับ และมี recovery สูง เท่ากับร้อยละ 99.43 แสดงว่าการหาค่าสารอินทรีย์โดยวิธี wet digestion แล้วนำมาวัดปริมาณเหล็กโดยใช้ atomic absorption spectrophotometer เป็นวิธีที่เหมาะสม มีความถูกต้อง สัมประสิทธิ์ความแปรปรวน และ %recovery สูง ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธี wet digestion (AOAC, 1995) แล้ววิเคราะห์หาปริมาณเหล็กโดยใช้ atomic absorption spectrophotometer ในการหาปริมาณเหล็กในตัวอย่างข้าวและแป้งต่อไป

4.2 ผลการศึกษาวิธีการเสริมธาตุเหล็กในเมล็ดข้าว

4.2.1 องค์ประกอบของข้าววัตถุดิบ

นำตัวอย่างข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวก่ำดอยสะเก็ดมาวิเคราะห์หาความชื้น ปริมาณเหล็ก และวัดค่าสีในระบบ Hunter Lab แล้วคำนวณดัชนีความขาว ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวก่ำดอยสะเก็ด

องค์ประกอบ	ขาวดอกมะลิ 105 mean±SD	ก่ำดอยสะเก็ด mean±SD
ความชื้น (%)	12.23±0.24	13.11±0.44
ปริมาณเหล็ก (mg/100g)	0.281±0.026	0.409±0.049
L	64.28±0.21	46.03±2.35
a	-1.04±0.11	+8.70±0.16
b	+10.08±0.64	+2.62±0.28
ดัชนีความขาว*	62.86±0.36	45.27±2.32

L หมายถึง ค่าความสว่าง; L=100 (ขาว) L=0 (ดำ) , a หมายถึง ค่าสีแดง; a=+ (แดง) a=- (เขียว) , b หมายถึง ค่าสีเหลือง; b=+ (เหลือง) b=- (น้ำเงิน)

*ดัชนีความขาว (white index) = $100 - \sqrt{(100-L)^2 + a^2 + b^2}$ (Chen et al., 1999)

จากตารางที่ 4.3 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 12.23 ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่เหมาะสม เพราะปริมาณความชื้นที่น้อยกว่าร้อยละ 14 จะช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและทางชีวเคมีของข้าวให้ช้าลง เช่นการเจริญของเชื้อราและจุลินทรีย์ต่างๆ ในข้าว เป็นต้น ทำให้ข้าวคงคุณภาพดี (เครือวัลย์ อัดตะวีระสุข, 2534) สำหรับปริมาณเหล็กในข้าวขาวดอกมะลิ 105 เท่ากับ 0.281 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักเปียก ซึ่งธาตุเหล็กเป็นธาตุอาหารรองที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของข้าว (จำรัส โปร่งศิริวัฒนา, 2536) ทางหนึ่งที่จะได้รับธาตุเหล็กคือ การดูดซึมจากดิน แล้วลำเลียงธาตุเหล็กไปเก็บยังส่วนต่างๆ ของข้าว ในเมล็ดข้าวธาตุเหล็กส่วนใหญ่อยู่ในชั้นแอลลูโรน (aleurone layer) (Hoseney, 1994) เมื่อวัดค่าสีข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า มีค่า L (ความสว่าง) เท่ากับ 64.28 และค่า b เท่ากับ +10.08 จากการสังเกตด้วยตาพบว่า ข้าวมีสีข้าวออกเหลืองนวล จึงทำให้ค่า b มีค่าเป็นบวก และค่า a มีค่าเป็นลบ (-1.04) ส่วนดัชนีความขาวมีค่าเฉลี่ย 62.86

สำหรับข้าวกล้องงอกเกิด มีความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 13.11 ปริมาณเหล็ก 0.409 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักเปียก ซึ่งมีค่ามากกว่าปริมาณเหล็กในข้าวขาวดอกมะลิ 105 อาจเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างพันธุ์ ปริมาณสารอาหารที่มีอยู่ในดินและปริมาณสารอาหารที่ได้รับแตกต่างกัน (Miller, 1996) แสดงว่าข้าวแต่ละพันธุ์มีความหลากหลายของคุณสมบัติทางเคมี (chemical components) เมื่อทำการวัดค่าสีของข้าวกล้องงอกพบว่ามีค่า L เท่ากับ 46.03 ค่า a เท่ากับ +8.70 และค่า b เท่ากับ +2.62 ส่วนดัชนีความขาวมีค่าเฉลี่ย 45.27 ที่ผิวของเมล็ดข้าวกล้องงอกมีสีแดงม่วงของ anthocyanins (Ryu, Park และ Ho, 1998) แต่ในเนื้อเมล็ดข้าวเป็นสีขาว ซึ่ง anthocyanins นี้อยู่ในชั้นเยื่อหุ้มผล (pericarp) และเยื่อหุ้มเมล็ด (tegmen) (Juliano, 1972) ดังนั้นเมื่อวัดค่าสีจึงทำให้ค่า L มีค่าต่ำและค่า a (ค่าสีแดง) มีค่าเป็นบวก

ปริมาณธาตุเหล็กในข้าวมีน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุเหล็กที่ร่างกายควรได้รับประจำวัน ดังนั้นการเสริมธาตุเหล็กในข้าวและแบ่งเป็นวิธีการหนึ่งในการป้องกันภาวะโลหิตจางในประชากรที่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลักได้

4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของธาตุเหล็กและเจลที่ใช้ผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็ก

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของธาตุเหล็กและเจลแบ่งข้าวที่ต้องเติมในเมล็ดข้าว เพื่อให้ข้าวมีปริมาณธาตุเหล็ก 3.33 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักเปียก ปกติแล้วในการผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็กจะมีการสูญเสียปริมาณเหล็กไประหว่างการผสมข้าวและเจลแบ่งข้าว จึงต้องมีการทดลองหาปริมาณเหล็กและปริมาณเจลที่ต้องเติมในเมล็ดข้าว เพื่อให้ข้าวที่ได้มีปริมาณเหล็กอยู่ในช่วงที่ต้องการ โดยในการทดลองได้เสริมธาตุเหล็กในรูปของเฟอร์รัสซัลเฟตลงในข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากนั้นนำตัวอย่างข้าวที่เคลือบได้มาวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเหล็ก (ในรูปน้ำหนักแห้ง) ของข้าวเสริมธาตุเหล็กแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณเหล็กที่เติมเป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณเหล็กที่วัดได้ในข้าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) แต่ปริมาณเจลต่อข้าวไม่มีผลต่อปริมาณเหล็กที่วัดได้ผลของปริมาณเหล็กที่เติมต่อปริมาณเหล็กที่วัดได้ในข้าวเสริมธาตุเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเหล็กของข้าวเสริมธาตุเหล็ก ที่มีการจัดการด้านปริมาณเหล็กที่เติมและปริมาณเจลต่อข้าวต่างกัน

SOV	ปริมาณเหล็ก
ปริมาณเหล็ก (A)	**
ปริมาณเจลต่อข้าว (B)	ns
A x B	ns

** แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ns ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณเหล็กที่เติมต่อปริมาณเหล็กที่วัดได้ในข้าวเสริมธาตุเหล็ก

ปริมาณเหล็กที่เติม*	ปริมาณเหล็กที่วัดได้ในข้าว (mg/100g dry basis)
ระดับที่ 1	3.872 ^b
ระดับที่ 2	4.224 ^a

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

*ปริมาณเหล็กที่เติมระดับที่ 1 และระดับที่ 2 มีค่าเท่ากับ 3.659 และ 3.965 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักเปียก ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กที่เติมเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณเหล็กที่วัดได้เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณเหล็กที่เติมระดับที่ 1 คือเติม 3.659 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักเปียก หรือเติมธาตุเหล็กร้อยละ 120 ของ 2 ใน 3 RDA เพราะปริมาณเหล็กที่วัดได้ (ในรูปน้ำหนักเปียก) มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กที่ต้องการ (3.33 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม) มากกว่าเมื่อเติมเหล็กในระดับที่ 2 Ott (1988) รายงานว่าในการผลิตข้าวเสริมวิตามินและแร่ธาตุนั้น จะต้องเผื่อการสูญเสียจากกระบวนการผลิตอีกร้อยละ 20 ในงานวิจัยนี้พบว่าการสูญเสียปริมาณเหล็กในขั้นตอนการผสมในช่วงร้อยละ 12-18 และเลือกอัตราส่วนปริมาณเจลที่ใช้ต่อข้าวเป็น 5 : 100 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) มาใช้ผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็กสำหรับการศึกษาในขั้นต่อไป เพราะว่าใช้เวลาทำให้ข้าวแห้งน้อยที่สุด และข้าวที่ได้มีรอยร้าวและเมล็ดแตกหักน้อยกว่าข้าวที่เคลือบด้วยปริมาณเจลที่อัตราส่วนอื่น เนื่องจากเซลล์เม็ดแป้งที่อยู่ระหว่างแกนกลางและด้านนอก

ของเอนโดสเปิร์มมีรูปร่างยาวในแนวรัศมีเข้าสู่ส่วนกลางของเมล็ด ซึ่งผนังเซลล์ของเซลล์เม็ดแบ่งที่เป็นรัศมีสามารถเกิดแนวแยก (cleavage planes) ที่มีสาเหตุจากแรงกระทบหรือความเค้นจากความชื้น ทำให้เมล็ดข้าวแตกหักได้ (Marshall และ Wadsworth, 1994) ดังนั้นการเพิ่มความชื้นจากการเติมเจลแบ่งข้าว แล้วลดปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวมีผลทำให้เมล็ดข้าวร้าวและแตกหักได้ง่าย

4.3.3 การศึกษาพันธุ์ข้าวและชนิดของเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการเสริมธาตุเหล็ก

4.3.3.1 ผลการศึกษาปริมาณเหล็กและองค์ประกอบอื่นของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

ในการวิจัยนี้ได้ใช้พันธุ์ข้าว 2 พันธุ์ คือ ข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวท่าดอยสะเก็ด และสารประกอบเหล็ก 3 ชนิด ได้แก่ เฟอร์ริซัลเฟต (FS) เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต (FP) และไอร์ออนไกลซีน (IG) ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุเหล็กและความชื้นของข้าวเสริมธาตุเหล็กแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปริมาณธาตุเหล็กและความชื้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวท่าดอยสะเก็ดที่เคลือบด้วยเจลแบ่งข้าวที่มีการเติมสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ

พันธุ์ข้าว	ชนิดเหล็ก*	ปริมาณเหล็กที่เติมในเจล**	ปริมาณเหล็กที่วัดได้**	ความชื้น*** (%)
ข้าวดอกมะลิ 105	FS	3.618±0.068	3.304±0.016	12.37±0.15
	FP	3.616±0.074	3.310±0.070	12.18±0.65
	IG	3.623±0.071	3.045±0.093	12.46±0.12
ข้าวท่าดอยสะเก็ด	FS	3.484±0.036	3.397±0.058	12.32±0.89
	FP	3.520±0.099	3.390±0.063	12.01±0.71
	IG	3.495±0.060	3.103±0.025	11.98±0.61

*FS = เฟอร์ริซัลเฟต FP = เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต IG = ไอร์ออนไกลซีน

**ค่าเฉลี่ย+ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัมน้ำหนักเปียก

***ค่าเฉลี่ย+ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากผลการศึกษาปริมาณเหล็กที่เคลือบติดบนเมล็ดข้าว (ตารางที่ 4.6) แสดงให้เห็นว่าเราสามารถเสริมธาตุเหล็กในเมล็ดข้าว โดยวิธีการเคลือบธาตุเหล็กด้วยเจลแบ่งข้าวได้ ปริมาณเหล็กที่เติมในเจลแบ่งข้าวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 มากกว่าปริมาณเหล็กที่เติมในเจลแบ่งข้าวท่าดอย

สะเกิด ทั้งนี้เป็นเพราะในข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีปริมาณเหล็กในเมล็ดข้าวเริ่มต้นน้อยกว่าข้าวเก่า ดอยสะเกิด ปริมาณเหล็กที่เคลือบติดบนเมล็ดข้าวมีค่าระหว่าง 3.04-3.39 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม ซึ่งอยู่ในช่วง 3.0-3.7 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม (คลาดเคลื่อนร้อยละ 10 ของปริมาณเหล็กที่ต้องการ 3.33 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม) และข้าวที่เคลือบได้มีความชื้นระหว่างร้อยละ 11.98 ถึง 12.46 ซึ่งเป็นปริมาณความชื้นที่เหมาะสม (น้อยกว่าร้อยละ 14) สำหรับค่าสี (Lab) และดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็ก แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าสี Lab และดัชนีความขาวของข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวเก่าดอยสะเกิดที่เคลือบด้วยเจลแบ่งข้าวที่มีการเติมสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ

พันธุ์ข้าว	ชนิดเหล็ก	L mean±SD	a mean±SD	b Mean±SD	ดัชนีความขาว mean±SD
ข้าวดอกมะลิ 105	-	64.28±0.21	-1.04±0.11	+10.08±0.64	62.86±0.36
	FS	70.94±3.56	-0.81±0.19	+11.65±1.00	68.62±2.88
	FP	73.21±2.36	-0.81±0.17	+10.96±0.63	71.02±2.12
	IG	71.50±1.96	-0.79±0.14	+11.46±0.80	69.25±1.53
ข้าวเก่าดอยสะเกิด	-	46.03±2.35	+8.70±0.16	+2.62±0.28	45.27±2.32
	FS	40.12±2.58	+3.16±0.07	+0.83±0.48	40.03±2.57
	FP	41.82±2.54	+10.20±0.44	+3.03±0.44	40.85±2.54
	IG	40.60±2.44	+3.12±0.16	+0.96±0.50	40.51±2.42

จากผลการวัดสี (ค่า a และค่า b) และดัชนีความขาว (ตารางที่ 4.7) พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 เสริมธาตุเหล็ก มีลักษณะเหมือนมีแป้งติดที่ผิวเมล็ดข้าว ทำให้เมล็ดมีลักษณะด้านมากขึ้น ความมันวาวลดลง เมล็ดข้าวมีความขาวเพิ่มขึ้น โดยค่า L และค่าดัชนีความขาวมีค่ามากกว่าในข้าววัตถุดิบ สำหรับข้าวเก่าดอยสะเกิด ตัวอย่างข้าวที่เคลือบด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีสีเทาดำ โดยค่าสีแดง (a) และดัชนีความขาวมีค่าลดลง เนื่องจาก anthocyanins ที่เป็นรงควัตถุในข้าวเก่าดอยสะเกิดประกอบด้วย cyanidin 3-glucoside และ peonidin 3-glucoside (Ryu et al., 1998) ซึ่ง cyanidin 3-glucoside มีหมู่ ortho-dihydroxyl ที่ B ring จึงสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็กได้ โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะเกิดได้มากที่สุดที่ pH มากกว่า 5.5 (Jurd และ Asen, 1966) ซึ่งเจลแบ่งข้าวเก่าดอยสะเกิดมีค่า pH อยู่ในช่วงประมาณ 6.33-6.44 ดังนั้นเมื่อเติมเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีน ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ (Hurrell, 1999) จึงละลายในเจลแบ่งข้าวเก่าดอยสะเกิด แล้วเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ anthocyanins ทำให้ข้าว

เปลี่ยนเป็นสีเทาดำ เช่นเดียวกับ Theuer (2002) ที่ศึกษาถึงผลของเหล็กต่อสีของ porridge ที่ทำจากแป้งบาร์เลย์พบว่า เมื่อเติมเฟอร์ริซซัลเฟตลงใน porridge ให้มีปริมาณเหล็กเท่ากับ 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ porridge เปลี่ยนเป็นสีเทาเข้ม มีผลทำให้ค่า Lab ลดลง โดยค่า Lab ของ porridge ที่ไม่เติมเหล็กคือ 47.23, +0.54 และ +4.59 ตามลำดับ และค่า Lab ของ porridge ที่เติมเหล็กคือ 34.82, +0.29 และ -2.31 ในขณะที่ porridge ที่ทำจากแป้งบาร์เลย์ที่ปราศจาก proanthocyanidin (Caminant proanthocyanidin-free barley) เมื่อเติมเหล็กแล้วไม่พบว่ามีการเปลี่ยนเป็นสีเทา สำหรับข้าวกล้องงอกที่เคลือบด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตนั้นยังคงมีสีแดงม่วง เนื่องจากเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตไม่ละลายน้ำ (Hurrell, 1999) ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับ anthocyanins ทำให้ไม่มีการเปลี่ยนสีของเมล็ดข้าว ค่าสีแดง (a) ยังมีค่าสูง (+10.20)

4.3.3.2 ผลของการล้างข้าวเสริมธาตุเหล็ก

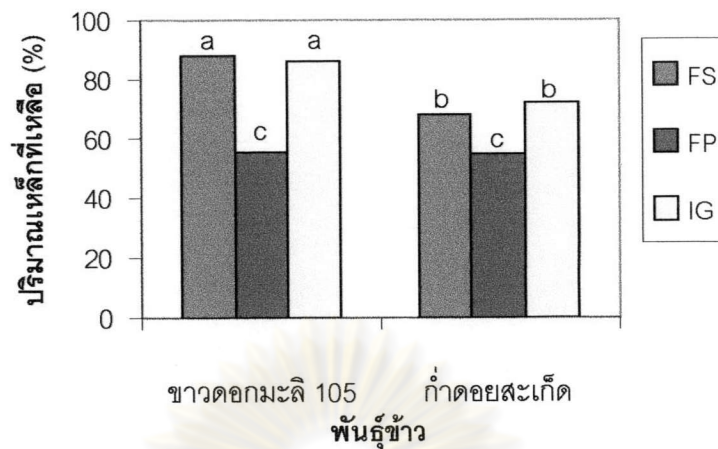
ปกติจะมีการล้างข้าวก่อนการหุงต้ม โดยมีการเปลี่ยนน้ำล้าง 2-3 ครั้ง เพื่อกำจัดฝุ่น เมล็ด เปลือกและสิ่งเจือปนอื่นๆ ปริมาณสารอาหารที่เหลือบนเมล็ดข้าวหลังการล้าง (%retention) ขึ้นกับปริมาณน้ำและเวลาที่ใช้ในการล้าง (Hoffpauer และ Wright, 1994) ในการวิจัยขั้นตอนนี้ได้นำตัวอย่างข้าวที่เคลือบได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นที่ผ่านการกำจัดไอออน (deionized water) (ภาคผนวก ๑) จากนั้นทำแห้งโดยใช้เครื่องอบแบบถาด จนข้าวมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 14 แล้ววิเคราะห์ปริมาณเหล็กที่เหลือในข้าวและในน้ำล้าง ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเหล็กที่เหลือ (%) ในข้าวเคลือบหลังล้างแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปริมาณเหล็กที่เหลือหลังล้างในข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ใช้พันธุ์ข้าวและชนิดสารประกอบเหล็กต่างกัน

SOV	ปริมาณเหล็ก
พันธุ์ข้าว (A)	**
ชนิดเหล็ก (B)	**
A x B	**

** แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

จากตารางที่ 4.8 พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและชนิดของเหล็ก (AxB) มีผลต่อปริมาณเหล็กที่เหลือ (%) ในข้าวหลังล้างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) แสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ปริมาณธาตุเหล็กที่เหลือในเมล็ดข้าวหลังการล้างของข้าวเสริมธาตุเหล็ก a,b...กราฟแท่งที่มีอักษรกำกับต่างกันมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ปริมาณเหล็กในข้าวเคลือบทุกตัวอย่างมีปริมาณลดลงเหลืออยู่ระหว่างร้อยละ 54.74-88.33 (รูปที่ 4.1) ซึ่ง Hoffpauer และ Wright (1994) รายงานว่าข้าวเสริมวิตามินและแร่ธาตุโดยวิธีการเคลือบนั้นมีปริมาณวิตามินและแร่ธาตุหลังการล้างลดลงเหลือร้อยละ 85 และชุดีมา อัครเสถียร (2543) ศึกษาการเคลือบไอโอดีนในข้าวพันธุ์คลองหลวง 1 โดยใช้เจลแป้งข้าวเจ้าและเจลแป้งข้าวเหนียว ความเข้มข้นร้อยละ 1, 3 และ 5 เมื่อนำข้าวที่ได้มาล้างพบว่า ไอโอดีนในเมล็ดข้าวมีปริมาณลดลง โดยปริมาณไอโอดีนที่เหลือหลังการล้างมีค่าระหว่างร้อยละ 61-87

ข้าวข้าวดอกมะลิ 105 ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีปริมาณเหล็กที่เหลือสูงสุด ส่วนข้าวข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวเจ้า 105 ที่เคลือบด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีปริมาณเหล็กเหลือน้อยที่สุด เนื่องจากเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตไม่ละลายน้ำ จึงแขวนลอยอยู่ในเจลแป้งข้าว เมื่อนำมาเคลือบข้าวจึงเกาะติดบนผิวเมล็ดข้าว และเมื่อนำไปล้างจึงสูญเสียเหล็กได้ง่าย ส่วนเฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนละลายในเจลแป้งข้าวความเข้มข้นร้อยละ 3 เมื่อนำไปเคลือบข้าว ทำให้ธาตุเหล็กบางส่วนอาจมีการแทรกซึมเข้าไปในเนื้อเมล็ดข้าวได้ และธาตุเหล็กอาจเกิดการยึดจับกับอะมิโลสในเมล็ดข้าว ดังนั้นจึงมีเหล็กสูญเสียไปกับการล้างน้อยกว่า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hettiarachchy et al. (1996) ที่เสริมแคลเซียมในเมล็ดข้าวโดยวิธีการแช่ข้าวในสารละลาย calcium lactate ความเข้มข้นร้อยละ 3 ในอัตราส่วน 1.0 : 0.75 (w/v) เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปนึ่งและทำแห้ง พบว่าสามารถเสริมแคลเซียมในเมล็ดข้าวได้ 226.38 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม และปริมาณแคลเซียมหลังการล้างเท่ากับ 210.62 มิลลิกรัมต่อ

ข้าว 100 กรัม ผู้วิจัยเสนอว่าการคงอยู่ของแคลเซียมหลังการล้างเกิดจากการยึดจับกันของแคลเซียมกับอะมิโลสในเมล็ดข้าว

ส่วนข้าวที่ก่อดอยสะเก็ดที่เคลือบด้วยเฟอร์ริซัลเฟตและไฮรอนไกลซีนนั้นมีการสูญเสียเหล็กไปกับการล้างได้มากกว่าข้าวขาวดอกมะลิที่เคลือบด้วยเหล็กทั้งสองชนิด เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เจลแบ่งข้าวที่ก่อดอยสะเก็ดมาทำเป็นเจลสำหรับเคลือบข้าวที่ก่อดอยสะเก็ด ดังนั้นเฟอร์ริซัลเฟตและไฮรอนไกลซีนสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ anthocyanins ที่อยู่ในข้าวที่ก่อดอยสะเก็ด (Jurd และ Asen, 1966) และ anthocyanins ละลายน้ำได้ ดังนั้นเมื่อนำข้าวไปล้างจึงทำให้มีเหล็กละลายหลุดออกมาพร้อมกับ anthocyanins

4.3.3.3 ผลของการหุงข้าวเสริมธาตุเหล็ก

นำตัวอย่างข้าวที่เคลือบได้มาหุง ในการหุงข้าวขาวดอกมะลิ 105 นั้นได้ใช้ข้าวและน้ำในอัตราส่วน 1:1.25 และนึ่งเป็นเวลา 30 นาที ส่วนข้าวที่ก่อดอยสะเก็ดเป็นข้าวเหนียว จึงต้องนำข้าวมาแช่น้ำในอัตราส่วน 1:1.25 เป็นเวลา 6 ชั่วโมงก่อน รินน้ำทิ้งแล้วจึงนำมานึ่งเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำข้าวที่หุงสุกแล้วมาวิเคราะห์หาธาตุเหล็ก สำหรับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเหล็กที่เหลือ (%) ในข้าวเคลือบหลังการหุง แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเหล็กที่เหลือหลังหุงของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

SOV	ปริมาณเหล็ก
พันธุ์ข้าว (A)	**
ชนิดเหล็ก (B)	ns
A x B	ns

** แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ns ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

จากตารางที่ 4.9 พันธุ์ข้าว (A) เป็นปัจจัยที่ทำให้ปริมาณเหล็กที่เหลืออยู่หลังการหุงของข้าวเคลือบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณเหล็กที่เหลือหลังหุงแสดงในตารางที่ 4.10 โดยปริมาณเหล็กในข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีการสูญเสียไปเนื่องจากการหุงน้อยมาก ซึ่งปริมาณเหล็กที่เหลือหลังการหุงมีค่าร้อยละ 96.82 เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุซึ่งไม่ถูกทำลายโดยความร้อน แสง oxidizing agent หรือเมื่ออยู่ในสภาวะที่มี pH สูงหรือต่ำมาก (Miller, 1996) เช่นเดียวกับที่ Peil et al. (1982) รายงานว่า ไม่มีการสูญเสียธาตุเหล็กเนื่องจาก

การหุงข้าวที่เสริมธาตุเหล็กและวิตามินที่เคลือบด้วยเซลลูโลส ส่วนในข้าวกำลังคอดยสะเกิดมีปริมาณเหล็กเหลือในข้าวหลังหุงน้อยกว่าในข้าวขาวดอกมะลิ เพราะมีการสูญเสียปริมาณธาตุเหล็กไปในขั้นตอนการแช่ข้าวแล้วรินน้ำที่แช่ทิ้งก่อนหุง ซึ่งอธิบายได้เช่นเดียวกับการล้างข้าว โดยธาตุเหล็กในข้าวกำลังคอดยสะเกิดที่เคลือบด้วยเฟอร์ริคซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนนั้นละลายน้ำออกมาพร้อมกับ anthocyanins ในขณะที่แช่ข้าว ส่วนข้าวกำลังคอดยสะเกิดที่เคลือบด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตนั้น เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตไม่ละลายน้ำ เมื่อเคลือบข้าวด้วยเจลแป้งข้าว เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตจึงเกาะติดที่ผิวเมล็ดข้าว เมื่อนำข้าวเคลือบไปแช่น้ำ ทำให้เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตหลุดออกจากผิวเมล็ดข้าวได้ จึงมีการสูญเสียธาตุเหล็กไป

ตารางที่ 4.10 ผลของพันธุ์ข้าวต่อปริมาณเหล็กที่เหลือหลังหุงของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

พันธุ์ข้าว	ปริมาณเหล็กที่เหลือ (%)
ขาวดอกมะลิ 105	96.82 ^a
กำลังคอดยสะเกิด	71.29 ^b

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

4.3.3.4 อายุการเก็บของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

อายุการเก็บ (shelf life) เป็นระยะเวลาของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ จนกระทั่งผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาพที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ รวมทั้งการสูญเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในขณะที่ยังจำหน่ายแก่ผู้บริโภค เช่นคุณค่าทางโภชนาการลดลง การเปลี่ยนแปลงสี กลิ่นรส และลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้นำตัวอย่างข้าวเสริมธาตุเหล็กมาเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 เดือน หลังจากเก็บได้ตามระยะเวลาที่กำหนดจึงสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์ความชื้น ปริมาณเหล็ก วัดค่าสี (Lab) แล้วคำนวณดัชนีความขาวทุก 1 เดือน และวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ทุก 2 เดือน จากนั้นนำผลที่วิเคราะห์ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความชื้น ปริมาณเหล็ก ค่าเปอร์ออกไซด์ และดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

SOV	ความชื้น	ปริมาณเหล็ก	ค่าเปอร์ออกไซด์	ดัชนีความขาว
พันธุ์ข้าว (A)	ns	**	**	**
ชนิดเหล็ก (B)	ns	**	**	**
ระยะเวลา (C)	**	ns	**	ns
A x B	ns	ns	**	ns
A x C	ns	**	**	*
B x C	ns	ns	*	ns
A x B x C	ns	ns	ns	ns

*แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

**แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

(1) การเปลี่ยนแปลงความชื้น

จากตารางที่ 4.11 พบว่าระยะเวลาการเก็บ (C) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นของตัวอย่างข้าวเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) (ตารางที่ 4.12) โดยปริมาณความชื้นของข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ มีค่าระหว่างร้อยละ 12.08 ถึง 12.74 ซึ่งปริมาณความชื้นของข้าวเสริมธาตุเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากในขั้นตอนการบดข้าว เพื่อเตรียมตัวอย่างวิเคราะห์หาความชื้น อาจมีการถ่ายเทปริมาณความชื้นระหว่างตัวอย่างข้าวกับสภาวะแวดล้อม มีผลให้ปริมาณความชื้นที่วิเคราะห์ได้มีค่าแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามความชื้นของข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ ยังอยู่ในระดับที่เหมาะสม (น้อยกว่าร้อยละ 14)

ตารางที่ 4.12 ปริมาณความชื้นของข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

เดือนที่	ปริมาณความชื้น (%)
0	12.38 ^{bc}
1	12.58 ^{ab}
2	12.74 ^a
3	12.43 ^{abc}
4	12.36 ^{bc}
5	12.17 ^c
6	12.15 ^c
7	12.08 ^c
8	12.29 ^{bc}
9	12.28 ^{bc}

a,b..ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

(2) การเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็ก

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.11) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าว (A) และระยะเวลาการเก็บ (C) มีผลต่อปริมาณเหล็กในเมล็ดข้าวอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) (ตารางที่ 4.13) โดยปริมาณเหล็กของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ระยะเวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.630 ถึง 3.980 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักแห้ง โดยปริมาณเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนข้าวกำลังทยอยสะเด็ดมีปริมาณเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ ระหว่าง 3.826 ถึง 4.103 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม น้ำหนักแห้ง และมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย การที่ปริมาณเหล็กในเมล็ดข้าวมีค่าลดลงหรือเพิ่มขึ้นนี้ อาจเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของธาตุเหล็กที่เคลือบติดบนเมล็ดข้าว ทำให้ปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละเดือนมีค่าแตกต่างกัน แต่เมื่อคิดปริมาณเหล็กในรูปน้ำหนักเปียกแล้ว ปริมาณเหล็กยังคงอยู่ในช่วงที่ต้องการคือ 3.0-3.7 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม น้ำหนักเปียก ซึ่ง Rubin, Emodi และ Scialpi (1977) ได้รายงานว่าการเสริมวิตามินและแร่ธาตุโดยวิธีการเคลือบ หลังจากเก็บข้าวที่เคลือบได้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 เดือน มีปริมาณวิตามินเอ ไทอะมิน ไนอะซิน ไพริดอกซิน กรดโฟลิก และธาตุเหล็กเหลืออยู่ร้อยละ 87, 99, 98, 100, 100 และ 100 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัมน้ำหนักแห้ง) ของข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวกำลังอยสะเก็ดเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

เดือนที่	พันธุ์ข้าว	
	ขาวดอกมะลิ105	กำลังอยสะเก็ด
0	3.693 ^{ef}	3.880 ^{abcde}
1	3.630 ^f	4.103 ^a
2	3.641 ^f	4.091 ^a
3	3.828 ^{bcdef}	3.839 ^{bcdef}
4	3.741 ^{def}	3.956 ^{abcd}
5	3.958 ^{abcd}	3.826 ^{bcdef}
6	3.732 ^{def}	3.852 ^{bcdef}
7	3.814 ^{bcdef}	4.027 ^{ab}
8	3.980 ^{abc}	3.892 ^{abcde}
9	3.794 ^{cdef}	3.850 ^{bcdef}

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่งและแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.11 พบว่าชนิดของเหล็กมีผลต่อปริมาณเหล็กในเมล็ดข้าวอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) ดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลของชนิดของเหล็กต่อปริมาณเหล็กในข้าว

ชนิดของเหล็ก	ปริมาณเหล็ก* (มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัมน้ำหนักแห้ง)
เฟอร์ริสซัลเฟต	3.948 ^a
เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต	3.932 ^a
ไฮดรอกไซด์	3.687 ^b

*ค่าเฉลี่ยของปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ 9 เดือน

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวดิ่งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

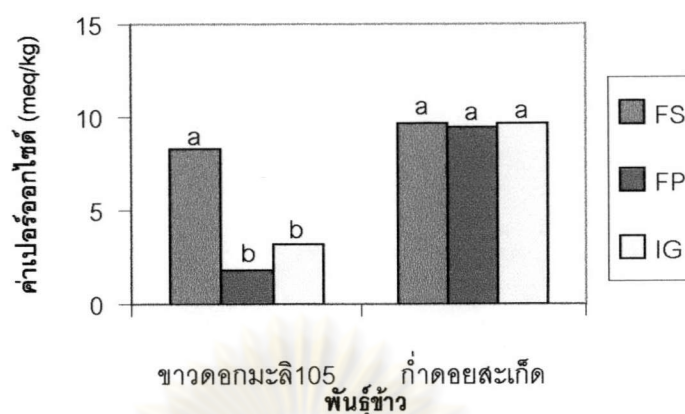
ปริมาณเหล็กในตัวอย่างข้าวที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีนมีปริมาณน้อยกว่าตัวอย่างข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริซัลเฟตและเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต เนื่องจากปริมาณเหล็กเริ่มต้น (เดือนที่ 0) ของตัวอย่างข้าวที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีนมีค่าน้อยกว่า (ตารางที่ 4.6) ทำให้เมื่อวิเคราะห์ปริมาณเหล็กตลอดระยะเวลาการเก็บ จึงมีปริมาณเหล็กน้อยกว่าตัวอย่างข้าวที่เสริมด้วยเหล็กอีกสองชนิดที่ยังไม่ทราบถึงเหตุผลของการที่ข้าวที่เคลือบด้วยไอร์ออนไกลซีนมีปริมาณเหล็กติดบนเมล็ดข้าวน้อยกว่าข้าวที่เคลือบด้วยเฟอร์ริซัลเฟตและเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต

(3) การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้สารเปอร์ออกไซด์ ซึ่งสามารถสลายตัวให้สารประกอบที่เป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นหืน (rancid flavor) ในไขมัน โดยปริมาณเปอร์ออกไซด์บ่งชี้ถึงการเกิดออกซิเดชันที่เป็นขั้นแรกของการเสื่อมเสียของไขมัน (Low และ Ng, 1987) ไขมันในข้าวประกอบด้วยกรดไขมัน palmitic acid oleic acid และ linoleic acid เป็นองค์ประกอบหลัก Taira (1983) รายงานว่าชนิดของกรดไขมันในข้าวประกอบด้วย palmitic acid (C16:0) ร้อยละ 16-23 stearic acid (C18:0) ร้อยละ 1-3 oleic acid (C18:1) ร้อยละ 34-43 linoleic acid (C18:2) ร้อยละ 35-43 และ linolenic acid (C18:3) ร้อยละ 1-3 ไขมันในเมล็ดข้าวที่เก็บไว้สามารถเกิดได้ทั้งไฮโดรลิซิสและออกซิเดชัน (Villareal et al., 1976, cited in Juliano, 1983) ซึ่งมีผลต่อการเสื่อมเสียของไขมันในเมล็ดข้าว

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของค่าเปอร์ออกไซด์ (ตารางที่ 4.11) ระหว่างพันธุ์ข้าว (A) ชนิดของเหล็ก (B) และระยะเวลาการเก็บ (C) พบว่า มีอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและชนิดของเหล็ก (AxB) อิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวกับระยะเวลาการเก็บ (AxC) และอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของเหล็กกับระยะเวลาการเก็บ (BxC) ต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

สำหรับผลของพันธุ์ข้าวกับชนิดของเหล็กต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

a,b กราฟแท่งที่มีอักษรกำกับต่างกันมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

จากรูปที่ 4.2 ข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตมีค่าเปอร์ออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีนและเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต Hurrell (1999) รายงานว่า เฟอร์รัสซัลเฟตสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและทำให้เกิดปัญหา off-flavor ระหว่างการเก็บธัญพืช ดังนั้นข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตมีโอกาสเกิดกลิ่นเหม็นเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้มากกว่าข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีนและเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต สำหรับข้าวท่าคอยสะแกที่เสริมด้วยเหล็กทั้งสามชนิดมีค่าเปอร์ออกไซด์ไม่แตกต่างกัน ($p \geq 0.05$) เนื่องจากในข้าวท่าคอยสะแกมี anthocyanins ได้แก่ cyanidin 3-glucoside และ peonidin 3-glucoside (Ryu et al., 1998) ซึ่ง cyanidin 3-glucoside เป็นสารที่มี oxygen radical absorbing capacity (ORAC) จึงช่วยชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันในข้าวท่าคอยสะแก ดังนั้นจึงไม่มีความแตกต่างของค่าเปอร์ออกไซด์ในข้าวท่าคอยสะแกที่เติมเหล็กทั้งสามชนิด

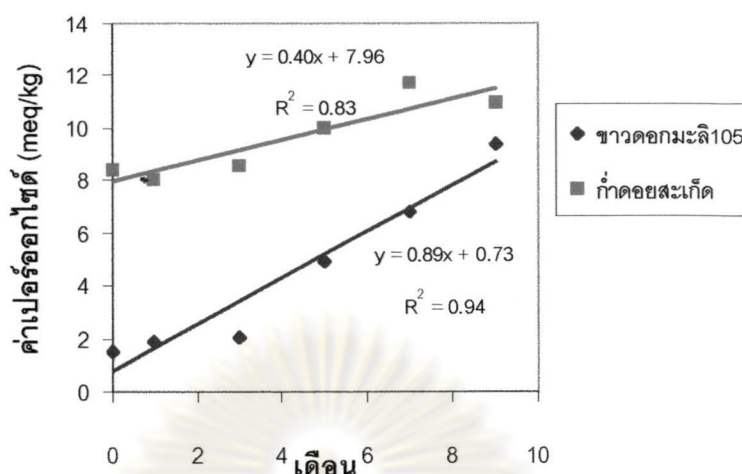
ผลของพันธุ์ข้าวกับระยะเวลาการเก็บต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

เดือนที่	ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq/kg)	
	ขาวดอกมะลิ 105	ก่ำดอยสะเก็ด
0	1.50 ^e	8.43 ^{bc}
1	1.91 ^e	8.04 ^{bc}
3	2.05 ^e	8.53 ^{bc}
5	4.91 ^d	9.97 ^{abc}
7	6.79 ^{cd}	11.70 ^a
9	9.37 ^{abc}	10.99 ^{ab}

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

จากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็กทั้งสองพันธุ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับ Yasumatsu และ Moritaka (1964) ที่ได้ศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันและการเปลี่ยนแปลงระหว่างเก็บของไขมันในข้าวสาร (Japanese milled rice) พบว่า ปริมาณ non starch lipid และ starch lipid ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 เดือน แต่กรดไขมันอิสระใน non starch lipid มีค่าเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณของ neutral fat ที่ลดลง ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเกิดออกซิเดชันของไขมันในข้าวเพิ่มขึ้น ดังที่ Lam, Proctor และ Meullenet (2001) ได้ศึกษาการเกิดกรดไขมันอิสระและออกซิเดชันของไขมันในข้าวสาร (undermilled rice) ที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 เป็นเวลา 50 วัน พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.03 เป็นร้อยละ 0.23 เนื่องจากเอนไซม์ไลเปสสลาย acylglyceride ได้กรดไขมันอิสระ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณ conjugated diene (CD) hydroperoxide ที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ไมโครกรัมต่อข้าว 100 กรัม เป็น 48 ไมโครกรัมต่อข้าว 100 กรัม แสดงว่า CD มาจากการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมัน สำหรับค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เสริมธาตุเหล็กมีอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวก่ำดอยสะเก็ด ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวข้าวดอกมะลิ 105 และข้าวท่าดอยสะเก็ด ที่ระยะเวลาต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวข้าวดอกมะลิ 105 มีอัตราการเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.89 meq/kg/เดือน มากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวท่าดอยสะเก็ดที่มีค่าเท่ากับ 0.40 meq/kg/เดือน เนื่องจากข้าวท่าดอยสะเก็ดมี anthocyanins ชนิด cyanidin 3-glucoside (Ryu et al., 1998) ซึ่งเป็นสารที่มสมบัติเป็น oxygen radical absorbing จึงช่วยชะลอการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันในข้าวท่าดอยสะเก็ดได้

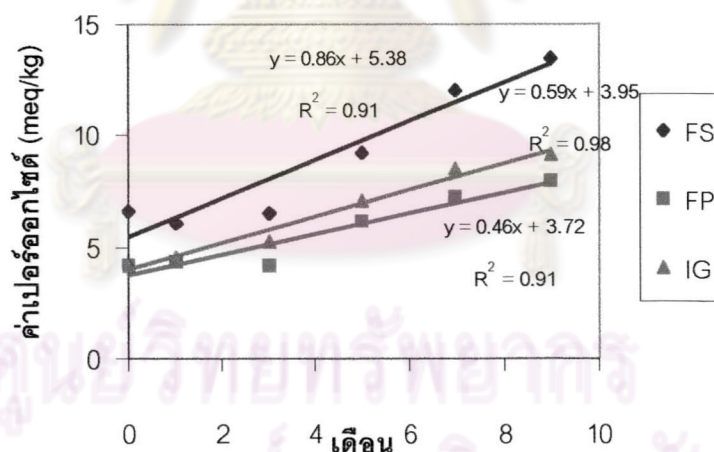
สำหรับผลของชนิดของเหล็กกับระยะเวลาการเก็บต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก แสดงดังตารางที่ 4.16 พบว่าข้าวเสริมธาตุเหล็กทุกตัวอย่างมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ เนื่องจากไขมันในเมล็ดข้าวสามารถเกิดออกซิเดชัน (Villarel et al., 1976, cited in Juliano, 1983) ทำให้ข้าวมีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น โดยข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตมีอัตราการเพิ่มของค่าเปอร์ออกไซด์มากที่สุดเท่ากับ 0.86 meq/kg/เดือน ตามด้วยข้าวที่เสริมด้วยไอร์รอนไกลซีน ซึ่งมีอัตราการเพิ่มของค่าเปอร์ออกไซด์เป็น 0.59 meq/kg/เดือน และข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกโพโรฟอสเฟตที่มีอัตราการเพิ่มของค่าเปอร์ออกไซด์คือ 0.46 meq/kg/เดือน (รูปที่ 4.4) โดย Hurrell (1999) รายงานว่า เฟอร์ริสซัลเฟตสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันและทำให้เกิดปัญหา off-flavor ระหว่างการเก็บธัญพืช ส่วนไอร์รอนไกลซีนสามารถทำให้เกิดปัญหาทางประสาทสัมผัส (organoleptic problem) ได้เช่นเดียวกับเฟอร์ริสซัลเฟต สำหรับ

เพอร์ริกไฟโรฟอสเฟตไม่ละลายน้ำและละลายในกรดเจือจางได้น้อย จึงไม่ทำให้เกิดปัญหาเหมือนเพอร์ริสซิลเฟตและโอโรอนไกลซีน

ตารางที่ 4.16 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็กชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บต่างกัน

เดือนที่	ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq/kg)		
	FS	FP	IG
0	6.62 ^{bc}	4.16 ^c	4.12 ^c
1	6.04 ^{bc}	4.33 ^c	4.56 ^c
3	6.50 ^{bc}	4.12 ^c	5.27 ^c
5	9.22 ^{abc}	6.10 ^{bc}	7.02 ^{bc}
7	12.04 ^{ab}	7.22 ^{bc}	8.47 ^{abc}
9	13.46 ^a	7.98 ^{abc}	9.10 ^{abc}

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



รูปที่ 4.4 ค่าเปอร์ออกไซด์ของข้าวเสริมธาตุเหล็กชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บต่างกัน

(4) การเปลี่ยนแปลงดัชนีความขาว

ในงานวิจัยนี้ได้วัดค่าสี Lab ของข้าวเสริมธาตุเหล็ก ทุก 1 เดือน แล้วคำนวณค่าดัชนีความขาว เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าดัชนีความขาวพบว่า มีอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวกับระยะเวลาการเก็บ (AxC) และชนิดของเหล็กมีผลต่อดัชนีความขาวของ

ข้าวเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4.11) สำหรับผลของพันธุ์ข้าวกับระยะเวลาการเก็บต่อดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็ก แสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ดัชนีความขาวของข้าวขาวดอกมะลิ105 และข้าวกำลังงอกสะเก็ดเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

เดือนที่	พันธุ์ข้าว	
	ขาวดอกมะลิ105	กำลังงอกสะเก็ด
0	70.60 ^a	41.70 ^{cdef}
1	69.51 ^a	41.06 ^f
2	70.24 ^a	41.12 ^{ef}
3	70.15 ^a	41.44 ^{def}
4	69.62 ^a	41.34 ^{def}
5	69.93 ^a	44.15 ^b
6	70.26 ^a	43.07 ^{bcde}
7	69.48 ^a	42.32 ^{bcdef}
8	69.51 ^a	43.26 ^{bcd}
9	68.82 ^a	43.56 ^{bc}

a,b... ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและแนวนอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมธาตุเหล็กมีค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แต่เมล็ดข้าวมีสีเหลืองมากขึ้น งามขึ้น คงเส้น (2532) รายงานการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของข้าวหอมที่เก็บไว้เป็นเวลา 6 เดือน ว่าความขาวของเมล็ดลดลงเล็กน้อยใน 4 เดือนแรก หลังจากนั้นความขาวจะเพิ่มขึ้น เพราะผิวเมล็ดมีผนังแป้งเกาะอยู่ แต่ปริมาณเมล็ดเหลืองเพิ่มขึ้น ส่วนดัชนีความขาวของข้าวกำลังงอกสะเก็ดเสริมธาตุเหล็กมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก anthocyanins เกิดการสลายตัว สังเกตได้จากค่าสีแดง (a) ของข้าวเสริมธาตุเหล็กมีค่าลดลง (ตารางที่ 4.18) Maccarone, Maccarone และ Rapisarda (1985) รายงานว่า anthocyanins ในน้ำส้ม (Moro oranges) จะถูกทำลายอย่างสมบูรณ์หลังจากเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 16-18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 เดือน สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร และสีแดงของน้ำส้มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล

ตารางที่ 4.18 ค่าสีแดง* (a) ของข้าวท่าดอยสะเก็ดเสริมธาตุเหล็กชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลาการเก็บต่างกัน

เดือนที่	FS	FP	IG
0	3.16	10.05	3.34
1	3.08	10.05	3.36
2	3.02	10.40	3.18
3	2.90	10.16	3.18
4	2.89	9.80	3.05
5	3.26	9.75	3.15
6	3.07	9.70	3.19
7	3.08	9.94	2.99
8	3.05	9.92	3.19
9	3.02	9.81	3.18

*ค่าเฉลี่ยจากการวัด 2 ซ้ำ

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.11) พบว่าชนิดของเหล็กยังเป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่าดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) แสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ผลของชนิดของเหล็กต่อดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

ชนิดของเหล็ก	ดัชนีความขาว *
เฟอร์ริสซัลเฟต	55.69 ^b
เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต	56.91 ^a
ไอร์ออนไกลซีน	55.56 ^b

*ค่าเฉลี่ยดัชนีความขาวที่คำนวณได้ทั้ง 9 เดือน

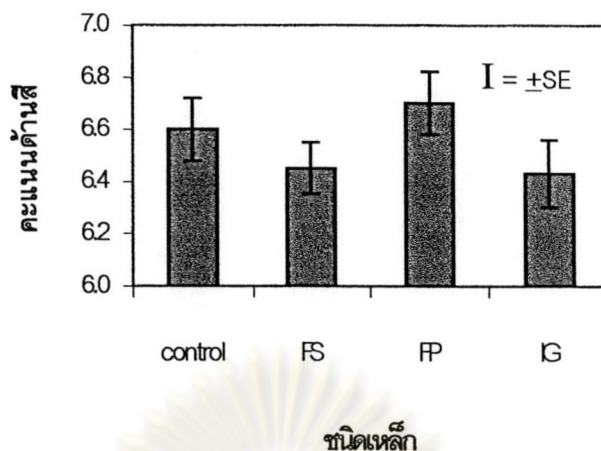
a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

จากตารางที่ 4.19 ข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีค่าดัชนีความขาวสูงสุด ส่วนข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

($p \geq 0.05$) เนื่องจากเมื่อเติมเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนในเจลแบ่งข้าวขาวดอกมะลิ 105 เหล็กทั้งสองชนิดละลายในเจลแบ่งข้าว ทำให้เจลแบ่งข้าวมีสีข้าวออกเขียว และ ferrous iron สามารถเกิดออกซิเดชันเป็น ferric iron (Miller, 1996) ส่งผลให้ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เคลือบได้ มีสีข้าวเหลืองหม่น สำหรับเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีสีเหลืองสว่าง ดังนั้นเมื่อนำมาเคลือบข้าวทำให้ ข้าวที่เคลือบได้มีสีข้าวเหลืองสว่าง ส่วนข้าวก่ำดอยสะเก็ดที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออน ไกลซีนมีสีเทาดำ ในขณะที่ข้าวก่ำดอยสะเก็ดที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตยังคงมีสีแดงม่วง ทำให้ค่า L ของข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีค่าต่ำกว่าค่า L ของข้าวที่เสริม ด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต ซึ่งส่งผลต่อดัชนีความขาวในลักษณะเดียวกัน

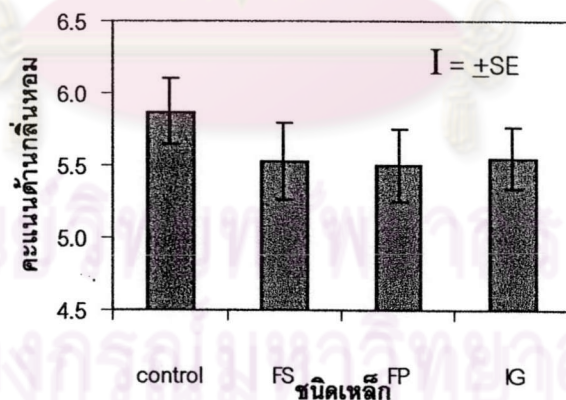
4.3.3.5 คุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

จากผลการศึกษาปริมาณเหล็กและองค์ประกอบอื่นในข้าวเสริมธาตุเหล็ก ผลของการล้าง และการหุงข้าวต่อปริมาณเหล็กบนเมล็ดข้าว และติดตามการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บข้าว เสริมธาตุเหล็ก พบว่าพันธุ์ข้าวที่เหมาะสมสำหรับการเสริมธาตุเหล็กคือ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เนื่องจากข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมธาตุเหล็กยังคงมีสีข้าวเหลืองใกล้เคียงกับสีของข้าวตาม ธรรมชาติ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างชัดเจนเมื่อมีการเสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออน ไกลซีน รวมทั้งปริมาณเหล็กที่เหลือหลังการล้างและการหุงมีค่าสูงกว่าปริมาณเหล็กที่เหลือในข้าว ก่ำดอยสะเก็ด นอกจากนี้มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บน้อย ถึงแม้ว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีค่าเปอร์ออกไซด์มากกว่าข้าวก่ำดอยสะเก็ด แต่ค่าเปอร์ออกไซด์ตลอดระยะเวลาการเก็บมี ค่าไม่เกิน 20 meq/kg ซึ่งยังไม่มีผลทำให้เกิดกลิ่นหืนของไขมันในเมล็ดข้าว (Low และ Ng, 1987) ดังนั้นจึงเลือกข้าวขาวดอกมะลิ 105 เสริมธาตุเหล็กมาประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส เพื่อหา ชนิดของสารประกอบเหล็กที่เหมาะสมและดูการยอมรับของผู้บริโภค โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 เสริมธาตุเหล็กทางด้านสี กลิ่นหอม กลิ่นเหม็นฉับ รสชาติ ความเลื่อมมันของผิวเมล็ดและความชอบรวม แสดงในรูปที่ 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

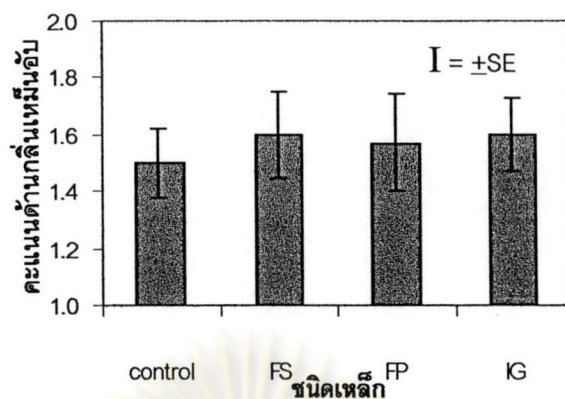


รูปที่ 4.5 คะแนนทางด้านสีของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ
คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 5 (คล้ำหรือเหลืองจางๆ) ถึง 7 (ขาวนวล)

ข้าวที่เสริมธาตุเหล็กมีคะแนนด้านสีไม่แตกต่างจากข้าวที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) แต่ข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตนั้นมีคะแนนทางด้านสี โดยมีสีขาวมากกว่าข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอโรนไกลซีน ซึ่งสอดคล้องกับผลค่าดัชนีความขาวของข้าวเสริมธาตุเหล็ก

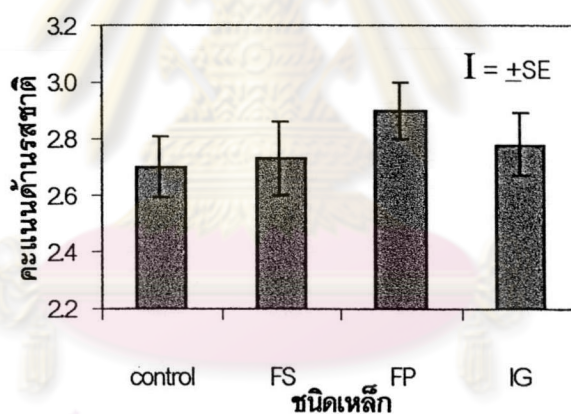


รูปที่ 4.6 คะแนนทางด้านกลั่นหอมของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็ก
ชนิดต่างๆ : คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 5 (หอมปานกลาง) ถึง 7 (หอมค่อนข้างมาก)



รูปที่ 4.7

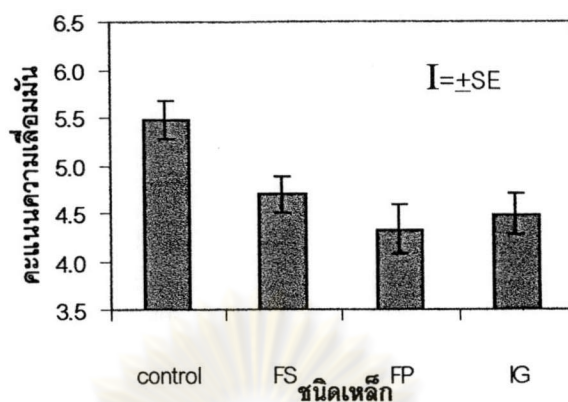
คะแนนทางด้านกลิ่นเหม็นอับของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ: คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 1 (ไม่เหม็น) ถึง 3 (เหม็นเล็กน้อย)



รูปที่ 4.8

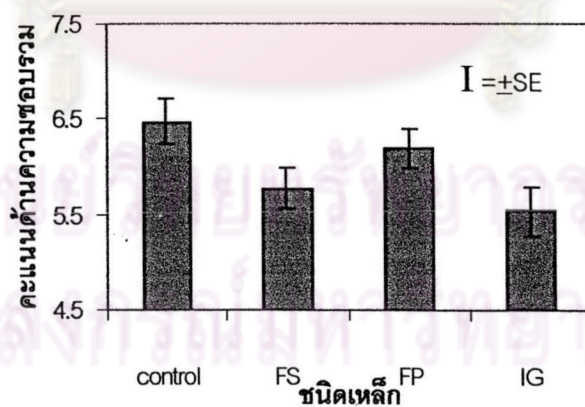
คะแนนทางด้านรสชาติของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ: คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 1 (จืด) ถึง 3 (ปกติ)

คะแนนทางด้านกลิ่นหอม กลิ่นเหม็นอับ และรสชาติของข้าวที่เสริมและไม่ได้เสริมธาตุเหล็ก (รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8) มีคะแนนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)



รูปที่ 4.9 คະแนนทางด้านความเลื่อมมันของข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็ก ชนิดต่างๆ : คະแนนที่ได้อยู่ในช่วง 3 (ค่อนข้างด้าน) ถึง 5 (ผิวมันเล็กน้อย)

เมื่อพิจารณาทางด้านความเลื่อมมัน (รูปที่ 4.9) พบว่า ข้าวที่ไม่เสริมธาตุเหล็กมีคະแนนสูงกว่าข้าวที่เสริมธาตุเหล็กทั้ง 3 ชนิด อาจเนื่องมาจากข้าวที่เสริมธาตุเหล็กนั้นมีแป้งเคลือบติด เมื่อหุงสุกแล้วจึงมีแป้งสุกติดบนเมล็ดข้าวทำให้ข้าวมีผิวขรุขระ ความเลื่อมมันจึงน้อยกว่าข้าวที่ไม่เสริมธาตุเหล็ก



รูปที่ 4.10 คະแนนทางด้านความชอบรวมของข้าวชาวดอกมะลิ 105 ที่เสริมด้วยธาตุเหล็ก ชนิดต่างๆ : คະแนนที่ได้อยู่ในช่วง 5 (ชอบเล็กน้อย) ถึง 7 (ชอบปานกลาง)

จากรูปที่ 4.10 ข้าวที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กมีคะแนนความชอบสูงสุดไม่แตกต่างกับคะแนนความชอบของข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ข้าวที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีนมีคะแนนต่ำสุด แต่คะแนนที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากคะแนนของข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ถึงแม้ว่าข้าวที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีคะแนนความชอบต่ำกว่าข้าวที่ไม่ได้เสริมและที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต แต่คะแนนความชอบที่ได้มีค่าอยู่ในช่วงคะแนน 5 (ชอบเล็กน้อย) ถึง 7 (ชอบปานกลาง) ดังนั้น เฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนจึงเป็นสารประกอบเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการเสริมธาตุเหล็กในเมล็ดข้าว เนื่องจากสารประกอบเหล็กทั้งสองชนิดมี iron bioavailability สูง (Hurrell, 1999)

ค่าใช้จ่ายในการผลิตข้าวเสริมเหล็ก

ค่าใช้จ่ายสำหรับการผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็ก ในรูปเฟอร์ริสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีน จำนวน 1 กิโลกรัม (ไม่รวมค่าน้ำ ค่าไฟ และค่าแรง) มีดังนี้

1. แบ่งข้าว สำหรับทำเป็นเจลใช้ในการเคลือบข้าว ราคาประมาณ 20 บาทต่อกิโลกรัม

ในการเคลือบข้าวใช้น้ำใช้เจลแบ่งข้าวความเข้มข้นร้อยละ 3 ปริมาณเจลต่อข้าวคือ 5:100 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) และทำการเคลือบจำนวน 2 ครั้ง ดังนั้นต้องใช้แบ่งข้าวสำหรับทำเป็นเจลประมาณ $5 \times (1000/100) \times 2 \times (3/100)$ เท่ากับ 3 กรัม คิดเป็นเงินเท่ากับ 0.06 บาท

2. สารประกอบเหล็กที่ใช้ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)

2.1 เฟอร์ริสซัลเฟต ราคา 582 บาทต่อกิโลกรัม ในการเคลือบข้าว 1 กิโลกรัมนั้น ใช้เฟอร์ริสซัลเฟตประมาณ 0.13 กรัม คิดเป็นเงินเท่ากับ 0.08 บาท

2.2 ไอร์ออนไกลซีน ราคา 830 บาทต่อ 200 กรัม การผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็กนั้น ใช้ไอร์ออนไกลซีน ประมาณ 0.20 กรัม หรือเท่ากับ 0.83 บาท

ดังนั้นในการผลิตข้าวเสริมธาตุเหล็กในรูปเฟอร์ริสซัลเฟต โดยวิธีการเคลือบด้วยเจลแบ่งข้าว จำนวน 1 กิโลกรัม มีค่าใช้จ่าย เท่ากับ $0.06 + 0.08$ หรือ 0.14 บาท

ส่วนการเสริมธาตุเหล็กในรูปไอร์ออนไกลซีน มีค่าใช้จ่าย $0.06 + 0.83$ เท่ากับ 0.89 บาทต่อข้าว 1 กิโลกรัม

4.3 การเสริมธาตุเหล็กในแป้งข้าวเจ้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองเสริมธาตุเหล็กในแป้งข้าวเจ้า ชนิดไม่ผ่านการขัดสี โดยนำแป้งมาผสมกับสารประกอบเหล็ก ให้มีปริมาณเหล็กอย่างน้อย 4.41 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงขนาด 70 mesh จำนวน 4 ครั้ง สารประกอบเหล็กที่ใช้คือ เฟอร์รัสซัลเฟต (FS) เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต (FP) และไอร์ออนไกลซีน (IG) โดยมีแป้งที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กเป็น control

4.3.1 ผลการศึกษาอายุการเก็บของแป้งข้าวเจ้าเสริมธาตุเหล็ก

นำตัวอย่างแป้งเสริมธาตุเหล็กมาเก็บที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 เดือน ติดตามการเปลี่ยนแปลงของแป้งเสริมธาตุเหล็กโดยสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ความชื้น ปริมาณเหล็ก และวัดค่าสี (Lab) แล้วคำนวณดัชนีความขาว ทุก 1 เดือน และวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ทุก 2 เดือน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ แสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติของความชื้น ปริมาณเหล็ก

ค่าเปอร์ออกไซด์ และดัชนีความขาวของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาต่างๆ

SOV	ความชื้น	ปริมาณเหล็ก	ค่าเปอร์ออกไซด์	ดัชนีความขาว
ชนิดเหล็ก (A)	ns	**	**	*
ระยะเวลา (B)	ns	**	**	**
A x B	ns	ns	ns	ns

*แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

**แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ns ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$)

4.3.1.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้น

เมื่อนำข้อมูลปริมาณความชื้นของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่สุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ในแต่ละเดือน มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.20) พบว่า ชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บไม่มีผลต่อปริมาณความชื้นของแป้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) โดยปริมาณความชื้นของแป้งที่เสริมและไม่เสริมธาตุเหล็กอยู่ในระดับที่เหมาะสม มีค่าไม่เกินร้อยละ 13.0 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2529)

4.3.1.2 การเปลี่ยนแปลงปริมาณเหล็ก

ในงานวิจัยนี้ได้สุ่มตัวอย่างแบ่งมาวิเคราะห์ปริมาณเหล็กทุก 1 เดือน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนปริมาณเหล็กของแป้งเสริมธาตุเหล็ก (ตารางที่ 4.20) พบว่าชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บมีผลต่อปริมาณเหล็กของแป้งเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) ผลของชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บที่มีต่อปริมาณเหล็กแสดงในตารางที่ 4.21 และ 4.22

ตารางที่ 4.21 ผลของชนิดของเหล็กต่อปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ในแป้งเสริมธาตุเหล็ก

ชนิดของเหล็ก	ปริมาณเหล็ก*
Control	1.228 ^b
เฟอร์ริสซัลเฟต	5.054 ^a
เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต	5.147 ^a
ไอร์ออนไกลซีน	5.064 ^a

*ค่าเฉลี่ยปริมาณเหล็กจากการวิเคราะห์ 9 เดือน

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

จากตารางที่ 4.21 แป้งที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กมีปริมาณเหล็กน้อยกว่าแป้งที่เสริมธาตุเหล็ก และแป้งที่เสริมธาตุเหล็กทั้งสามชนิด มีปริมาณเหล็กไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p \geq 0.05$) เมื่อคิดปริมาณเหล็กของแป้งที่เสริมด้วยธาตุเหล็กทั้งสามชนิด ในหน่วยมิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำหนักเปียก พบว่าแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟต เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต และไอร์ออนไกลซีนมีปริมาณเหล็กเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ทั้ง 9 เดือน เท่ากับ 4.511 4.597 และ 4.525 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำหนักเปียก ตามลำดับ ซึ่งปริมาณเหล็กเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 4.41 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 4.22 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อปริมาณเหล็ก (มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำหนักแห้ง) ในแป้งเสริมธาตุเหล็ก

เดือน	ปริมาณเหล็ก
0	4.435 ^a
1	4.485 ^a
2	3.822 ^c
3	4.121 ^b
4	3.837 ^c
5	4.063 ^b
6	4.204 ^b
7	4.085 ^b
8	4.133 ^b
9	4.048 ^b

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ปริมาณเหล็กของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่ระยะเวลาการเก็บต่างๆ มีค่าระหว่าง 3.822-4.485 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม น้ำหนักแห้ง โดยปริมาณเหล็กในแป้งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่มีความคงทน ไม่ถูกทำลายด้วยความร้อน แสง oxidizing agent หรือในสภาวะที่มี pH สูงหรือต่ำมาก (Miller, 1996) ดังนั้นการที่ปริมาณเหล็กในแป้งที่วิเคราะห์ได้มีค่าแตกต่างกัน อาจมีสาเหตุมาจากความไม่สม่ำเสมอจากการกระจายตัวของธาตุเหล็กที่ผสมกับแป้ง มากกว่าการสูญเสียของธาตุเหล็ก Rubin, Emodi และ Scialpi (1977) รายงานว่า วิตามินและแร่ธาตุที่เสริมในแป้ง หลังจากเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 6 เดือน มีความเสถียร โดยแป้งยังคงมีปริมาณเหล็กร้อยละ 97-100 ของปริมาณเหล็กเริ่มต้น

4.3.1.3 การเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์

การติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งเสริมธาตุเหล็ก ทำได้โดยการสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ทุก 2 เดือน เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางที่ 4.20) พบว่า ชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บมีผลต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$) สำหรับผลของชนิดของเหล็กที่มีต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งเสริมธาตุเหล็ก แสดงในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq/kg) ของแป้งที่เสริมด้วยสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ

ชนิดของเหล็ก	ค่าเปอร์ออกไซด์*
Control	8.69 ^b
เฟอร์ริสซัลเฟต	12.10 ^a
เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต	8.90 ^b
ไอร์ออนไกลซีน	11.20 ^a

*ค่าเฉลี่ยของค่าเปอร์ออกไซด์ที่วิเคราะห์ทั้ง 9 เดือน

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.01$)

จากตารางที่ 4.23 แป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตมีค่าเปอร์ออกไซด์สูงสุดคือ 12.10 meq/kg แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) กับค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งที่เสริมด้วยไอร์ออนไกลซีน ที่มีค่าเท่ากับ 11.20 meq/kg ซึ่งไอร์ออนไกลซีนสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในแป้งได้เช่นเดียวกับเฟอร์ริสซัลเฟต เพราะเหล็กทั้งสองชนิดสามารถละลายน้ำได้ (Hurrell, 1999) ทำให้สามารถกระตุ้นให้เกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้งได้ ส่วนแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีค่าเปอร์ออกไซด์ 8.90 meq/kg ซึ่งไม่แตกต่างกับค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) เนื่องจากเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตไม่ละลายน้ำ จึงไม่กระตุ้นให้เกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้ง (Hurrell, 1999) Hurrell (1984, cited in Hurrell, 1997) ได้ศึกษาการเกิดเพนเทน (pentane) ของแป้งสาลี (precooked whole wheat flour) ที่มีการเติมสารประกอบเหล็กชนิดต่างๆ โดยให้มีปริมาณเหล็ก 15 มิลลิกรัมต่อแป้ง 100 กรัม ในระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งเพนเทนเกิดจากการเกิดออกซิเดชันของกรดลิโนเลอิก (linoleic acid) และการเกิดเพนเทนสัมพันธ์กับการเกิด off-flavor พบว่าแป้งสาลีที่เสริมด้วยเฟอร์ริสซัลเฟตและเฟอร์ริสกลูโคเนตมีเพนเทนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และไม่เป็นที่ยอมรับหลังจากเก็บไว้ 4-6 สัปดาห์ ส่วนแป้งสาลีที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตและรีดิวส์ไอร์ออนมีเพนเทนเกิดขึ้นน้อยกว่า โดยเพนเทนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับเพนเทนที่เกิดจากแป้งสาลีที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็ก และยังเป็นที่ยอมรับหลังจากเก็บไว้ 7 สัปดาห์

สำหรับผลของระยะเวลาการเก็บต่อค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งเสริมธาตุเหล็ก แสดงในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ค่าเปอร์ออกไซด์ (meq/kg) ของแป้งที่ระยะเวลาต่างๆ

เดือน	ค่าเปอร์ออกไซด์
0	5.62 ^e
1	6.91 ^d
3	9.30 ^c
5	11.51 ^b
7	11.84 ^b
9	16.15 ^a

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ (ตารางที่ 4.24) โดยเพิ่มขึ้นจาก 5.62 meq/kg เป็น 16.15 meq/kg เนื่องจากแป้งข้าวทำจากข้าวหักหรือปลายข้าว จึงมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับเมล็ดข้าว (Deobald, 1972) ดังนั้นไขมันในแป้งสามารถเกิดออกซิเดชันได้ ทำให้แป้งที่เก็บไว้มีค่าเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น

4.3.1.4 การเปลี่ยนแปลงดัชนีความขาว

จากการสุ่มตัวอย่างแป้งมาวัดค่าสี Lab ทุก 1 เดือน นำค่าสีที่วัดได้มาคำนวณดัชนีความขาว จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนดัชนีความขาวของแป้งเสริมธาตุเหล็ก (ตารางที่ 4.20) พบว่าชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บมีผลต่อดัชนีความขาวของแป้งเสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 4.25 และ 4.26

ตารางที่ 4.25 ผลของชนิดของเหล็กต่อดัชนีความขาวของแป้งเสริมธาตุเหล็ก

ชนิดของเหล็ก	ดัชนีความขาว*
Control	96.38 ^b
เฟอร์ริสซัลเฟต	96.36 ^b
เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต	96.49 ^a
ไฮดรอกไซด์อิน	96.34 ^b

*ค่าเฉลี่ยดัชนีความขาว 9 เดือน

a,b ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

แป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีค่าดัชนีความขาวสูงสุด ($p < 0.05$) เนื่องจากเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีสีเหลืองสว่าง ดังนั้นเมื่อเติมเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตลงในแป้ง จึงทำให้แป้งมีความสว่างมากขึ้น ส่งผลให้แป้งมีค่าดัชนีความขาวมากขึ้นตามไปด้วย สำหรับเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนสามารถเกิดออกซิเดชัน ทำให้แป้งที่เสริมด้วยเหล็กทั้งสองชนิดมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่าแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต เนื่องจากปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนที่เติมลงในแป้งมีปริมาณน้อยคือ 124.44 และ 199.70 มิลลิกรัมต่อแป้ง 1 กิโลกรัม ตามลำดับ ทำให้แป้งที่เสริมด้วยเหล็กสองชนิดมีค่าดัชนีความขาวไม่แตกต่างกับค่าดัชนีความขาวของแป้งที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็ก ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 4.26 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อดัชนีความขาวของแป้งเสริมธาตุเหล็ก

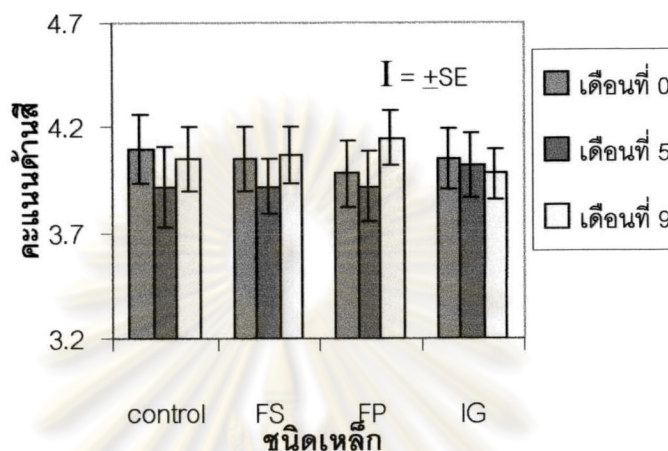
เดือน	ดัชนีความขาว
0	96.49 ^a
1	96.50 ^a
2	96.43 ^{ab}
3	96.54 ^a
4	96.44 ^{ab}
5	96.44 ^{ab}
6	96.39 ^{abc}
7	96.29 ^{bcd}
8	96.23 ^{cd}
9	96.16 ^d

a,b...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p < 0.01$)

ตัวอย่างแป้งที่ระยะเวลาการเก็บต่างๆ มีค่าดัชนีความขาวอยู่ในช่วง 96.16 ถึง 96.54 (ตารางที่ 4.26) โดยแป้งที่เก็บไว้มีสีเหลืองเพิ่มขึ้น ทำให้ดัชนีความขาวมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากแป้งมีองค์ประกอบทางเคมีเหมือนกับเมล็ดข้าว (Deobald, 1972) ดังนั้นจึงควรมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์เหมือนกับเมล็ดข้าว ซึ่ง Chrastil (1990) พบว่าข้าวที่เก็บไว้เป็นเวลา 10 เดือน มีค่าสีเหลืองเพิ่มขึ้น มีผลให้เมล็ดข้าวมีความขาวลดลง การเปลี่ยนแปลงสีในระหว่างการเก็บของเมล็ดข้าว มีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Maillard's nonenzymic browning) ของกรดอะมิโนและคาร์โบไฮเดรต (Chrastil, 1994)

4.3.2 ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของแป้งเสริมธาตุเหล็ก

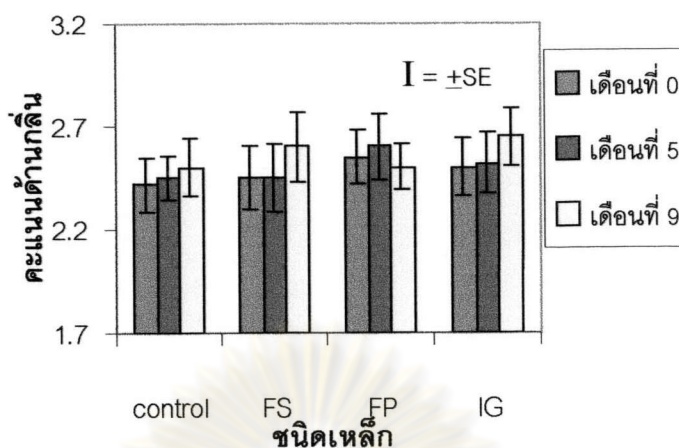
ผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้านสีของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่เก็บไว้เป็นระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 20 คน แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 คะแนนทางด้านสีของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่เก็บไว้ที่ระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 3 (ค้ำหรือเหลืองจางๆ) ถึง 5 (ขาวจัด)

คะแนนทางด้านสีของแป้งเสริมธาตุเหล็กชนิดต่างๆ ที่ระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) (รูปที่ 4.11) ในขณะที่เมื่อทำการวัดค่าสีแล้วคำนวณดัชนีความขาว พบว่า มีความแตกต่างของค่าดัชนีความขาว เนื่องจากชนิดของเหล็กและระยะเวลาการเก็บ (ผลการทดลองข้อ 4.3.1.4) อาจมีสาเหตุมาจากปริมาณเหล็กที่เติมลงในแป้งมีปริมาณน้อย โดยเติมเฟอร์ริซัลเฟต เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต และไอร์ออนไกลซีนในปริมาณเท่ากับ 124.44 157.94 และ 199.70 มิลลิกรัมต่อแป้ง 1 กิโลกรัม และค่าดัชนีความขาวของแป้งมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาการเก็บเพียงเล็กน้อย มีค่าในระหว่าง 96.16 ถึง 96.54 จึงมีผลให้ผู้ทดสอบไม่สามารถแยกความแตกต่างด้านสีของแป้งเนื่องจากชนิดของเหล็ก และระยะเวลาการเก็บได้

สำหรับผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสทางด้านกลิ่นของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่เก็บไว้ที่ระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 คะแนนด้านกลินของแป้งเสริมธาตุเหล็กที่เก็บไว้ที่ระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 2 (กลินปกติ) ถึง 3 (กลิน همینอัปเล็กน้อย)

จากรูปที่ 4.12 พบว่าไม่มีความแตกต่างทางด้านกลินของแป้งเสริมธาตุเหล็กชนิดต่างๆ ที่เก็บไว้ที่ระยะเวลา 0 5 และ 9 เดือน ($p \geq 0.05$) ถึงแม้ว่าจากการวิเคราะห์ค่าเปอร์ออกไซด์ (ข้อ 4.3.1.3) พบว่า แป้งที่เสริมด้วยเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีค่าเปอร์ออกไซด์มากกว่าแป้งที่ไม่เสริมธาตุเหล็กและแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟต รวมทั้งค่าเปอร์ออกไซด์ของแป้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ เนื่องจากค่าเปอร์ออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้นั้น มีค่าไม่เกิน 20 meq/kg จึงทำให้ผู้ทดสอบไม่สามารถแยกความแตกต่างทางด้านกลิน همینอัปที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของไขมันในแป้งได้ (Low และ Ng, 1987)

4.3.3 คุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าเสริมธาตุเหล็ก

4.3.3.1 องค์ประกอบของเส้นก๋วยเตี๋ยว

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก ความชื้น และวัตค่าสี (Lab) ของเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผลิตจากแป้งเสริมธาตุเหล็ก จำนวน 3 ซ้ำ ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 องค์ประกอบ*ของเส้นก๋วยเตี๋ยวเสริมธาตุเหล็ก

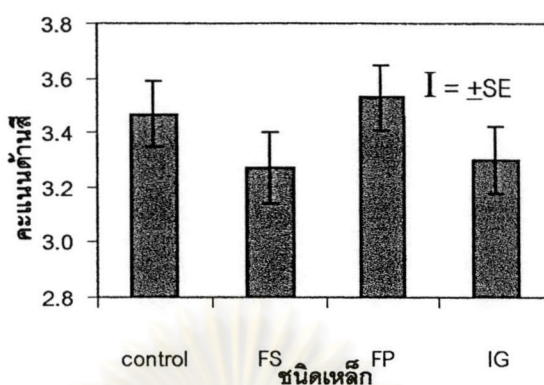
ตัวอย่าง	ปริมาณเหล็ก (mg/100g dsb)		L	a	b	White index	ความชื้น (%)
	แป้ง	เส้นก๋วยเตี๋ยว					
Control	1.199±0.019	1.195±0.007	45.51±2.59	-1.12±0.34	+7.05±1.23	45.03±2.43	10.53±0.03
FS	5.220±0.053	5.112±0.033	44.24±2.56	-0.75±0.37	+5.21±0.26	43.99±2.56	10.34±0.06
FP	5.291±0.144	5.057±0.085	46.17±2.41	-0.89±0.30	+5.72±0.46	45.86±2.38	10.31±0.03
IG	4.836±0.286	4.812±0.181	44.41±2.13	-0.71±0.39	+4.74±0.92	44.20±2.12	10.21±0.08

*ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.27 เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้มีปริมาณเหล็กใกล้เคียงกับปริมาณเหล็กในแป้ง แสดงว่าไม่มีการสูญเสียเหล็กไปในขั้นตอนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว เนื่องจากธาตุเหล็กเป็นแร่ธาตุที่มีความคงทน (Miller, 1996) จึงไม่ถูกทำลายในระหว่างกระบวนการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว เมื่อวัดค่าสีของเส้นก๋วยเตี๋ยว พบว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวทุกตัวอย่างมีค่าสี (Lab) และค่าดัชนีความขาวใกล้เคียงกัน โดยเส้นก๋วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีค่าความสว่าง (L) และค่าดัชนีความขาวมากที่สุด อาจเนื่องจากสารประกอบเหล็กชนิดนี้มีสีเหลืองสว่าง และไม่ละลายน้ำ ทำให้เมื่อนำแป้งที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมาผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว เฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตยังคงมีสีเหลืองสว่างเหมือนเดิม เส้นก๋วยเตี๋ยวที่ได้จึงมีค่าดัชนีความขาวมากกว่าเส้นก๋วยเตี๋ยวตัวอย่างอื่น ส่วนเฟอร์รัสซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนสามารถเกิดออกซิเดชัน ทำให้ ferrous iron เป็น ferric iron (Miller, 1996) ซึ่งมีสีน้ำตาล ทำให้เส้นก๋วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยสารประกอบเหล็กทั้งสองชนิดมีค่าดัชนีความขาวน้อยกว่าตัวอย่างอื่น เส้นก๋วยเตี๋ยวทุกตัวอย่างมีปริมาณความชื้นเหมาะสม ไม่เกินร้อยละ 12.0 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2533)

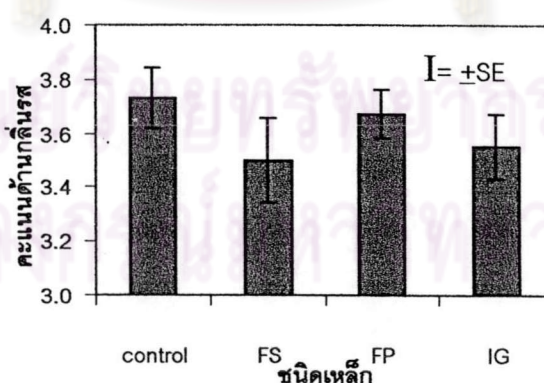
4.3.3.2 ผลการประเมินคุณภาพของเส้นก๋วยเตี๋ยวเสริมธาตุเหล็ก

นำแป้งเสริมธาตุเหล็กทุกตัวอย่างมาผลิตก๋วยเตี๋ยวเส้นเล็กแห้ง จากนั้นประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสุกตามมาตรฐาน มอก.959-2533 โดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นก๋วยเตี๋ยวสุกทางด้านสี กลิ่นรส ลักษณะเนื้อ และความชอบโดยรวม แสดงในรูปที่ 4.13, 4.14, 4.15 และ 4.16

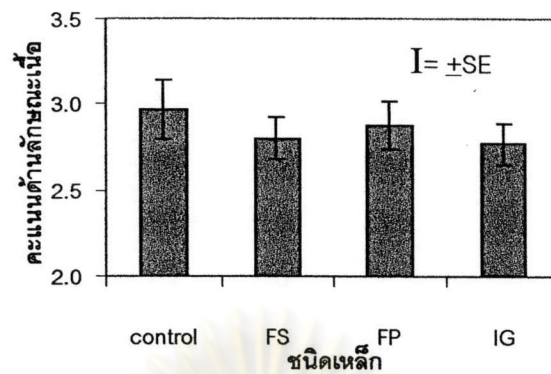


รูปที่ 4.13 คะแนนทางด้านสีของเส้นก๊วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ
คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 3 (สีขาวนวลค่อนข้างเหลืองเล็กน้อย) ถึง 4 (สีขาวนวล
สม่ำเสมอ)

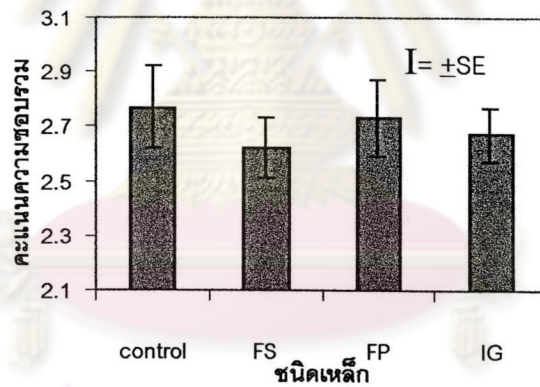
เส้นก๊วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยเฟอร์ริซัลเฟตและไอร์ออนไกลซีนมีคะแนนเฉลี่ยทางด้านสีน้อยกว่าเส้นก๊วยเตี๋ยวตัวอย่างอื่น (รูปที่ 4.13) ในขณะที่เส้นก๊วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยเฟอร์ริกไพโรฟอสเฟตมีคะแนนด้านสีมากที่สุด สอดคล้องกับค่าความสว่างและดัชนีความขาวของเส้นก๊วยเตี๋ยวดิบ แต่เส้นก๊วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยธาตุเหล็กทั้งสามชนิดมีคะแนนทางด้านสีไม่แตกต่างกับเส้นก๊วยเตี๋ยวที่ไม่ได้เสริมธาตุเหล็กอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)



รูปที่ 4.14 คะแนนทางด้านกลิ่นรสของเส้นก๊วยเตี๋ยวที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ
คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 3 (มีกลิ่นรสแปลกไปจากธรรมชาติเพียงเล็กน้อย) ถึง 4 (มีกลิ่นรสดีตามธรรมชาติ)



รูปที่ 4.15 คะแนนทางด้านลักษณะเนื้อของเส้นก้วยเดี่ยวที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 2 (นิ่มเหนียวพอใช้ เกาะติดกันจนเห็นได้ชัด) ถึง 3 (นิ่มเหนียว เกาะติดกันเล็กน้อย)



รูปที่ 4.16 คะแนนทางด้านความชอบรวมของเส้นก้วยเดี่ยวที่เสริมด้วยธาตุเหล็กชนิดต่างๆ คะแนนที่ได้อยู่ในช่วง 2 (ชอบเล็กน้อย) ถึง 3 (ชอบปานกลาง)

เส้นก้วยเดี่ยวสุกที่ทำจากแป้งที่เสริมและไม่ได้เสริมธาตุเหล็ก มีคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสทางด้านกลิ่นรส ลักษณะเนื้อ และความชอบรวมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) (รูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16)

4.4 การเสริมธาตุเหล็กร่วมกับไอโอดีนในเมล็ดข้าว

Hurrell (1997c) รายงานว่า ในประเทศกำลังพัฒนามักจะพบภาวะการขาดธาตุเหล็กในพื้นที่ที่มีการขาดไอโอดีน ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงทดลองเสริมธาตุเหล็กและไอโอดีนในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ให้มีปริมาณเหล็ก 3.33 มิลลิกรัมต่อข้าว 100 กรัม (2 ใน 3 ของ RDA) และไอโอดีน 50 ไมโครกรัมต่อข้าว 100 กรัม (RDA) ชนิดของเหล็กและไอโอดีนที่ใช้คือ เฟอร์รัสซัลเฟตและโพแทสเซียมไอโอเดต สารเคลือบที่ใช้คือ เจลแป้งข้าวเจ้า ความเข้มข้นร้อยละ 3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยใช้อัตราส่วนเจลแป้งข้าวต่อข้าวคือ 5:100 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณเหล็ก ปริมาณไอโอดีน วัดค่าสี (Lab) แล้วคำนวณดัชนีความขาวผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 องค์ประกอบของข้าวเสริมธาตุเหล็กร่วมกับไอโอดีน

องค์ประกอบ	ปริมาณที่วัดได้*
ความชื้น (%)	11.74±0.02
ปริมาณเหล็ก (mg/100 g)	3.298±0.086
ปริมาณไอโอดีน (µg/100 g)	44.80±2.95
L	63.76±0.51
a	-1.40±0.03
b	+8.35±0.55
ดัชนีความขาว	62.78±0.50

*ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

จากตารางที่ 4.28 ข้าวเสริมธาตุเหล็กและไอโอดีนที่เคลือบได้มีปริมาณเหล็กและไอโอดีน 3.238 มิลลิกรัม และ 44.80 ไมโครกรัมต่อข้าว 100 กรัม แสดงว่ามีความเป็นไปได้ในการเสริมธาตุเหล็กร่วมกับไอโอดีนบนเมล็ดข้าวด้วยวิธีการเคลือบด้วยเจลแป้งข้าวได้ โดยไม่มีผลขัดแย้งกัน ข้าวที่เคลือบได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 11.74 ซึ่งเป็นระดับความชื้นที่เหมาะสม (ไม่เกินร้อยละ 14) มีค่าความสว่าง (L) เท่ากับ 63.76 ค่าสีเหลือง (b) เท่ากับ +8.35 และค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 62.78 จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าเมล็ดข้าวมีลักษณะเป็นสีขาวเหลือง ทำให้มีค่า b เป็นบวก และค่า a (สีแดง) เป็นลบ

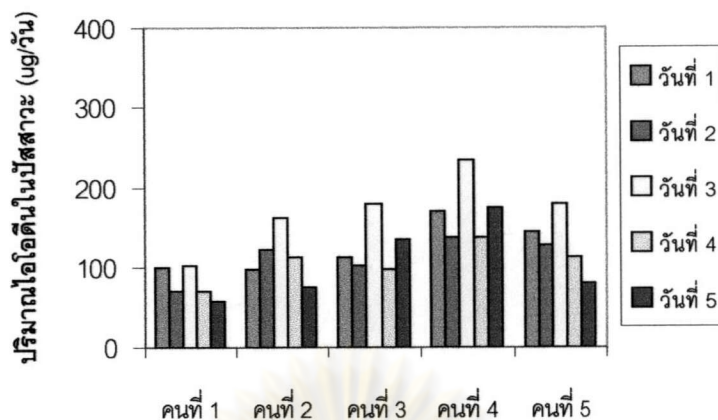
4.5 ประสิทธิภาพการดูดซึมของข้าวเสริมไอโอดีน

ไอโอดีนเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญต่อร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบในการสังเคราะห์ thyroxine (T4) และ triiodothyronine (T3) ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการเผาผลาญสารอาหารเพื่อให้พลังงานแก่ร่างกาย และเป็นฮอร์โมนที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต (ปราณีต ผ่องแผ้ว, 2539) ในภาวะปกติ ร่างกายจะมีปริมาณไอโอดีน 15-20 มิลลิกรัม โดยไอโอดีนนี้จะอยู่ในต่อมธัยรอยด์ร้อยละ 70-80 ของปริมาณไอโอดีนทั้งหมดที่มีในร่างกาย (Hurrell, 1997c)

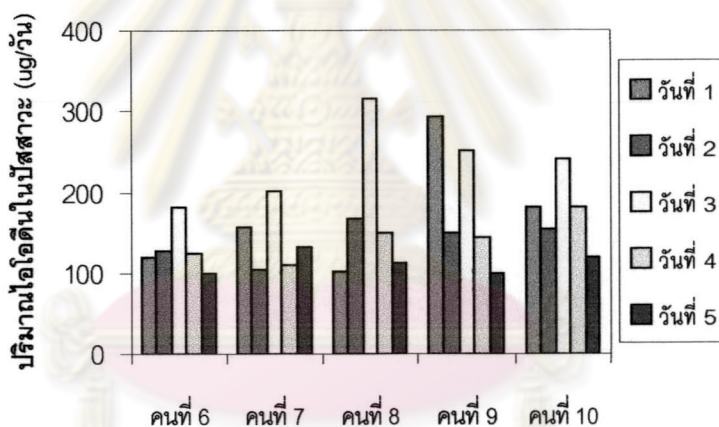
ไอโอดีนในอาหารส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป inorganic iodide ซึ่งจะถูดูดซึมในระบบทางเดินอาหารเข้าสู่ร่างกาย สำหรับไอโอดีนในรูปแบบอื่นจะถูกรีดิวส์ให้เป็นไอโอดิดก่อนถูกดูดซึม ร่างกายจะนำไอโอดีนที่ถูดูดซึมนี้ออกไปสร้างธัยรอยด์ฮอร์โมน สำหรับไอโอดีนส่วนที่เหลือจะถูกขับออกจากร่างกายผ่านทางไตในรูปปัสสาวะ (Hurrell, 1997c) โดยปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะเท่ากับร้อยละ 85-90 ของปริมาณไอโอดีนที่ถูดูดซึม (Lamberg, 1993)

Bioavailability iodine คือ ปริมาณไอโอดีนที่ถูดูดซึมจากอาหารเข้าสู่ร่างกาย แล้วถูกนำไปใช้สร้างธัยรอยด์ฮอร์โมน (Hurrell, 1998) ซึ่งการวัดปริมาณไอโอดีนที่ถูกขับออกมาทางปัสสาวะ เป็นอีกวิธีหนึ่งในการวัดประสิทธิภาพการดูดซึมไอโอดีนในร่างกาย โดยถือว่าองค์ประกอบของอาหารที่รับประทาน ไม่มีผลต่อการนำไอโอดีนไปใช้สร้างธัยรอยด์ฮอร์โมน (Hurrell, 1997c)

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดูดซึมไอโอดีนของข้าวเสริมไอโอดีน โดยการวัดปริมาณไอโอดีนที่ถูกขับถ่ายออกมาทางปัสสาวะ ก่อนทำการวิจัยได้มีการคัดเลือกผู้เข้าร่วมโครงการที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามที่กำหนด (ข้อ 3.5.2) เพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดลองอันเนื่องมาจากปัจจัยความแตกต่างของผู้เข้าร่วมโครงการให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และกำหนดชนิดของอาหารที่รับประทานทั้งห้าวันเหมือนกัน ยกเว้นในวันที่สาม อาสาสมัครได้รับประทานข้าวเสริมไอโอดีนแทนข้าวที่ไม่ได้เสริมไอโอดีน เพื่อลดความแปรปรวนของผลการทดลองอันเนื่องมาจากชนิดของอาหารที่รับประทาน เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดมีปริมาณไอโอดีนไม่เท่ากัน ซึ่งมีผลต่อการดูดซึมไอโอดีนเข้าสู่ร่างกาย และปริมาณไอโอดีนที่ถูกขับออกมาทางปัสสาวะ สำหรับผลการทดลองปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะของผู้เข้าร่วมโครงการเพศหญิง 5 ราย และเพศชาย 5 ราย แสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะของผู้เข้าร่วมโครงการเพศหญิง



รูปที่ 4.18 ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะของผู้เข้าร่วมโครงการเพศชาย

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 ปริมาณไอโอดีนที่ถูกขับออกมาทางปัสสาวะของผู้เข้าร่วมโครงการแต่ละรายมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากปริมาณอาหารที่รับประทานไม่เท่ากัน ทำให้มีปริมาณไอโอดีนที่ร่างกายดูดซึมและขับออกมาทางปัสสาวะไม่เท่ากัน โดยผู้ที่ได้รับไอโอดีนในปริมาณมาก ร่างกายจะมีการขับไอโอดีนออกมาทางปัสสาวะเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน ซึ่ง Nath et al. (1992, cited in Hurrell, 1998) ได้ทดลองให้อาสาสมัครผู้ใหญ่จำนวน 12 ราย รับประทานอาหารที่มีการเติมเกลือเสริมไอโอดีน (มีไอโอดีน 12 ไมโครกรัมต่อเกลือ 1 กรัม) ในปริมาณต่างๆ พบว่าเมื่อไม่มีการเติมเกลือเสริมไอโอดีนในอาหาร ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะของอาสาสมัครเป็น 110

ไมโครกรัมต่อวัน เมื่อมีการเติมเกลือเสริมไอโอดีนจำนวน 3 กรัม ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะเพิ่มขึ้นเป็น 150 ไมโครกรัมต่อวัน และเมื่อมีการเติมเกลือเสริมไอโอดีนเพิ่มขึ้นเป็น 6 และ 9 กรัม ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะเพิ่มขึ้นเป็น 180 และ 205 ไมโครกรัมต่อวัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับเมื่อพิจารณาปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะ 5 วัน ของอาสาสมัครแต่ละราย พบว่า ปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะในวันที่ 3 ซึ่งอาสาสมัครได้รับประทานข้าวเสริมไอโอดีน มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าวันอื่น แสดงว่า ร่างกายสามารถดูดซึมไอโอดีนที่เสริมในข้าวเสริมไอโอดีนไปใช้ได้ดี สำหรับในอาสาสมัครรายที่ 1 และ 9 มีปริมาณไอโอดีนในปัสสาวะในวันที่ 1 ใกล้เคียงหรือมากกว่าในวันที่ 3 อาจเนื่องมาจาก อาสาสมัครทั้งสองรายนี้อาจรับประทานอาหารที่มีไอโอดีนสูง ทำให้มีการดูดซึมไอโอดีนเข้าสู่ร่างกาย และร่างกายอาจขับไอโอดีนออกมาไม่หมด จึงมีไอโอดีนตกค้างในร่างกาย และถูกขับออกมาทางปัสสาวะในวันที่ 1 ของการทดลอง เป็นผลให้ปริมาณไอโอดีนที่วัดได้มีค่าสูง



ศูนย์วิจัยทรัพยากรชีว
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย