ผลของการฉายรังสีแกมมาและสภาวะบรรจุต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพและคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว

EFFECTS OF GAMMA IRRADIATION AND PACKING CONDITIONS ON CHEMICAL, PHYSICAL PROPERTIES AND COOKING QUALITIES OF LOW AMYLOSE BROWN RICE, HIGH AMYLOSE RICE AND WAXY RICE

สุรศักดิ์ สัจจบุตร

SURASAK SAJJABUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ผลของการฉายรังสีแกมมาและสภาวะบรรจุต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพและคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว

EFFECTS OF GAMMA IRRADIATION AND PACKING CONDITIONS ON CHEMICAL, PHYSICAL PROPERTIES AND COOKING QUALITIES OF LOW AMYLOSE BROWN RICE , HIGH AMYLOSE RICE AND WAXY RICE

สุรศักดิ์ สัจจบุตร

SURASAK SAJJABUT

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....74474
วัน,เดือน,ปี.....- 1 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

EFFECTS OF GAMMA IRRADIATION AND PACKING CONDITIONS ON CHEMICAL, PHYSICAL PROPERTIES AND COOKING QUALITIES OF LOW AMYLOSE BROWN RICE , HIGH AMYLOSE RICE AND WAXY RICE

SURASAK SAJJABUT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการฉายรังสีแกมมาและสภาวะบรรจุต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว

Effects of Gamma Irradiation and Packing Conditions on Chemical, Physical Properties and Cooking Qualities of Low Amylose Brown Rice, High Amylose Rice and Waxy Rice

ชื่อนักศึกษา นายสุรศักดิ์ สัจจบุตร

รหัสประจำตัว 45067002

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์การอาหาร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ระติพร หาเรือนกิจ	
รศ.ดร.กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์	
ดร.จารุณีย์ ทองผาสุก	
ผศ.ดร.พอใจ ถามากร	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 28 พฤษภาคม 2550 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้องสัมมนา D 213 อาคารเจ้าคุณทหาร

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ๑๗ **เดือน** กรกฎาคม **พ.ศ.** ๒๕๕๐

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการฉายรังสีแกมมาและสภาวะบรรจุต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว
นักศึกษา	นายสุรศักดิ์ สัจจบุตร
รหัสประจำตัว	45067002
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ดร. กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์

บทคัดย่อ

คะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวทั้ง 3 ชนิดที่ฉายรังสีอยู่ในเกณฑ์ชอบแม้จะเก็บรักษาไว้นาน 6 เดือนจากการศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติทางเคมีได้แก่ปริมาณอะไมโลส ค่า TBA และปริมาณกรดไขมันอิสระ คุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าสีเหลือง ความหนืด ความแข็ง และการพองตัวจากการทอด คุณภาพการหุงต้ม และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าว 3 ชนิด คือข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว โดยบรรจุข้าวกล้องแบบสุญญากาศ ส่วนข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวมีสภาวะบรรจุทั้งแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ตัวอย่างควบคุมไม่ฉายรังสีและฉายรังสีในปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าข้าวกล้องอะไมโลสต่ำฉายรังสีมีค่าสีเหลือง ความหนืด ความแข็ง และคุณภาพการหุงต้มแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และผู้ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องที่ฉายรังสีน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ พบว่าสภาวะบรรจุไม่มีผลต่อคุณภาพที่ทดสอบทั้งหมดของทั้งข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ข้าวอะไมโลสสูงฉายรังสีมีค่าสีเหลือง ความหนืด ความแข็ง และคุณภาพการหุงต้มแตกต่างจากข้าวไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คะแนนความชอบด้านสีและรสชาติของข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีจะน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่คะแนนด้านกลิ่นของข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีและตัวอย่างควบคุมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนเนื้อสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูงฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ได้คะแนนความชอบมากกว่าตัวอย่างควบคุมและข้าวที่ฉายรังสีปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนข้าวเหนียวฉายรังสีมีค่าสีเหลือง ความหนืด และคุณภาพการหุงต้มแตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนคะแนนความชอบด้านสีและรสชาติของข้าวเหนียวฉายรังสีน้อยกว่าตัวอย่างควบคุม แต่คะแนนด้านกลิ่นและเนื้อสัมผัสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบให้คะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวทั้ง 3 ชนิดที่ฉายรังสีอยู่ในเกณฑ์ชอบแม้จะเก็บรักษาไว้นาน 6 เดือน

Thesis Title	Effects of Gamma Irradiation and Packing Conditions on Chemical, Physical Properties and Cooking Qualities of Low Amylose Brown Rice , High Amylose Rice and Waxy Rice
Student	Mr. Surasak Sajjabut
Student ID.	45067002
Degree	Master of Science
Programme	Food Science
Year	2007
Thesis Advisor	Associate. Professor. Dr. Kittiphong Huangrak

ABSTRACT

Studies on the effects of gamma radiation on chemical properties, i.e, amylose content, TBA values and free fatty acid content, on physical properties, i.e, yellowness, paste viscosity, hardness and frying expansion, cooking quality and on sensory qualities of three kinds of rice, i.e, low amylose brown rice, high amylose rice and waxy rice were done. The low amylose brown rice was packed in vacuum condition, and the high amylose and waxy rice were packed in both vacuum and non-vacuum conditions. Control sample and irradiated samples at the dosage of 1, 2 and 3 kGy were stored for 6 months at room temperature. The yellowness, paste viscosity, hardness and cooking qualities of irradiated low amylose brown rice were significantly different from control brown rice. On sensory evaluation, the scores for color, odor, taste and texture of the irradiated brown rice were significantly lower than control samples. The packing conditions did not affect any changes in high amylose and waxy rice. The yellowness, paste viscosity, hardness and cooking qualities of irradiated high amylose rice were significantly different from those of control rice. The scores for color and taste of the irradiated high amylose rice were significantly lower than those of control samples but there was no significantly difference on the odor scores. The texture of 1 kGy irradiated high amylose rice got significantly higher scores than the control and the 2 and 3 kGy irradiated samples. It was also found that the yellowness, paste viscosity and cooking qualities of irradiated waxy rice were significantly different from control waxy rice. The scores for color and taste of the irradiated waxy rice were significantly lower than those of control samples but there was no significantly difference on the odor and texture scores. However the scores of all 3-irradiated rice samples were at the level "prefer" although they were stored for 6 months.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษารศ.ดร.กิตติพงษ์ ห่วงรักษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ระติพร หาเรือนกิจ ผศ.ดร พอใจ ถามากร และ ดร.จารุณีย์ ทองผาสุก ที่ได้ให้เกียรติร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งกรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณแหล่งทุนการศึกษากระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์การอาหารให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณอาจารย์ศิริมา วรรณรังษี และอาจารย์วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาลัยเขตโชติเวช ในการให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องวัดความหนืดและให้คำปรึกษา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ช่างเทคนิค เจ้าหน้าที่คอมพิวเตอร์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตรทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ น้อง ๆ ปริญญาโทและปริญญาตรีสถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือการวิจัยนี้

สุดท้าย สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

สุรศักดิ์ สัจจบุตร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VII

สารบัญรูป X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 ชนิดของรังสีที่อนุญาตให้ใช้กับอาหาร 3

2.2 การทำความเข้าใจเกี่ยวกับอาหารฉายรังสี 4

2.2.1 การเหนี่ยวนำทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสี 4

2.2.2 ความเป็นพิษและการก่อมะเร็ง 5

2.3 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีอาหาร 5

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี 5

2.3.1.1 ผลของรังสีที่มีต่อน้ำ 5

2.3.1.2 ผลของรังสีที่มีต่อคาร์โบไฮเดรต 6

2.3.1.3 ผลของรังสีที่มีต่อโปรตีน 9

2.3.1.4 ผลของรังสีที่มีต่อไขมัน 10

2.3.1.5 ผลของรังสีที่มีต่อวิตามิน 11

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัส 11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 ข้าว 12

2.4.1 การจำแนกชนิดของข้าว 12

2.4.2 ข้าวกล้อง 13

2.4.3 โครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้อง 14

2.5 คุณภาพทางเคมีและกายภาพของข้าว 15

2.5.1 สตาร์ช 15

2.5.2 ไขมัน 15

2.5.3 ความหนืด 16

2.5.4 อุณหภูมิการเกิดเจล 17

2.5.5 การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก 18

2.5.6 ความคงตัวของแป้งสุก 18

2.5.7 การเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชข้าวและข้าวหุงสุก 19

2.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา 19

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงของโปรตีน 21

2.6.2 การเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรต 21

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงของไขมัน 22

2.6.4 การเปลี่ยนแปลงกลิ่นและรสชาติ 23

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ 25

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 25

3.1.1 เครื่องมือ 25

3.1.2 วัตถุดิบ 25

3.1.3 อุปกรณ์ 26

3.2 สถานที่ดำเนินงาน 26

3.3 วิธีการดำเนินงาน 26

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 29

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำฉายรังสีและไม่ฉายรังสี 29

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูงฉายรังสีและไม่ฉายรังสี 57

4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวฉายรังสีและไม่ฉายรังสี 82

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 101

บรรณานุกรม 103

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. วิธีวิเคราะห์ 109

ภาคผนวก ข. แบบทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส 117

ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง 118

ภาคผนวก ง. รูปประกอบการทดลอง 119

ประวัติผู้เขียน 120

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การจำแนกชนิดของข้าวตามปริมาณอะไมโลส 12

2.2 ปริมาณสารอาหารของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว 13

2.3 องค์ประกอบทางเคมีในชั้นต่าง ๆ ของเมล็ดข้าว 20

2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของข้าวในระหว่างการเก็บรักษา 24

4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง 29

4.2 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง 30

4.3 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง 32

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวกล้อง 35

4.5 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวกล้อง 36

4.6 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวกล้อง 37

4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง 38

4.8 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง 39

4.9 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง 40

4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของความแข็งของข้าวสุกจากข้าวกล้อง 46

4.11 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวกล้อง 46

4.12 ผลของระยะเวลาการเก็บรักษาต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวกล้อง 47

4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวกล้อง 48

4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง 49

4.15 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง 50

4.16 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง 51

4.17 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกอุ่น ในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 54

4.18 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกเย็น ในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 55

4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวอะไมโลสสูง 57

4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวอะไมโลสสูง 59

4.21 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารอะไมโลสสูง 60

4.22 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวอะไมโลสสูง 61

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง 62

4.24 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง 63

4.25 ผลของระยะเวลาการเก็บต่อค่าความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง 64

4.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความแข็งของข้าวอะไมโลสสูง 70

4.27 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อค่าความแข็งของข้าวอะไมโลสสูง 71

4.28 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความแข็งของข้าวอะไมโลสสูง 72

4.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวอะไมโลสสูง 74

4.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง 75

4.31 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง 76

4.32 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง 77

4.33 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูง หุงสุกอุ่นในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 79

4.34 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูง หุงสุกเย็นในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 80

4.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวเหนียว 82

4.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวเหนียว 84

4.37 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารและข้าวสุกจากข้าวเหนียว 85

4.38 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารและข้าวสุกจากข้าวเหนียว 86

4.39 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวเหนียว 87

4.40 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อความหนืดของข้าวเหนียว 88

4.41 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุก 89

4.42 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุก 90

4.43 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวเหนียว 92

4.44 การวิเคราะห์ความแปรปรวนคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว 93

4.45 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว 94

4.46 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว 96

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.47 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวหุงสุกอุ่น ในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 98

4.48 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวหุงสุกเย็น ในแต่ละเดือนของระยะเวลาเก็บ 99

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับอาหาร 4

2.2 ผลของการฉายรังสีกลูโคส 8

2.3 ภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว 14

2.4 กลิ่นหืนของข้าวที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชัน 15

2.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA 16

2.6 ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่างๆ 22

2.7 การเพิ่มขึ้นของกลิ่นไม่ดี (off odor) ในข้าวขัดขาวระหว่างการเก็บรักษา 23

4.1 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณอะไมโลส ของข้าวกล้อง 33

4.2 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ ของข้าวกล้อง 34

4.3 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุด ของข้าวกล้อง 42

4.4 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อเวลาที่ทำให้เกิด ความหนืดสูงสุดของข้าวกล้อง 43

4.5 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้ง แตกตัวของข้าวกล้อง 44

4.6 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวของข้าวกล้อง 45

4.7 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการดูดซึมน้ำของข้าวกล้อง 53

4.8 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณของแข็ง ที่ละลายได้ของข้าวกล้อง 53

4.9 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุดของ ข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 67

4.10 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุดของ ข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 67

4.11 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้ง แตกตัวของข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.12 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 68

4.13 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 69

4.14 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 69

4.15 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 73

4.16 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 73

4.17 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 91

4.18 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 91

4.19 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อเวลาต้มสุกของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ 97

4.20 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อเวลาต้มสุกของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ 97

ภาคผนวก ง. 1 รูปการบรรจุแบบสุญญากาศของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว 119

ภาคผนวก ง. 2 รูปการบรรจุแบบมีอากาศของข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียว 119

ภาคผนวก ง. 3 รูปการจัดตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส 119

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประชากรในประเทศไทยนั้นโดยส่วนใหญ่บริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก โดยข้าวที่นิยมบริโภคส่วนใหญ่จะเป็นข้าวขัดขาว ซึ่งเป็นข้าวที่ได้ผ่านการขัดสีหลายครั้ง จนเยื่อหุ้มเมล็ดและจมูกข้าวหลุดออกไปเหลือแต่เอนโดสเปิร์ม (endosperm) ของข้าว ซึ่งทำให้คุณค่าทางโภชนาการสูญเสียไป ในปัจจุบันนี้ผู้คนได้หันมาใส่ใจในสุขภาพกันมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการออกกำลังกายหรือการเลือกบริโภคอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ดังนั้นจึงมีผู้บริโภคบางส่วนได้หันมารับประทานข้าวกล้องกันมากขึ้นเพราะข้าวกล้องเป็นข้าวที่มีการกะเทาะเปลือกออกโดยไม่มีการขัดสี ข้าวที่ได้จึงมีสารอาหารต่าง ๆ ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงกว่าข้าวขัดขาว แต่การบริโภคข้าวกล้องยังอยู่ในวงจำกัดเนื่องจากข้าวกล้องมีจุดด้อยหลายประการ เช่น ข้าวกล้องเมื่อผ่านการหุงต้มจะมีความแข็งกว่าข้าวขาวและต้องใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่า ข้าวกล้องเมื่อเก็บรักษาไว้จะเป็นมอดมากกว่าปกติและความแข็งของข้าวจะยิ่งเพิ่มขึ้น ในข้าวอะไมโลสสูงก็พบปัญหาเช่นเดียวกัน จึงคิดจะมีการศึกษาการใช้รังสีแกมมากับข้าวเพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมา โดยศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของข้าวที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่าง ๆ ผลพลอยได้ในการฉายรังสีแกมมาคือการกำจัดแมลง นอกจากนั้นการใช้รังสีอาจทำให้ความแข็งของข้าวลดลงได้เนื่องจากการคืนตัวของสตาร์ชที่ผ่านการฉายรังสีเกิดขึ้นได้น้อยลง Sabularse และคณะ (1992) ได้ทดลองฉายรังสีข้าวแล้วนำแป้งจากข้าวนั้นไปวัดค่าความหนืด พบว่าค่าความหนืดสูงสุดและค่าคืนตัวของแป้งจากข้าวฉายรังสีต่ำกว่าแป้งจากข้าวที่ไม่ฉายรังสี จึงเป็นไปได้ว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสีจะมีความแข็งน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสี

ส่วนข้าวเหนียวนิยมบริโภคกันโดยทั่วไปโดยเฉพาะภาคเหนือและตะวันออกเฉียงเหนือ โดยการรับประทานข้าวเหนียวนั้นมักจะรับประทานขณะยังอุ่นอยู่เนื่องจากมีความนุ่มแต่เมื่อตั้งทิ้งไว้จนข้าวเหนียวเย็นตัวลงหรือเก็บในตู้เย็นจะมีความแข็งทำให้ความน่ารับประทานลดลง การนำข้าวเหนียวมาฉายรังสีแกมมาอาจทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวน้อยลง Wu และคณะ (2002) ได้ทดลองฉายรังสีแกมมาข้าวเหนียวแล้วนำไปวัดค่าความหนืด พบว่าค่าคืนตัวของแป้งจากข้าวเหนียวที่ฉายรังสีมีน้อยกว่าของข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสี จากเหตุนี้เองจึงคาดการณ์ว่าข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีเมื่อตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องหรือตู้เย็นเป็นเวลานานจะมีความนุ่มมากกว่าข้าวเหนียวที่ไม่มีการฉายรังสี

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของรังสีแกมมาในปริมาณต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียว

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของสภาวะบรรจุต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ข้าวที่นำมาใช้ในการศึกษาได้แก่ ข้าวกล้องอะไมโลสต่ำพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ข้าวอะไมโลสสูงพันธุ์ขาวตาแห้ง และข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 รังสีที่ใช้เป็นรังสีแกมมา โดยฉายรังสีที่ปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ เก็บรักษาเป็นเวลา 6 เดือน ทดสอบคุณสมบัติทางด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสทุกเดือน โดยข้าวกล้องอะไมโลสต่ำมีสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ ส่วนข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวมีสภาวะบรรจุทั้งแบบสุญญากาศและแบบมีอากาศ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางด้านเคมี กายภาพ และประสาทสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสี ผลการทดลองที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพการหุงต้มและทางประสาทสัมผัส เช่น ลดเวลาในการหุงต้มและเพิ่มการดูดซึมน้ำของข้าวกล้อง หรือทำให้ข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูงมีความนุ่ม ไม่แข็งเมื่อเก็บรักษาไว้เป็นเวลานาน แป้งที่ได้จากข้าวที่ผ่านการฉายรังสีอาจมีความหนืดเหมาะสมในการนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ บางชนิด

บทที่ 2
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของรังสีที่อนุญาตให้ใช้กับอาหาร

รังสีที่อนุญาตให้ใช้กับอาหารนั้นมี 3 ประเภท คือ

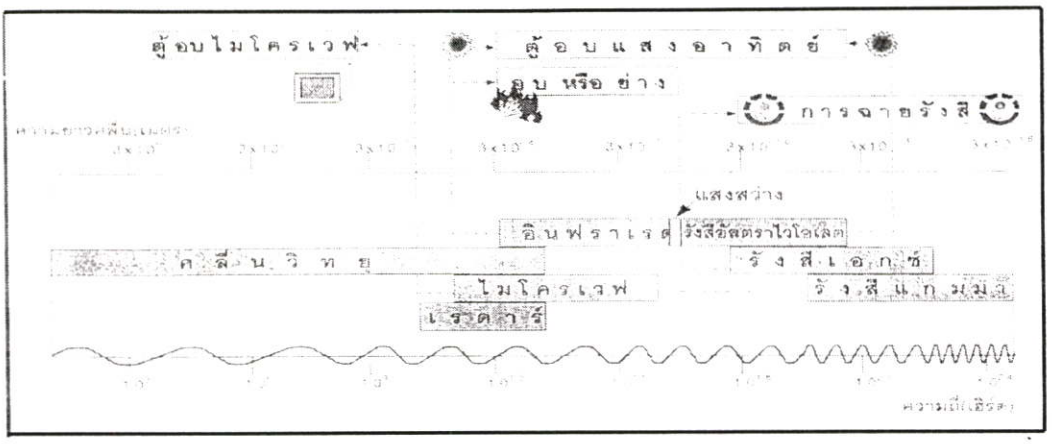
ก. รังสีแกมมาจากสารกัมมันตรังสี เช่น โคบอลต์ 60 (1.17 และ 1.33 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์) หรือ ซีเซียม 137 (0.66 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์)

ข. รังสีเอกซ์ (X-ray) จากเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่ทำงานด้วยระดับพลังงานไม่สูงกว่า 5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ค. อิเล็กตรอนจากเครื่องผลิตอิเล็กตรอนที่ทำงานด้วยระดับพลังงานไม่สูงกว่า 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

แต่ละประเภทมีข้อได้เปรียบเสียเปรียบแตกต่างกัน ดังนั้นในการเลือกใช้จึงต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ คือ รังสีแกมมามีความสามารถในการทะลุทะลวงผ่านอาหารได้มาก จึงเหมาะใช้กับอาหารที่บรรจุในกล่องหรือหีบห่อขนาดใหญ่ แต่รังสีแกมมาจะถูกปล่อยจากต้นกำเนิดตลอดเวลาในทุกทิศทางไม่ว่าจะใช้งานหรือไม่ จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในกรณีที่มีผลิตผลป้อนโรงงานน้อย ในขณะที่อิเล็กตรอนนั้นมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำและใช้กระแสไฟฟ้าสูง จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอาหารที่มีความหนามากและในพื้นที่ที่มีค่าไฟฟ้าสูง แต่ลำอิเล็กตรอนพุ่งออกมาในทิศทางเดียวกัน และสามารถเปิดปิดได้ตามต้องการ สำหรับรังสีเอกซ์นั้นมีต้นทุนการผลิตค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในกระบวนการผลิตอาหาร (โกวิทย์ นุชประมูล, 2546)

รังสีที่อนุญาตให้ใช้นั้นมีระดับพลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้สารในองค์ประกอบอาหารกลายเป็นสารกัมมันตรังสี รังสีแกมมานั้นมีความสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไอออนไนเซชัน (ionization) ปฏิกิริยาไอออนไนเซชัน คือ ปฏิกิริยาซึ่งอิเล็กตรอนตัวหนึ่งหรือมากกว่าถูกขับออกจากอะตอมโดยพลังงาน รังสีแกมมามีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกันกับคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการหุงต้มอาหารหรือคลื่นวิทยุที่ใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมจะต่างกันตรงที่คลื่นไมโครเวฟและคลื่นวิทยุนั้นมีความยาวคลื่นมากกว่าและมีความถี่ต่ำกว่า (โกวิทย์ นุชประมูล, 2546) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้กับอาหาร
ที่มา : โกวิทย์ นุชประมูล (2546)

2.2 การทำความเข้าใจเกี่ยวกับอาหารฉายรังสี

2.2.1 การเหนี่ยวนำทำให้เกิดกัมมันตภาพรังสี (induced radioactivity)

ยังมีผู้คนจำนวนมากที่สับสนกันระหว่างอาหารกัมมันตรังสี (radioactive food) และ อาหารฉายรังสี (irradiated food) ซึ่งอันที่จริงทั้งสองคำนี้มีความหมายที่แตกต่างกันมาก อาหารกัมมันตรังสีนั้นคืออาหารที่มีสารกัมมันตรังสีปนเปื้อนอยู่ ส่วนอาหารฉายรังสีเป็นอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งทุกอย่างในสิ่งแวดล้อมไม่ว่าจะเป็นอาหาร ดิน น้ำ หรืออากาศมักจะมีปริมาณสารกัมมันตรังสีอยู่ด้วยเล็กน้อยเสมอ สารกัมมันตรังสีที่รู้กันดีว่ามีอยู่ตามธรรมชาติ ได้แก่ เรเดียม 226 (radium 226) เรเดียม 228 (radium 228) คาร์บอน 14 (carbon 14) รูบิเดียม 87 (rubidium 87) โพโลเนียม 210 (polonium 210) ยูเรเนียม 234 (uranium 234) ยูเรเนียม 236 (uranium 236) และโพแตสเซียม 40 (potassium 40) ซึ่งพบได้ในอาหารปริมาณเล็กน้อย (Lagunas-solar, 1995) ในการเปลี่ยนสารธรรมดาให้เป็นสารกัมมันตรังสีจำต้องให้ได้รับรังสีที่มีระดับพลังงานสูงเพียงพอ แต่พลังงานสูงสุดที่ได้จากโคบอลต์ 60 (Co^{60}) คือ 1.33 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์และซีเซียม 137 (Cs^{137}) คือ 0.66 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์นั้นมีค่าต่ำไม่เพียงพอต่อการเหนี่ยวนำองค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารให้เกิดกัมมันตภาพรังสี (IAEA, 1982) แต่รังสีเอกซ์นั้นมีศักยภาพเพียงพอที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีได้และจะทำให้เกิดได้ดีกว่าการใช้เครื่องผลิตอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อความปลอดภัย JECFI (Joint Expert Committee on Food Irradiation) ได้กำหนดระดับพลังงานสูงสุดที่สามารถนำมาใช้ฉายรังสีของลำแสงอิเล็กตรอนไว้ที่ 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และรังสีเอกซ์ที่ 5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งไม่สามารถที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดกัมมันตภาพรังสีในอาหารที่ผ่านการฉายรังสีได้ (IAEA, 1982)

2.2.2 ความเป็นพิษและการก่อมะเร็ง (toxicity and carcinogenicity)

การฉายรังสีนั้นก่อให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นหลายอย่างในอาหาร อนุมูลอิสระ (free radical) สามารถเกิดขึ้นได้ขณะที่อยู่ในกระบวนการฉายรังสีอาหาร ซึ่งก็เป็นเช่นเดียวกับการย่าง การทอด หรือการทำแห้งอาหาร โดยอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนี้ไวต่อการทำปฏิกิริยาและไม่เสถียร และจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบชนิดอื่นเกิดเป็นผลผลิตการแยกสลายด้วยรังสีที่เสถียร (stable radiolytic products) ได้มีการทดสอบสารเหล่านี้อย่างละเอียดแต่ไม่พบว่ามีอันตรายแต่อย่างไร (Diehl, 1990) ได้มีการศึกษาอันตรายที่เกิดจากอาหารฉายรังสีมานาน Thayer และคณะ (1987) ได้ทดสอบโดยใช้เนื้อไก่แช่แข็งบรรจุกระป๋องแล้วนำไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 47 – 71 กิโลเกรย์จากโคบอลต์ 60 และใช้อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน 10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ แล้วนำไปเลี้ยงหนู กระต่าย และสุนัข เป็นเวลา 8 ปี ไม่พบหลักฐานความเป็นพิษ (toxicity) การกลายพันธุ์ (mutagenicity) และการก่อมะเร็ง (carcinogenicity)

2.3 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีอาหาร

2.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

เมื่อรังสีทะลุผ่านอาหาร รังสีจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้กับโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า สำหรับในอาหารซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยจะเกิดปฏิกิริยาเรดิโอไลซิส (radiolysis reaction) (Diehl, 1990) ดังสมการ

$$H_2O \longrightarrow OH^{\circ} + H^{\circ} + H_2 + H_2O_2 + H_3O^{+}$$

อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีอายุสั้นมากไม่ถึง 1/1000 วินาที เมื่อเกิดแล้วก็สลายตัวไปอย่างรวดเร็วโดยการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของอาหาร เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และวิตามิน ปริมาณรังสีที่ใช้ในทางการค้ามีผลน้อยมากหรือไม่มีผลเลยต่อองค์ประกอบทั้งหมดของอาหาร ส่วนรังสีปริมาณสูง ๆ จะมีผลต่อ โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และวิตามิน แต่จะไม่มีผลต่อแร่ธาตุต่าง ๆ

2.3.1.1 ผลของรังสีที่มีต่อน้ำ

เนื่องจากอาหารส่วนใหญ่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ เมื่อน้ำโดนรังสีจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ (IAEA, 1982)

ก. ไอออนไนเซชัน (Ionization)

อันตรกิริยาของรังสีกับน้ำทำให้เกิดไอออนไนเซชันโดยการดึงอิเล็กตรอนออก ผลที่ได้คือแคตไอออนมีเครื่องหมาย + และอนุมูลอิสระมีเครื่องหมาย •

$$H_2O \longrightarrow \bullet H_2O^+ + e^-$$

ข. เอกซ์ไซเทชัน (Excitation)

อันตรกิริยาของรังสีกับน้ำทำให้เกิดเอกไซเทชันแสดงเป็น *

$$H_2O \longrightarrow H_2O^*$$

อนุมูลอิสระนี้จะไม่เสถียรจะเกิดปฏิกิริยาต่างๆดังนี้

$H_2O^* \longrightarrow H_2O$	ดีเอกซ์ไซเทชัน (deexcitation)
$H_2O^* \longrightarrow \bullet H + \bullet OH$	ดีสโซสิเอชัน (dissociation)
$\bullet H_2O^+ + H_2O \longrightarrow H_3O^+ + \bullet OH$	ดีโพรโตเนชัน (deprotonation)
$\bullet H + \bullet OH \longrightarrow H_2O$	รีคอมบิเนชัน (recombination)
$\bullet OH + \bullet OH \longrightarrow H_2O_2$	คอมบิเนชัน (combination)

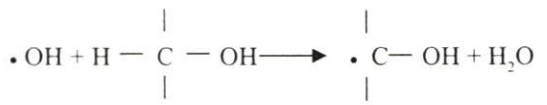
$\bullet OH$	=	อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical)
$\bullet H$	=	อะตอมไฮโดรเจน (hydrogen atom)
H_2	=	ไฮโดรเจน (hydrogen)
H_2O_2	=	ไฮโดรเจน เพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide)
H_3O^+	=	ไฮเดรตเต็ดโปรตอน (hydrated proton)
e^-	=	ไฮเดรตเต็ดอิเล็กตรอน (hydrated electron)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นั้นเป็นสารออกซิไดส์ (oxidizing agent) ซึ่งจะพบมากที่สุดในอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ส่วนอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) เป็นสารออกซิไดส์ที่มีความรุนแรงที่สุด ในขณะที่ไฮเดรตเต็ดอิเล็กตรอน (hydrated electron) เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ที่มีความรุนแรงมาก ส่วนอะตอมไฮโดรเจน (hydrogen atom) เป็นสารรีดิวซ์ที่มีความรุนแรงน้อยที่สุด ดังนั้นเมื่ออาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบผ่านการฉายรังสีเกิดสารรีดิวซ์และสารออกซิไดส์ขึ้น สารเหล่านี้ก็จะไปทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ ในอาหาร

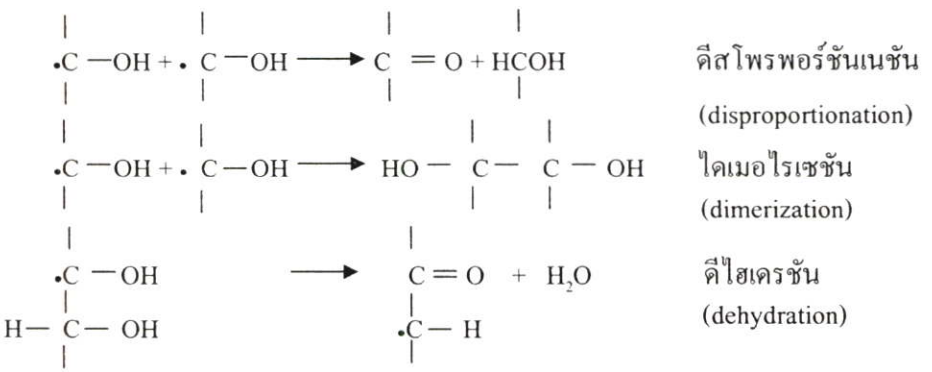
2.3.1.2 ผลของรังสีที่มีต่อคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตที่มีอยู่ในอาหารมีทั้งที่อยู่ในสภาพเปียกและแห้ง ในอุตสาหกรรมยานั้นใช้ผลึกน้ำตาลเพื่อเป็นตัวประสานในการผลิตยาเม็ด การฉายรังสีอาจนำมาใช้เพื่อทำให้ยาเม็ดปลอดเชื้อ (Diehl, 1990) เมื่อผลึกน้ำตาลถูกฉายรังสีจะเกิดสารต่าง ๆ ออกมาเป็นจำนวนมาก เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ อัลดีไฮด์ คีโตน กรด และคาร์โบไฮเดรตอื่น ๆ

ในสารละลายน้ำตาลมีการเกิดออกซิเดทีฟดีเกรเดชัน (oxidative degradation) เกิดขึ้นเนื่องจากการฉายรังสีทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยในทางอ้อมคาร์โบไฮเดรตจะทำปฏิกิริยากับอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radicals) ดังสมการต่อไปนี้

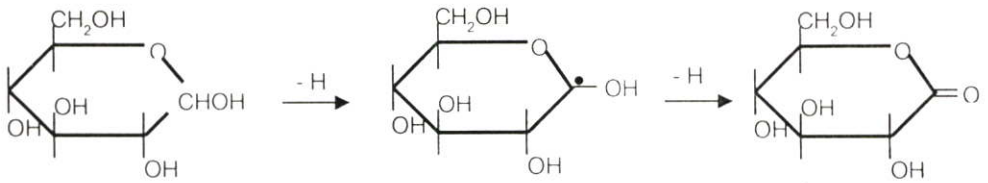


หลังจากนั้นก็จะมีปฏิกิริยาต่าง ๆ เกิดขึ้นมา ดังนี้



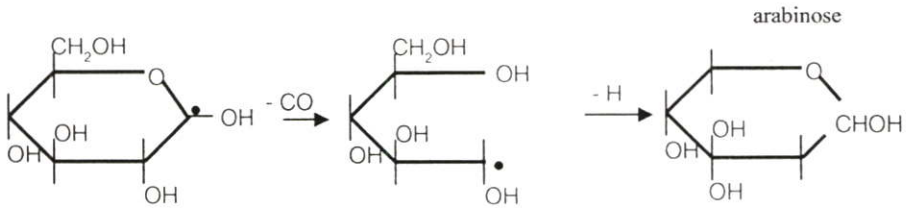
การฉายรังสีสามารถแยกพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bonds) ซึ่งเป็นตัวเชื่อมโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) ไว้ด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การฉายรังสีสตาร์ชทำให้เกิดเด็กซ์ตริน(dextrin) มอลโตส (maltose) และกลูโคส (glucose) ซึ่งเป็นการลดอันดับการพอลิเมอร์ไรเซชัน (degree of polymerization) ของพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) และทำให้ความหนืดของพอลิแซคคาไรด์ในสารละลายลดลง (Diehl, 1990) (ตามรูปที่ 2.2)

Gluconic acid



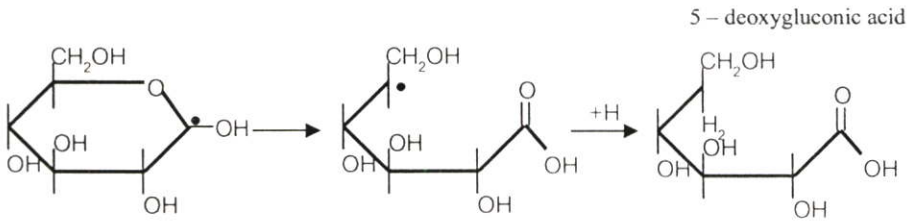
ก. การแยกออกของไฮโดรเจน (Hydrogen abstraction) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสทำให้เกิดกรดกลูโคนิค (gluconic acid)

arabinose



ข. การเสีย CO ของกลูโคสทำให้เกิดอราบิโนส (arabinose)

5 – deoxygluconic acid



ค. วงแหวนกลูโคสเปิดออกทำให้เกิดกรดดีออกซีกลูโคนิค (5-deoxygluconic acid)

รูปที่ 2.2 ผลของการฉายรังสีกลูโคส

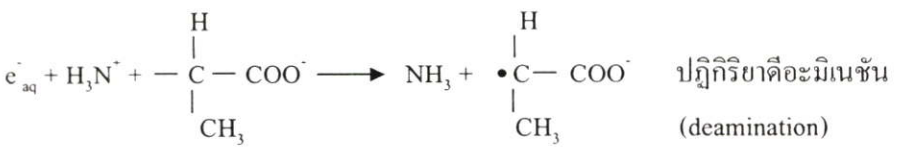
ที่มา: Diehl (1990)

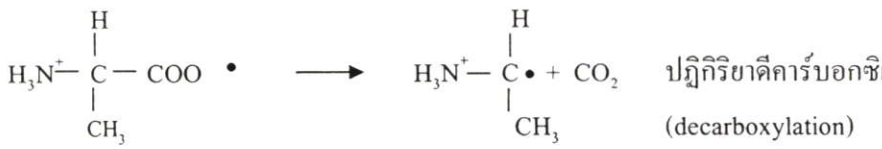
คาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบของอาหารจะมีความต้านทานรังสีมากกว่าที่อยู่แบบเดี่ยว Scherz (1979) ได้ทดลองฉายรังสีแป้งสาลี 50 กิโลเกรย์เปรียบเทียบผลกับสตาร์ชบริสุทธิ์ที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์ พบว่าผลผลิตการแยกสลายด้วยรังสี (radiolytic products) มีปริมาณพอกัน

โปรตีนบางชนิด เช่น โบวีนซีรัมอัลบูมิน (bovine serum albumin) หรือ พาเพน (papain) หรือกรดอะมิโน เช่น ซิสเทอีน (cysteine) เมทธิโอนีน (methionine) ฟีนิลอะลานิน (phenyl alanine) ลิวซีน (leucine) อะลานิน (alanine) และไกลซีน (glycine) สามารถป้องกันคาร์โบไฮเดรตจากการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการฉายรังสีได้ (Diehl *et al.*,1978)

2.3.1.3 ผลของรังสีที่มีต่อโปรตีน

โปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) ดังนั้นผลของรังสีจึงขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของกรดอะมิโน ตัวอย่างเช่น เมื่อฉายรังสีสารละลายกรดอะมิโนประเภท อะลิฟาติกอะมิโนเอซิด (aliphatic amino acid) จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้





ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีทั้งแอมโมเนีย (NH_3) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เอมีน (amines) กรดไพรูวิค (pyruvic acid) กรดโพรพิออนิค (propionic acid) และอัลดีไฮด์ (aldehyde) (Liebster and Kopoldova, 1964) มีการศึกษาพบว่าโซลเวทเต็ดอิเล็กตรอน (solvated electron) มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาเรดิโอไลซิสของกรดอะมิโนและโปรตีน (Diehl, 1990) โดยกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์ในองค์ประกอบ (sulfur containing amino acid) มักจะมีความไวต่อรังสีและกรดอะมิโนอะโรเมติก (aromatic amino acid) จะโดนทำลายที่วงแหวน (IAEA, 1982) ปฏิกิริยาดีอะมิเนชัน (deamination) จะเกิดกับฮิสทีดีน (histidine) มากกว่ากรดอะมิโนชนิดอื่น (Diehl, 1990) และยังมีการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิเลชัน (hydroxylation) ที่วงแหวนของฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) และไทโรซีน (tyrosine) (Diehl, 1990 ; IAEA, 1982)

การฉายรังสีทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหลายอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงของความหนืดและการละลายของโปรตีน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโปรตีน เมื่อโปรตีนถูกฉายรังสีจะมีการตัดพันธะ C-N ในโซ่เพปไทด์ และอาจจะมีการทำลายพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) ทำให้โปรตีนมีการแตกตัวได้โปรตีนที่มีโมเลกุลเล็กลง เช่นที่เกิดในโปรตีนเส้นใย (fibrous protein) ทำให้ความหนืดของสารละลายโปรตีนลดลง (Diehl, 1990) ส่วนโปรตีนทรงกลม (globular protein) เมื่อมีการฉายรังสีในสภาวะที่เป็นสารละลายเจือจาง จะมีการเกิดปฏิกิริยาแอกกริเกชัน (aggregation reaction) มีผลให้ความสามารถในการละลายลดลง ยกตัวอย่างเช่น โปรตีนที่สามารถละลายได้ในเนื้อวัวลดลง 30% เมื่อมีการฉายรังสีที่ 10 กิโลเกรย์ (Uzonov *et al.*, 1972) ส่วนเอนไซม์จะมีความไวต่อรังสีมากกว่าโปรตีนชนิดอื่น (IAEA, 1982) แต่องค์ประกอบของอาหารจะช่วยปกป้องเอนไซม์ได้เป็นอย่างดี การฉายรังสีเพื่อยับยั้งเอนไซม์จึงต้องใช้ปริมาณที่สูงพอสมควร

2.3.1.4 ผลของรังสีที่มีต่อไขมัน

ในกรณีของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตนั้น รังสีมีผลในทางอ้อมโดยผ่านบทบาทของน้ำ แต่ในกรณีของไขมัน สารอินเทอร์มีเดียต (intermediate) จากน้ำมีผลกระทบต่อการเกิดเรดิโอไลซิสน้อย (Diehl, 1990) เมื่อไขมันโดนรังสีจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระแคตไอออน (cation radical) กระตุ้นให้โมเลกุลเกิดไอออนไนเซชันและเอกไซเทชัน ดังสมการต่อไปนี้

$RCH_2\text{-}O\text{-}CO\text{-}(CH_2)_nCH_3 \longrightarrow (RCH_2\text{-}O\text{-}CO\text{-}(CH_2)_nCH_3)^+ + e^-$ ไอออนไนเซชัน (ionization)

$\downarrow$

$(RCH_2\text{-}O\text{-}CO\text{-}(CH_2)_nCH_3)^*$ เอกซ์ไซเทชัน (excitation)

มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้ 2 แบบในการฉายรังสีไขมัน คือ

ก. ออโตซิเดทีฟ (autoxidative)

การฉายรังสีในภาวะที่มีออกซิเจนจะเร่งให้เกิดออโตซิเดทีฟ กระบวนการเกิดออโตซิเดทีฟเนื่องจากรังสีจะเหมือนกับการเกิดออโตซิเดทีฟที่ไม่มีรังสีเกี่ยวข้อง กล่าวคือ อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดการสร้างไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide) ซึ่งก่อให้เกิดสารหลายชนิด เช่น แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ เอสเตอร์ คีโตน เป็นต้น

ข. นอน-ออกซิเดทีฟ (non-oxidative)

ปฏิกิริยานอน-ออกซิเดทีฟเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างการฉายรังสีและหลังการฉายรังสีในสภาวะบรรจุที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งผลิตผลจากการฉายรังสี (radiolytic products) ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และอัลดีไฮด์

ผลิตผลจากการฉายรังสีอันเนื่องมาจากการเกิดไฮโดรไลซิสของไขมันเกิดขึ้นในปริมาณน้อย เช่น สารประกอบที่สามารถระเหยได้ (volatile substances) จากไขมันในเนื้อวัวที่ฉายรังสีปริมาณ 60 กิโลเกรย์มีน้อยกว่า 0.03% (IAEA, 1982) จากการศึกษาพบว่าการฉายรังสีในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ ปฏิสัมพันธ์ของโปรตีน-คาร์โบไฮเดรต (protein-carbohydrate interaction product) เป็นแอนตี้ออกซิแดนท์ (antioxidant) มากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณรังสี ดังนั้นสารประกอบเหล่านี้จึงสามารถช่วยป้องกันไขมันจากการเกิดออกซิเดชันได้ (Diehl, 1990) พบว่าการฉายรังสีไขมันนั้นให้ผลเช่นเดียวกับการให้ความร้อนกับไขมัน โดย Nawar (1983) พบว่า มีสารประกอบที่สามารถระเหยได้เหมือนกันในไขมันที่ให้ความร้อน 1 ชั่วโมงที่ 180°ซ. และฉายรังสีที่ปริมาณ 250 กิโลเกรย์

2.3.1.5 ผลของรังสีที่มีต่อวิตามิน

วิตามินแบ่งออกเป็นสองชนิดคือชนิดละลายได้ในน้ำและละลายได้ในไขมัน โครงสร้างของวิตามินมีหลากหลายจึงทำให้ผลที่ได้จากการฉายรังสีแตกต่างกัน ในบรรดาวิตามินชนิดละลายได้ในน้ำด้วยกัน วิตามินบี 1 (thiamine) นั้นง่ายต่อการถูกทำลายด้วยรังสีมากที่สุด ตามด้วยวิตามินซี (ascorbic acid) วิตามินบี 6 (pyridoxine) วิตามินบี 2 (riboflavin) และวิตามินบี 3 (niacin) สำหรับวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน วิตามินอีจะไวต่อรังสีมากที่สุด ตามมาด้วยวิตามินเอ และวิตามินเค ส่วนวิตามินดีมีความเสถียรมากที่สุด (Diehl, 1990) การสูญเสียวิตามินในรูปสารบริสุทธิ์จะมากกว่าในอาหารเมื่อใช้การฉายรังสีที่ปริมาณเดียวกัน

Diehl (1975) ได้รายงานว่าสารละลายวิตามินบี 1 เข้มข้น 0.25 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยมิลลิลิตร มีปริมาณวิตามินบี 1 ลดลง 50% หลังจากการฉายรังสีปริมาณ 0.5 กิโลเกรย์ ในขณะที่เมื่อนำไข่ผงซึ่งมีปริมาณวิตามินบี 1 0.39 มิลลิกรัมต่อหนึ่งร้อยกรัมมาฉายรังสีที่ปริมาณเท่ากัน พบว่าวิตามินบี 1 จะถูกทำลายเพียง 5%

บางงานวิจัยพบว่า ที่การสูญเสียเกิดขึ้นน้อยเป็นเพราะนำมาวิเคราะห์ทันทีหลังจากฉายรังสี การสูญเสียวิตามินบางชนิดอาจเกิดขึ้นได้อีกระหว่างการเก็บรักษาโดยเฉพาะถ้ามีการสัมผัสกับออกซิเจน โดย Diehl (1979) ได้ทดลองฉายรังสีข้าวโอ๊ตทับ (rolled oat) ปริมาณ 1 กิโลเกรย์และเก็บรักษาไว้ในที่มีอากาศ พบว่าวิตามินอีสูญเสียไป 20% ทันทีหลังการฉายรังสีและจะสูญเสียอีกประมาณ 45% หลังเก็บไว้ 6 – 8 เดือน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างเดียวกันและฉายรังสีปริมาณเท่ากันแต่เก็บไว้ในที่ไม่มีอากาศคือในสภาวะที่บรรจุไนโตรเจน พบว่าวิตามินอีมีการสูญเสียเพียงเล็กน้อยหลังจากเก็บนาน 8 เดือน

2.3.2 การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัส

การฉายรังสีอาจทำให้กลิ่น สี และเนื้อสัมผัสของอาหารเปลี่ยนไปได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ปริมาณรังสีที่ใช้ และอุณหภูมิขณะฉายรังสี ดังนั้นปริมาณรังสีที่เหมาะสมสำหรับอาหารแต่ละชนิดจึงแตกต่างกัน การฉายรังสีอาหารตามปริมาณที่กำหนดจะไม่ทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหารเปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญ อาหารประเภทนมและผลิตภัณฑ์นมนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาฉายรังสีเพราะจะทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์ อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงทางประสาทสัมผัสนั้น ในบางกรณีก็เป็นประโยชน์ เช่น การฉายรังสีผักและผลไม้แห้งเพื่อให้เนื้อสัมผัสอ่อนตัวทำให้ใช้เวลาน้อยลงในการคืนรูปหรือการหุงต้ม (โกวิทย์ นุชประมูล, 2546)

2.4 ข้าว

2.4.1 การจำแนกชนิดของข้าว

การจำแนกชนิดของข้าวอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นตัวกำหนดซึ่งมีหลายแบบด้วยกัน ถ้าแบ่งโดยอาศัยความแตกต่างกันของเนื้อสัมผัสและข้าวหลังหุงสุกแล้วอาจแบ่งเป็น 2 แบบด้วยกัน คือ (งามชื่น คงเสรี, 2539)

ก. ข้าวเจ้า (non-glutinous rice) เมล็ดจะมีลักษณะแข็งและใส แต่เมื่อหุงสุกเมล็ดจะมีลักษณะขาวขุ่น สตาร์ชในเมล็ดประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะไมโลสประมาณ 8 – 36% และส่วนที่เป็นอะไมโลเพคตินประมาณ 64 – 92%

ข. ข้าวเหนียว (glutinous rice) เมล็ดมีลักษณะขุ่นทึบ มีความเลื่อมมัน เมล็ดอ่อนและมีขนาดใหญ่ เมื่อหุงสุกเมล็ดจะมีความใสและมีเนื้อสัมผัสนุ่ม สตาร์ชประกอบด้วยอะไมโลเพคตินประมาณ 92 – 100% และมีอะไมโลสประมาณ 0 – 8% (Juliano, 1972) ส่วนศัพท์ภาษาอังกฤษที่ใช้เรียกข้าวเหนียว ได้แก่ glutinous rice sticky rice sweet rice waxy rice botan rice และ mochi rice

ส่วนการแบ่งชนิดของข้าวตามปริมาณอะไมโลส แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของข้าวตามปริมาณอะไมโลส

ประเภทข้าว	ปริมาณอะไมโลส (%)	ตัวอย่างพันธุ์ข้าว
ข้าวเหนียว	1-2	กข 8
ข้าวอะไมโลสต่ำ	12-20	ดอกมะลิ105 กข 15 กข 21
ข้าวอะไมโลสปานกลาง	20-25	นางมลเอส 4
ข้าวอะไมโลสปานกลาง ค่อนข้างสูง	25-27	ขาวปากหม้อ กข 7 สุพรรณบุรี 60
ข้าวอะไมโลสสูง	มากกว่า 27	เหลืองประทิว123 เหลืองใหญ่ 148 ปิ่นแก้ว 56 ตะเภาแก้ว 161

ที่มา:งามชื่น คงเสรี (2539)

2.4.2 ข้าวกล้อง (brown rice)

ข้าวกล้องคือข้าวที่ผ่านการสีเปลือกข้าวออกเท่านั้น โดยยังมีจมูกข้าวและเยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (รำ) ซึ่งเป็นแหล่งรวมของสารอาหารที่มีคุณค่าอยู่ ซึ่งได้แก่ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 ฟอสฟอรัส แคลเซียม ทองแดง เป็นต้น ข้าวกล้องใช้เวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวขัดขาว เนื่องจากขณะเก็บรักษาสตาร์ชจะเกิดเกาะเกี่ยวกับโปรตีนออไรเซนิน (oryzenin) กลายเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง (Cass Mutters, 2003) ทำให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinize) เพิ่มขึ้น การพองตัวของเม็ดสตาร์ชจากการหุงต้มน้อยจึงต้องใช้เวลานานในการหุงต้ม นอกจากนี้ข้าวกล้องยังมีไขมันอยู่ในปริมาณที่สูงกว่าข้าวขัดขาวดังแสดงในตารางที่ 2.2 เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชัน โดยไขมันในข้าวถูกออกซิไดส์ด้วยเอนไซม์ไลเปส (lipase) และไลปอกซีจีเนส (lipoxygenase) เกิดสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์และแตกตัวต่อไปกลายเป็นสารประกอบต่าง ๆ ได้แก่ อัลดีไฮด์ คีโตน กรดคาร์บอกซิลิก เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้ก่อให้เกิดกลิ่นหืน

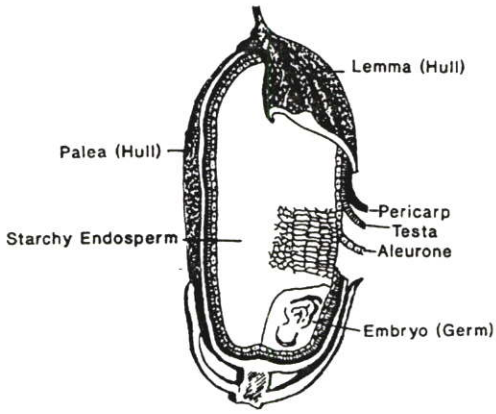
ตารางที่ 2.2 ปริมาณสารอาหารของข้าวกล้องและข้าวขัดขาว (ต่อ 100 กรัมตัวอย่าง)

สารอาหาร	ข้าวกล้อง	ข้าวขัดขาว
ความชื้น (%)	12.0	12.0
พลังงาน (กิโลแคลอรี่/100 กรัม)	360.0	363.0
โปรตีน (%)	7.5	6.7
ไขมัน (%)	1.9	0.4
เถ้า (%)	1.2	0.5
คาร์โบไฮเดรต (%)	77.4	80.4
เส้นใย (%)	0.9	0.3
แคลเซียม (มิลลิกรัม/100กรัม)	32.0	24.0
ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/100กรัม)	221.0	94.0
เหล็ก (มิลลิกรัม/100กรัม)	1.6	0.8
โซเดียม (มิลลิกรัม/100กรัม)	9.0	5.0
โพแทสเซียม (มิลลิกรัม/100กรัม)	214.0	92.0
ไรโบฟาวิน (มิลลิกรัม/100กรัม)	0.1	0.0
ไนอะซิน (มิลลิกรัม/100กรัม)	4.7	1.6
ไทอะมิน (มิลลิกรัม/100กรัม)	0.3	0.1

ที่มา : Lorenz และ Kulp (1991)

2.4.3 โครงสร้างของเมล็ดข้าวกล้อง

ข้าวกล้องหรือเมล็ดข้าวที่เอาเปลือกออกแล้วประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 แสดงภาพตัดขวางของเมล็ดข้าว

ที่มา : Matsuo (1995)

ก. เยื่อหุ้มผล (pericarp) ซึ่งเป็นเส้นใย ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ
- อีพิคาร์พ (epicarp)
- มีโซคาร์พ (mesocarp)
- เอนโดคาร์พ (endocarp)

ข. เยื่อหุ้มเมล็ด (seed coat) อยู่ถัดจากเยื่อหุ้มผลเข้าไป ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 2 ชั้น เป็นที่อยู่ของสารประเภทไขมัน

ค. อลิวโรนเลเยอร์ (aleurone layer) อยู่ถัดจากเทกเมน (tegmen) ห่อหุ้มสตาร์ชีเอนโดสเปิร์ม (starchy endosperm) และเอมบริโอ (embryo) อลิวโรนเลเยอร์ มีโปรตีนอยู่สูง นอกจากนี้ยังประกอบไปด้วยน้ำมัน เซลลูโลส (cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

ง. สตาร์ชีเอนโดสเปิร์ม หรือส่วนที่เป็นข้าวสาร อยู่ชั้นในสุดของเมล็ด ประกอบด้วยแป้งเป็นส่วนใหญ่และมีโปรตีนอยู่บ้าง

จ. เอมบริโออยู่ติดกับเอนโดสเปิร์ม ซึ่งประกอบด้วยต้นอ่อน (plumule) รากอ่อน(radicle) เยื่อหุ้มต้นอ่อน (coleoplite) เยื่อหุ้มรากอ่อน (coleorhiza) ท่อน้ำท่ออาหาร (epiblast) และใบเลี้ยง (scutellum) เป็นส่วนที่มีไขมันและโปรตีนสูง

2.5 คุณภาพทางเคมีและกายภาพของข้าว

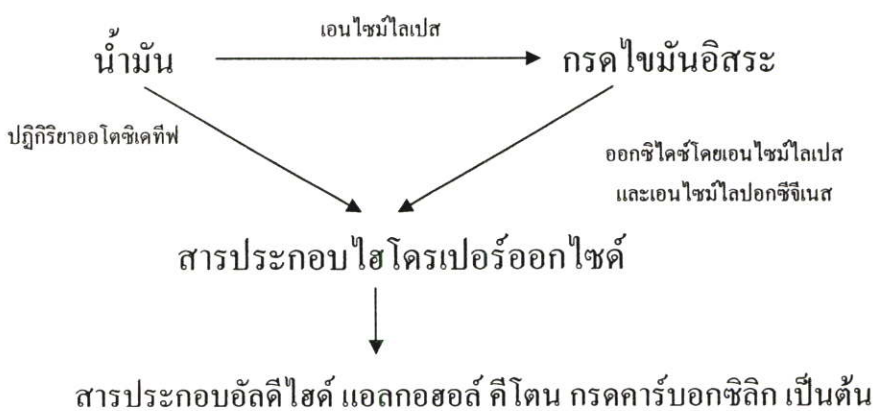
2.5.1 สตาร์ช

สตาร์ชในเมล็ดข้าวประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพคติน โดยอะไมโลสมีหน่วยของน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิค (α-1,4 glycosidic) ในขณะที่อะไมโลเพคตินมีน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นโซ่แขนงด้วยพันธะแอลฟา-1,4 ไกลโคซิดิค และพันธะแอลฟา-1,6 ไกลโคซิดิค (α-1,6 glycosidic) จึงทำให้อะไมโลเพคตินมีโครงสร้างของโมเลกุลที่แยกออกเป็นกิ่ง ข้าวที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำและขยายปริมาตรในการหุงต้มได้ดีกว่าข้าวอะไมโลสต่ำ ดังนั้นสัดส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจึงมีผลต่อคุณภาพการหุงต้ม จากการศึกษาการฉายรังสีของข้าวกล้อง Sabularse และคณะ (1992) ได้ทดลองกับข้าว 3 พันธุ์ คือ Mars Lemont และ Tabonnet พบว่าพันธุ์ Mars และ Lemont นั้นปริมาณอะไมโลสไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนพันธุ์ Tabonnet นั้น พบว่ามีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นเมื่อฉายรังสีในปริมาณเพิ่มขึ้น และมีส่วนสัมพันธ์กันกับปริมาณของอะไมโลเพคตินที่ลดลง

Wu และคณะ (2002) ได้ฉายรังสีแป้งจากข้าวพันธุ์ต่าง ๆ คือ indica rice japonica rice และ hybrid rice ในปริมาณ 0.1-1.0 กิโลเกรย์ พบว่าเมื่อปริมาณรังสีที่ใช้สูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสในแป้งข้าวทุกชนิดลดลง การที่บางครั้งปริมาณอะไมโลสลดลงเนื่องมาจากการเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) ของสตาร์ชเนื่องมาจากรังสี (MacArthur and D'Appolonia, 1984)

2.5.2 ไขมัน

ไขมันที่พบในเมล็ดข้าวอยู่ในลักษณะไลปิดดรอพเลต (lipid droplets) แทรกอยู่ในอลิวโรนเลเยอร์และเอมบริโอ ส่วนในเนื้อเมล็ดอยู่ร่วมกับกลุ่มโปรตีน ข้าวกล้องมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวในอลิวโรนเลเยอร์และเอมบริโอมาก เมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานานจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชัน ตามรูปที่ 2.4

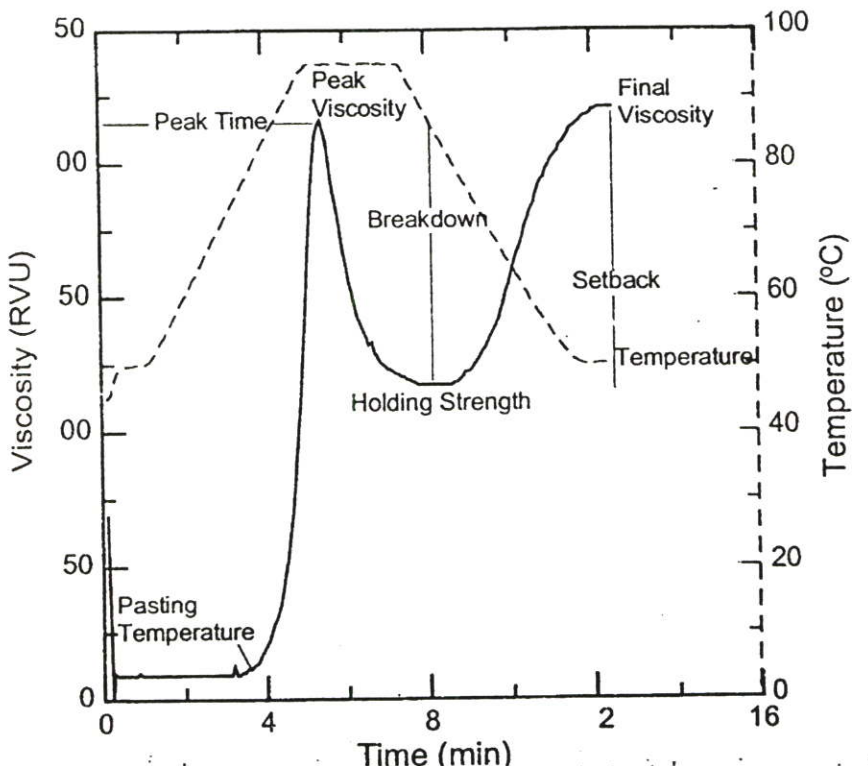


รูปที่ 2.4 กลิ่นหืนของข้าวที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและออกซิเดชัน
ที่มา : Champagne (1993)

การฉายรังสีในข้าวนั้นจะมีผลต่อไขมันในข้าว ซึ่ง Vacat และ Harms-Ringdahl (1986) ได้ฉายรังสีแกมมาข้าวเจ้า ข้าวไรย์ และข้าวสาลี ที่ปริมาณรังสี 0.1-1.0 กิโลเกรย์ซึ่งเป็นปริมาณที่ใช้สำหรับกำจัดแมลงและที่ปริมาณ 63 กิโลเกรย์ พบว่าที่ปริมาณรังสีต่ำไม่ได้ทำลายไขมัน แต่เมื่อฉายรังสีที่ปริมาณ 63 กิโลเกรย์ไขมันโดนทำลายถึง 40%

2.5.3 ความหนืด (paste viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ คือ ชนิดของแป้ง การดัดแปรแป้ง ขนาดของเม็ดแป้ง และปริมาณอะไมโลส ในการตรวจวัดความหนืดสามารถกระทำได้หลายวิธีและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีหลายชนิด เช่น เครื่องBrookfield viscometer เครื่อง Capillary viscometer เครื่อง Brabender amylograph และ เครื่อง Rapid visco analyzer (RVA)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA
ที่มา : Anonymous (1995)

จากรูปที่ 2.5 เป็นตัวอย่างกราฟจากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง RVA ซึ่งหน่วยความหนืดเป็น RVA และ cP (cP = 12 x RVA) โดยมีค่าสำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ก. เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) มีหน่วยเป็นนาที คือ เวลาตั้งแต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนถึงจุดที่เกิดความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สามารถใช้เป็นค่าบอกถึงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งได้ กล่าวคือ เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดน้อย อุณหภูมิในการเกิด เจลาติไนซ์ของแป้งก็จะต่ำ ข. ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เกิดจากเมื่อเม็ดแป้งดูดน้ำและได้รับความร้อนทำให้เกิดการพองตัวส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อนที่เม็ดแป้งจะแตกตัวแล้วความหนืดจึงลดลง

ค. ค่าความหนืดต่ำสุด (holding strength หรือ trough) เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนเกิดความหนืดสูงสุดหลังจากนั้นเม็ดแป้งจะเกิดเจลาติไนซ์ทำให้เม็ดแป้งแตกตัวแล้วความหนืดลดลงจนถึงระดับต่ำสุดของการให้ความร้อน

ง. ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (breakdown) เป็นความแตกต่างระหว่างค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดต่ำสุด ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถต่อการทนทานของเม็ดแป้งต่อการถูกทำลาย ถ้ามีเม็ดแป้งที่มีความทนทานต่อการถูกทำลายสูงค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวนั้นก็จะน้อย

จ. ค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) เป็นความหนืดสุดท้ายของการทดลองหลังจากอุณหภูมิของน้ำแป้งเย็นลง

ฉ. ค่าการคืนตัว (set back) มี 2 แบบ คือ set back form trough ซึ่งเป็นผลต่างของความหนืดสุดท้ายและความหนืดต่ำสุด ส่วนอีกแบบคือ set back form peak เป็นผลต่างของความหนืดสุดท้ายและความหนืดสูงสุด โดยการคืนตัวเกิดหลังจากการเกิดเจลาติไนซ์เซชันของสตาร์ชแล้วจึงเกิดการเรียงตัวกันใหม่ของสตาร์ชหลังจากที่อุณหภูมิของน้ำแป้งลดต่ำลง ซึ่งค่าการคืนตัวนี้สามารถบอกถึงการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งได้ว่ามีมากหรือน้อย ถ้าค่าการคืนตัวมีมากการเกิดรีโทรกราเดชันของแป้งก็มีมากด้วย (Whistler and Benmiller,1999) โดยข้าวที่มีค่าการคืนตัวสูงจะเป็นข้าวแข็งและร่วน ส่วนข้าวที่มีค่าการคืนตัวต่ำจะเป็นข้าวนุ่มและเหนียว ซึ่งการคืนตัวของแป้งหรือกระบวนการรีโทรกราเดชันจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดหรือแหล่งของสตาร์ช ปริมาณอะไมโลส อุณหภูมิที่ลดลง และระยะเวลาที่เก็บ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) โดยแป้งข้าวที่เก็บรักษาไว้นานขึ้นทำให้เกิดกระบวนการรีโทรกราเดชันมากขึ้น (Teo and Seow, 1992)

2.5.4 อุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature)

อุณหภูมิการเกิดเจลหรืออุณหภูมิแป้งสุก คือ อุณหภูมิสุดท้ายที่ทำให้เม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำดูดน้ำและพองตัวขึ้นจนกระทั่งความร้อนทำลายการจัดตัวภายในเม็ดแป้ง เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในอย่างถาวร (จารนัย พาณิชยกุล, 2537) โดยอุณหภูมิแป้งสุกมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการหุงต้มคือ ข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกสูงจะใช้ระยะเวลาในการหุงต้มนานกว่าข้าวที่มีอุณหภูมิแป้งสุกต่ำ (Juliano *et al*., 1965) จากการศึกษาของ Sabularse และคณะ (1991) พบว่าข้าวพันธุ์ Mont ที่ผ่านการขัดสีใช้เวลาในการหุงต้มน้อยกว่าข้าวกล้องจากข้าวพันธุ์เดียวกันประมาณ 35% เนื่องจากข้าวกล้องมีชั้นของรำหุ้มอยู่ โดยส่วนของรำนั้นประกอบด้วย โปรตีน เส้นใย ไขมัน ทำให้กีดขวางการซึมผ่านของน้ำสู่สตาร์ช พบว่าเมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้นจะทำให้เวลาที่

ใช้ในการต้มสุกนานขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการเก็บรักษา อะไมโลสในสตาร์ชเกิดการเกาะเกี่ยวกับโปรตีนทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความแข็งแรงทำให้การพองตัวของเม็ดสตาร์ชลดลง (Barber, 1972)

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแป้งให้สูงขึ้น แรงที่เกาะกันระหว่างโมเลกุลของแป้งจะลดลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำได้มากขึ้น และที่อุณหภูมิหนึ่งการดูดน้ำจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเม็ดแป้งขยายตัวใหญ่ขึ้น อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิเจลาติไนเซชัน (อุณหภูมิที่ทำให้แป้งสุก) มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาหุงต้ม ข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันสูงจะหุงสุกช้ากว่าข้าวที่มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันต่ำ

Wu และคณะ (2002) ได้ฉายรังสีปริมาณ 0.1- 1.0 กิโลเกรย์กับข้าวชนิดต่าง ๆ คือ ข้าวอะไมโลสสูง ข้าวอะไมโลสปานกลาง และข้าวเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณรังสีที่ใช้สูงขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิเจลาติไนเซชันของแป้งข้าวทุกชนิดต่ำลง

2.5.5 การยืดตัวของเมล็ดข้าวสุก (elongation)

เมล็ดข้าวมีการขยายตัวในระหว่างการหุงต้ม การวัดการขยายตัวของเมล็ดข้าวทำได้โดยวัดความยาวของข้าวสุกเทียบกับข้าวสาร ข้าวสุกที่ยืดตัวได้มากจะไม่เหนียวติดกัน เป็นข้าวที่หุงขึ้นหม้อ เมื่อเมล็ดขยายตัวได้มากทำให้เนื้อภายในโปร่งไม่อัดแน่นและช่วยให้ข้าวนุ่มมากขึ้น การดูดซึมน้ำจะมีผลต่อการเกิดเจลาติไนซ์ในข้าว ถ้าข้าวดูดซึมน้ำได้ในปริมาณมากจะทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาติไนซ์ต่ำ การศึกษาของ Sabularse และคณะ (1991) พบว่าข้าวกล้องมีการดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าข้าวขัดขาว และเมื่อนำข้าวกล้องไปฉายรังสีพบว่าการใช้รังสีปริมาณสูงขึ้นจะทำให้ข้าวกล้องดูดซึมน้ำได้มากขึ้น แต่ยังสรุปไม่ได้ว่าเป็นที่ต้องการของผู้บริโภคหรือไม่

2.5.6 ความคงตัวของแป้งสุก (gel consistency)

เป็นการวัดแนวโน้มความแข็งของข้าวสุกเมื่อเย็นตัวลง ถ้าค่าที่ได้น้อยแสดงว่าข้าวสุกมีความแข็งและมีปริมาณอะไมโลสสูง แต่ถ้าค่าที่ได้สูงแสดงว่าข้าวสุกจะนุ่มและมีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า โดยแบ่งความคงตัวของแป้งสุกออกเป็น 4 ประเภท คือ

1. แข็ง (hard) ระยะทางที่เจลเคลื่อนที่ (length of gel) 27-30 มิลลิเมตร
2. แข็งปานกลาง (medium-hard) ระยะทางที่เจลเคลื่อนที่ 36-40 มิลลิเมตร
3. นุ่มปานกลาง (medium) ระยะทางที่เจลเคลื่อนที่ 41-60 มิลลิเมตร
4. นุ่ม (soft) ระยะทางที่เจลเคลื่อนที่ 61-100 มิลลิเมตร

Wu และคณะ (2002) ได้ฉายรังสีปริมาณ 0.1 - 1.0 กิโลเกรย์กับข้าวอะไมโลสสูง ข้าวอะไมโลสปานกลาง และข้าวเหนียว พบว่าเมื่อปริมาณรังสีที่ใช้สูงขึ้นมีผลทำค่าความคงตัวของแป้งสุกในแป้งข้าวทุกชนิดสูงขึ้น

2.5.7 การเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) ของสตาร์ชข้าวและข้าวหุงสุก

เมื่อสตาร์ชผสมกับน้ำและได้รับความร้อนจะเกิดเจลาติไนเซชัน ซึ่งเมื่อให้ความร้อนต่อไป เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเพิ่มขึ้น คาร์โบไฮเดรตสายสั้นสามารถหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช และเมื่อเม็ดสตาร์ชแตกออก โมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะหลุดออกมา และมีผลให้ความหนืดลดลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจน เกิดเป็นร่างแหสามมิติที่แข็งแรง มีความหนืดเพิ่มมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจล (กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) การเกิดรีโทรกราเดชันของข้าวมีผลมาจากหลายปัจจัย ได้แก่ พันธุ์ข้าว โดยข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูงสามารถเกิดรีโทรกราเดชันได้ดี ระยะเวลาการเก็บรักษาข้าว เมื่อเก็บรักษาข้าวไว้นานการเกิดรีโทรกราเดชันก็จะมากขึ้น และไขมันก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดรีโทรกราเดชันเพราะไขมันจะจับตัวกับสตาร์ช ทำให้การรวมตัวกลับคืนไม่สามารถทำได้ (Biliaderis and Tonugai, 1991)

2.6 การเปลี่ยนแปลงคุณภาพในระหว่างการเก็บรักษา

การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีและกายภาพของข้าวในระหว่างการเก็บรักษานั้นให้ทั้งผลดีและเสียทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะในการเก็บรักษา พันธุ์ข้าว และปัจจัยอื่น ๆ โดยความชื้น อุณหภูมิในการเก็บ และเวลาการเก็บ เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลมากต่อคุณสมบัติทางด้านเคมี กายภาพ และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ต่าง ๆ ของข้าวหลังการเก็บเกี่ยว โดยทั่วไปคุณภาพจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณความชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้น

คุณภาพของข้าวจะเริ่มเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ในแปลงปลูกและต่อเนื่องมาจนถึงหลังการเก็บเกี่ยว การเปลี่ยนแปลงในข้าวส่วนใหญ่เกิดมาจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับโปรตีน สตาร์ช และไขมัน ที่ชั้นนอก (outer layer) ของเมล็ดข้าวสามารถเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ได้ดีกว่าชั้นเอนโดสเปิร์ม เนื่องจากมีเอนไซม์และซับสเทรต (substrate) ที่เกี่ยวข้องมากกว่า (ดังตารางที่ 2.3) ไม่เฉพาะข้าวกล้องเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางเคมีกายภาพได้มาก ข้าวขัดขาวก็มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีในชั้นต่าง ๆ ของเมล็ดข้าว

องค์ประกอบ	ชั้นนอก	เอนโดสเปิร์ม	ทั้งเมล็ด
สตาร์ช (%)	61.86	92.00	90.68
อะไมโลส (%)	16.12	29.85	29.46
น้ำตาลรีดิวซ์ (กรัมมอลโตส/ข้าว 100 กรัม)	0.50	0.07	0.12
น้ำตาลนอน-รีดิวซ์ (กรัมซูโครส/ ข้าว 100 กรัม)	2.42	0.11	0.26
น้ำตาลทั้งหมด (%)	2.92	0.18	0.38
เส้นใย (%)	1.47	0.22	0.28
ไนโตรเจนทั้งหมด (กรัมไนโตรเจน/ ข้าว 100 กรัม)	2.53	1.27	1.39
ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (กรัมไนโตรเจน/ ข้าว 100 กรัม)	0.04	0.018	0.019
ไนโตรเจนโปรตีน (กรัมไนโตรเจน/ ข้าว 100 กรัม)	2.49	1.25	1.37
อัลบูมิน (กรัมไนโตรเจน x5.95/ ข้าว 100 กรัม)	1.75	0.29	0.30
โกลบูลิน (กรัมไนโตรเจน x5.95/ ข้าว 100 กรัม)	1.12	0.60	0.67
โปรลามิน (กรัมไนโตรเจน x5.95/ ข้าว 100 กรัม)	0.72	0.22	0.25
กลูเตลิน (กรัมไนโตรเจน x5.95/ ข้าว 100 กรัม)	7.93	5.05	5.25
กรดอะมิโนอิสระ (มิลลิกรัมไนโตรเจน/ ข้าว 100 กรัม)	25.11	2.55	3.40
แอลฟาอะไมเลส (SKB หน่วย/ ข้าว 1 กรัม)	1.0	0.07	0.1
เบต้าอะไมเลส (มิลลิกรัมมอลโตส/ ข้าว 1 กรัม)	223.8	31.2	44.9
ไขมันทั้งหมด (%)	4.40	0.45	0.66
ไทอะมีน (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)	0.790	0.047	0.081
ไรโบฟลาวิน (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)	0.075	0.019	0.022
ไนอะซิน (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)	9.270	0.885	1.264
ไพริดอกซิน (มิลลิกรัม/ 100 กรัม)	1.185	0.080	0.128
เถ้า (%)	6.10	0.45	0.72
แคลเซียม (%)	0.359	0.007	0.023
ฟอสฟอรัส (%)	1.022	0.099	0.140

ที่มา: Barber (1972)

2.6.1 การเปลี่ยนแปลงของโปรตีน

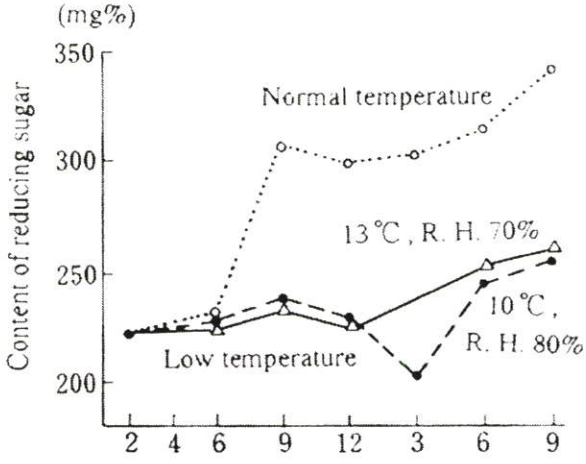
จากการวิจัยพบว่าปริมาณโปรตีนจะมีผลต่อเนื้อสัมผัส ความนุ่ม และความเหนียวของข้าวสุก (Cass Mutters, 2003) โดยส่วนใหญ่โปรตีนมีมากบริเวณชั้นนอกของเมล็ดข้าว แต่ในชั้นเอนโดสเปิร์มก็มีอยู่เช่นกัน โปรตีนที่มีอยู่ในข้าว 80 - 90% จะเป็นออไรเซนินหรือกลูเตลิน (glutelin) หลังจากการเก็บรักษาข้าวไว้หนึ่งปีที่ 40°ซ. น้ำหนักโมเลกุลของออไรเซนินในข้าวจะเพิ่มเป็นสองเท่า (Cass Mutters, 2003) และมีการลดลงของกรดอะมิโนอิสระเมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้น โดยการลดลงของกรดอะมิโนเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวแบบไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic) โดยมีอุณหภูมิและปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญ (Barber,1972)

มีกลไกหนึ่งที่เกิดจากโปรตีนซึ่งส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของข้าว สันนิษฐานว่าเกี่ยวข้องกับการแพร่ของน้ำเข้าไปในเม็ดสตาร์ชซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำและเวลาที่ใช้ในการหุงต้ม (Danial *et al.*, 1998) ขั้นต่อมาโปรตีนอาจมีการขัดขวางการเกิดเจลาติไนซ์ โดยทำให้การแตกหักของอะไมโลสลดลงหรือทำให้เม็ดสตาร์ชมีการยึดเกาะกันมากขึ้น ดังนั้นในระหว่างการเก็บรักษาการเกิดปฏิกิริยากันระหว่างโปรตีนและสตาร์ชทำให้การดูดซึมน้ำของสตาร์ชและกระบวนการเกิดเจลาติไนซ์ระหว่างการหุงต้มลดลง โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล้าหรือเบียร์จึงไม่ใช้ข้าวที่เก็บรักษาไว้นาน ๆ เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิในการเจลาติไนซ์สูงและการเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลที่สามารถเกิดการหมักได้ (fermentable sugar) เกิดช้าลง

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของข้าวเริ่มตั้งแต่เดือนแรกของการเก็บรักษา การเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษานั้นจะส่งผลต่อคุณภาพการหุงต้ม เช่น เวลาที่ใช้ในการหุงต้ม การดูดซึมน้ำและความเหนียว ซึ่งมีสาเหตุมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและสตาร์ช (Protein-Starch Interaction) การเก็บข้าวไว้ที่อุณหภูมิสูงมีผลทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและสตาร์ชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Cass Mutters, 2003) เวลาในการหุงต้มจะเพิ่มมากขึ้นและความเหนียวนุ่มจะลดลงในระหว่างการเก็บรักษาทั้งข้าวกล้องและข้าวขัดสีโดยเฉพาะเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง (Chrastil, 1994)

2.6.2 การเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรต

เมื่อมีการเก็บรักษาข้าวปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น มอลโตสเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.5) ส่วนน้ำตาลนอนรีดิวซ์ เช่น ซูโครสลดลงเมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 45°ซ. หรือมากกว่า ส่วนกระบวนการสลายตัวของคาร์โบไฮเดรตไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะมีมากขึ้นเมื่อมีความชื้นมากกว่า 14% และอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปปริมาณของสตาร์ชจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเก็บรักษาถึงแม้ว่าคุณสมบัติบางประการเปลี่ยนแปลงไป การเปลี่ยนแปลงทางด้านความแข็ง ความคงตัวของแป้งสุก และค่าความหนืดจะเห็นได้เมื่อเก็บรักษาไว้ประมาณสามเดือน (Matsuo, 1995)



รูปที่ 2.6 แสดงปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่าง ๆ
ที่มา: Matsuo (1995)

2.6.3 การเปลี่ยนแปลงของไขมัน

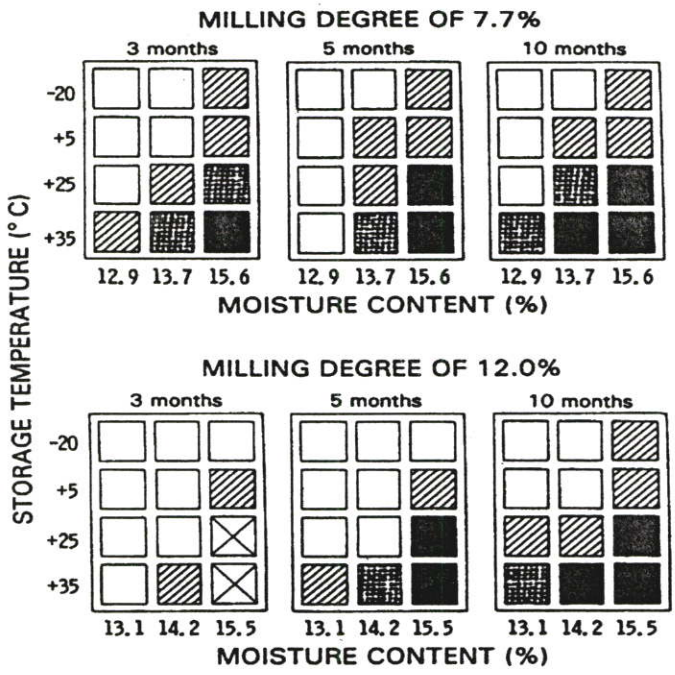
ไขมันในเมล็ดข้าวมีมากในชั้นนอก (outer layer) ส่วนในชั้นเอนโดสเปิร์ม (endosperm) จะมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น มีเอนไซม์ไลเปส (lipase) ซึ่งเป็นตัวการทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ในชั้นไขมัน ซึ่งแหล่งของเอนไซม์มาจากในเมล็ดข้าวเองและจากจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในเมล็ดข้าว เอนไซม์ไลเปสจะอยู่ในชั้นเทสทา ส่วนไขมันจะอยู่ในชั้นอลิวโรนและเอมบริโอซึ่งเป็นชั้นนอกของเมล็ดข้าว ดังนั้นปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในชั้นนอกของเมล็ดข้าวซึ่งมีปริมาณไขมันสูง การสีข้าวนั้นจะเกิดการทำลายชั้นนอกของเมล็ดข้าวทำให้ไขมันและเอนไซม์ไลเปสสัมผัสกัน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ขึ้นมา

อัตราการเกิดกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของชั้นนอกของข้าวที่โดนทำลาย ปริมาณความชื้น ปริมาณจุลินทรีย์ และอุณหภูมิ ปริมาณ 30% ของไขมันจะเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันในระยะเวลาหนึ่งสัปดาห์ภายใต้ความชื้นสูงและอุณหภูมิสูง (Champagne, 1993) ไขมันจะถูกไฮโดรไลส์ (hydrolyze) หรือออกซิไดส์ (oxidize) ไปเป็นกรดไขมันหรือเปอร์ออกไซด์ (peroxide) ในระหว่างการเก็บ อุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation) กรดไขมันจะถูกออกซิไดส์ต่อไปทำให้ข้าวมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้น รสชาติถูกทำลาย และมีกลิ่นหืน (rancidity)

เอนไซม์ไลปอกซีจีเนสซึ่งพบในชั้นเอมบริโอเป็นตัวการให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไขมันไปเป็นเปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นสารอื่นต่อไป เช่น อัลดีไฮด์ คีโตน และกรดคาร์บอกซิลิก

2.6.4 การเปลี่ยนแปลงกลิ่นและรสชาติ

การเปลี่ยนแปลงกลิ่นและรสชาติของข้าวสุกอาจเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะเก็บข้าวไว้ในสภาวะที่มีอากาศน้อย (Barber, 1972) อัลดีไฮด์และคีโตนนั้นพบว่ามีส่วนสำคัญทำให้เกิดกลิ่นไม่ดีขึ้นมากกว่าสารชนิดอื่น เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) เป็นต้น สารระเหยที่ตรวจพบส่วนใหญ่เกิดมาจากการย่อยสลายของไขมัน กรดอะมิโน (amino acid) และวิตามิน (vitamin) การขัดสีที่มากกว่า 12% ช่วยรักษากลิ่นรสได้ยาวนานกว่าข้าวที่มีการขัดสีเพียงเล็กน้อยเนื่องจากชั้นนอกของเมล็ดข้าวมีปริมาณสารที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่มาก (Barber, 1972) ดังแสดงตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มขึ้นของกลิ่นผิดปกติ (off odor) ในข้าวขัดขาวระหว่างการเก็บรักษา
ที่มา: Barber (1972)
หมายเหตุ: สีเข้มแสดงถึงกลิ่นผิดปกติมาก

รสชาติของข้าวจะมีลักษณะเฉพาะตัวของพันธุ์ข้าว สภาวะแวดล้อมในการปลูก รสชาติของข้าวจะถูกเปลี่ยนแปลงได้ง่ายจากสภาวะการเก็บรักษา เช่น อุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของข้าวในระหว่างการเก็บรักษาแสดงตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะด้านต่าง ๆ ของข้าวในระหว่างการเก็บ

คุณลักษณะ	ผล
ความขาว	-
ปริมาตรการขยายตัว	+
รสชาติ	-
ความหนืด	-
ความรู้สึกจากการเคี้ยว	+
ความเหนียว	-
วิตามินบี	-
น้ำตาลรีดิวซ์	+
กิจกรรมของเอนไซม์	-
กรดไขมัน	+
กรดอะมิโน	-

หมายเหตุ: - คือ ลดลง + คือ เพิ่มขึ้น

ที่มา: Cass Mutters (2003)

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการ

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือ

3.1.1.1 เครื่องโม่	Hammer Mill
3.1.1.2 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส	Texture analyzer รุ่น TA-XT2i
3.1.1.3 เครื่องวัดสี	Chromameter, Minolta รุ่น CR-300
3.1.1.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก	Satorious, B 3100S
3.1.1.5 เครื่องปิดผนึกแบบสุญญากาศ	HENKOVAC
3.1.1.6 เครื่องฉายรังสีแกมมา	Gamma Beam-650
3.1.1.7 เครื่องวัดการดูดกลืนคลื่นแสง	Spectrophotometer, LKB biochrom, Ultrospec II
3.1.1.8 เครื่องวัดความหนืดของแป้ง	Rapid visco analyzer รุ่น RVA-4
3.1.1.9 เครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ	Heidolph, VV2000
3.1.1.10 หม้อหุงข้าวไฟฟ้าขนาด 1.5 ลิตร	Sharp

3.1.2 วัตถุดิบ

3.1.2.1 ข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จากโรงสีข้าวจังหวัดฉะเชิงเทรา

3.1.2.2 ข้าวเจ้าอะไมโลสสูงพันธุ์ขาวตาแห้ง จากบริษัทกลุ่มเกษตรมาเก็ตติ้ง จำกัด

3.1.2.3 ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 จากบริษัทเอเชียอินเตอร์ไรซ์ จำกัด

3.1.2.4 ถุงโพลีโพรพิลีน หนา 0.03 มม.ขนาด 6x9 นิ้ว ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดกานต์ดาวิน

3.1.2.5 ถุงโพลีโพรพิลีนเกรดสุญญากาศ หนา 0.18 มม.ขนาด 6x9 นิ้ว ผลิตโดยบริษัท ถาวรพลาสติก จำกัด

3.1.2.6 ถุงโพลีโพรพีลีนชนิดหนา 0.1 มม.ขนาด 8X12 นิ้ว ผลิตโดยห้างหุ้นส่วนจำกัดกานต์ดาวิน

3.1.2.7 น้ำมันปาล์มโอลีน ผลิตโดยบริษัท มรกตอินดัสตรี้ จำกัด

3.1.3 อุปกรณ์

เครื่องแก้วสำหรับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ดังนี้

3.1.3.1 ขวดแก้วรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)

3.1.3.2 ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask)

3.1.3.3 ขวดแก้วก้นกลม (round bottom flask)

3.1.3.4 บิวเรตต์ (burette)

3.2 สถานที่ดำเนินงาน

3.2.1 คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.2.2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาลัยเขตโชติเวช

3.2.3 สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

3.3 วิธีการดำเนินงาน

3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้ม และคุณภาพทางประสาทสัมผัสระหว่างการเก็บรักษาของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำฉายรังสีและไม่ฉายรังสี

ชั่งข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ปริมาณ 0.5 กิโลกรัม บรรจุลงในถุงพลาสติก โพลีโพรพีลีน (PP) หนา 0.03 มม.ขนาด 6x9 นิ้ว หลังจากนั้นประกบด้วยถาดโฟม 2 ถาดแล้วบรรจุในถุงพลาสติกโพลีโพรพิลีนเกรดสุญญากาศ หนา 0.18 มม.ขนาด 6x9 นิ้วอีกชั้นหนึ่ง แล้วจึงปิดผนึกแบบสุญญากาศ (ดังรูปที่ 1 ในภาคผนวก ง.) นำไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน ทำการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้งทางด้านเคมี กายภาพ การหุงต้ม และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีเปรียบเทียบกับข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสี โดยทำการทดสอบทุก 1 เดือน ดังนี้

3.3.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

3.3.1.1.1 ปริมาณอะไมโลส (Juliano *et al.*, 1981) (วิธีการตามภาคผนวก ก.1)

3.3.1.1.2 ค่า TBA (Tarladgis *et al.*, 1960) (วิธีการตามภาคผนวก ก.2)

3.3.1.1.3 ปริมาณกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) (AOAC, 1990) (วิธีการตามภาคผนวก ก.3)

3.3.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

3.3.1.2.1 สี โดยวัดในระบบ Hunter L a b ใช้เครื่อง Chromameter (วิธีการตามภาคผนวก ก.4)

3.3.1.2.2 คุณสมบัติด้านความหนืด ใช้เครื่อง Rapid visco analyzer (Anonymous, 1995) (วิธีการตามภาคผนวก ก.5)

3.3.1.2.3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ใช้เครื่องTexture analyzer (Sesmat and Meullenet, 2001 ; งามชื่น คงเสรี, 2532) (วิธีการตามภาคผนวก ก.6)

3.3.1.2.4 การพองตัวของข้าวจากการทอด (ปกรณ์พรรณ เผือกสวัสดิ์, 2545) (วิธีการตามภาคผนวก ก.7)

3.3.1.3 คุณสมบัติการหุงต้ม (Batcher *et al.*, 1950)

3.3.1.3.1 การขยายตัวของข้าวสุก (วิธีการตามภาคผนวก ก.8)

3.3.1.3.2 การดูดซึมน้ำ (วิธีการตามภาคผนวก ก.8)

3.3.1.3.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำ (วิธีการตามภาคผนวก ก.8)

3.3.1.3.4 เวลาต้มสุก (วิธีการตามภาคผนวก ก.9)

3.3.1.4 ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวสุก โดยใช้ผู้ชิม 20 คนสำหรับตัวอย่างข้าวสุกอุ่นและข้าวสุกเย็น (วิธีการเตรียมตัวอย่างข้าวตามภาคผนวก ก.10) โดยผู้ชิมให้คะแนนตามระดับความพึงพอใจ 9 ระดับ (9 point hedonic scale) ตามแบบของ Larmond (1977) (แบบทดสอบตามภาคผนวก ข.)

การทดลองในข้อ 3.3.1.1 ถึง 3.3.1.3 ทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติของผลการทดลองโดยใช้แผนการทดลองแบบ split plot ส่วนผลการทดลองในข้อ 3.3.1.4 ใช้แผนการทดลองแบบ RCBD การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยใช้วิธี Duncan' New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS version 9.0 การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วมของผลการทดลอง ดังตารางที่ 1 ในภาคผนวก ค. (กรมวิชาการเกษตร, 2532)

3.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสระหว่างการเก็บรักษาของข้าวสารอะไมโลสสูงฉายรังสีและไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศและแบบมีอากาศ

ชั่งข้าวสารอะไมโลสสูงพันธุ์ขาวตาแห้ง ปริมาณ 0.5 กิโลกรัม บรรจุในถุงในสภาวะสุญญากาศเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1 และบรรจุข้าวแบบมีอากาศในถุงโพลีโพรพีลีนชนิดหนา 0.1 มม. ขนาด 8x12 นิ้ว ปิดผนึก (ดังรูปที่ 2 ในภาคผนวก ง.) นำไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ เก็บและวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ฉายรังสีเช่นเดียวกับข้อ 3.3.1

3.3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสระหว่างการเก็บรักษาของข้าวเหนียวฉายรังสีและไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศและแบบมีอากาศ

ใช้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข 6 บรรจุในสภาวะสุญญากาศและมีอากาศ นำไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ เก็บและวิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ฉายรังสีเช่นเดียวกับข้อ 3.3.2

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้ม และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำฉายรังสีระหว่างการเก็บ

4.1.1 คุณสมบัติทางเคมี

เมื่อเก็บข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมีจากข้าวกล้องทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.2

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง

sov	df	p - value		
		อะไมโลส (amylose)	ค่า TBA	กรดไขมันอิสระ (free fatty acid)
ปริมาณรังสี	3	0.041*	0.041*	0.125ns
error	4			
ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.000*	0.000*
error	24			
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000*	0.350ns	0.018*
pooled error	24			

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและค่า TBA แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ไม่มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณอะไมโลส ค่า TBA และปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่า TBA แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและปริมาณของกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	คุณสมบัติทางเคมี		
	ปริมาณอะไมโลส (%)	ค่า TBA (mg malonaldehyde/kg sample)	ปริมาณกรดไขมันอิสระ^{ns} (mg KOH/100 g)
0	13.61 ± 0.26^{a}	0.27 ± 0.07^{b}	363 ± 37
1	13.90 ± 0.44^{b}	0.20 ± 0.06^{a}	369 ± 39
2	13.99 ± 0.30^{b}	0.24 ± 0.08^{ab}	366 ± 36
3	14.00 ± 0.44^{b}	0.31 ± 0.09^{c}	357 ± 30

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและค่า TBA แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ไม่มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส พบว่าข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีทุกระดับมีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นจากข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ Sabularse และคณะ (1992) ที่ฉายรังสีปริมาณ 1.0 – 3.0 กิโลเกรย์ในข้าวพันธุ์ Tebonnet พบว่าทำให้ปริมาณอะไมโลสเพิ่มสูงขึ้น ส่วนพันธุ์ Mars และ Lemont ปริมาณอะไมโลสไม่เปลี่ยนแปลง แต่การทดลองของ Wu และคณะ (2002) ได้ทดลองฉายรังสีปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์ในข้าวชนิดต่าง ๆ พบว่า ปริมาณอะไมโลสในข้าวอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสปานกลางและข้าวเหนียวลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ปริมาณอะไมโลสในข้าวที่ไม่ฉายรังสีและข้าวฉายรังสีที่ 3 กิโลเกรย์มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ข้าวที่ไม่ฉายรังสีมีปริมาณ อะไมโลสต่ำสุด 13.61% และข้าวฉายรังสีที่ 3 กิโลเกรย์มีปริมาณอะไมโลสสูงสุดที่ 14.00% ค่าที่แตกต่างกันอาจเกิดจากการใช้วิธีการวิเคราะห์ของ Juliano และคณะ (1981) ซึ่งไม่มีการหาความชื้นก่อนการวิเคราะห์ แป้งที่ใช้ในการทดสอบแต่ละครั้งอาจมีปริมาณความชื้นไม่เท่ากันทำให้ผลที่ได้คลาดเคลื่อนได้สูงเนื่องจากใช้ตัวอย่างเพียง 0.1 กรัม

ปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า TBA มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่า TBA ในข้าวกล้องฉายรังสี 3 กิโลเกรย์มากกว่าข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีและฉายรังสี 1 และ 2 กิโลเกรย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2005) ที่ฉายรังสีปริมาณ 0.2-2.0 กิโลเกรย์ในข้าวแล้วพบว่าทำให้ค่า TBA เพิ่มขึ้น

การหาค่า TBA เป็นการวัดระดับการเกิดออกซิเดชันของไขมันในอาหาร โดยวัดความเข้มของสีแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง 2-thiobarbituric acid กับสารที่ได้จากการเกิดออกซิเดชันของไขมันคือมาลอนอัลดีไฮด์ (malonaldehyde) การฉายรังสีแกมมาในอาหารในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาแบบนอน-ออโตซิเดทีฟ ซึ่งเกิดผลิตผลจากการฉายรังสี (radiolytic products) ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน และอัลดีไฮด์ โดยอัลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นมีผลให้ค่า TBA สูงขึ้น

สำหรับปริมาณกรดไขมันอิสระจากข้าวกล้องที่ฉายรังสีและไม่ผ่านการฉายรังสีพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% สอดคล้องกับผลการทดลองของ Vacat และ Harms-Ringdahl (1986) ที่ฉายรังสีแป้งข้าวในปริมาณ 1 ถึง 4 กิโลเกรย์ และพบว่าปริมาณของกรดไขมันอิสระไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อมีการฉายรังสีในปริมาณ 63 กิโลเกรย์ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่ามากขึ้น

กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากเอนไซม์ไลเปสและไขมัน โดยก่อนที่ข้าวจะสีเอาเปลือกออกนั้น ทั้งเอนไซม์ไลเปสและไขมันนั้นไม่ได้สัมผัสกัน เอนไซม์ไลเปสนั้นอยู่ในชั้นเทสทาส่วนไขมันอยู่ในชั้นอลิวโรนและเอมบริโอ แต่เมื่อมีการสีเอาเปลือกออกชั้นเทสทาจะโดนทำลาย ทำให้เอนไซม์ไลเปสสามารถเร่งทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสให้ไขมันเกิดเป็นกรดไขมันอิสระ (Cass Mutter, 2003; Champagne, 1993; Shastry and Raghavendra Rao, 1971)

ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณสมบัติทางเคมีของข้าวกล้อง

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	คุณสมบัติทางเคมี		
	ปริมาณอะไมโลส (%)	ค่า TBA (mg malonaldehyde/kg sample)	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (mg KOH/100 g)
0	13.92 ± 0.29^{bc}	0.30 ± 0.10^{de}	311 ± 12^{a}
1	14.11 ± 0.38^{c}	0.30 ± 0.08^{de}	352 ± 10^{bc}
2	13.93 ± 0.34^{bc}	0.27 ± 0.05^{cd}	364 ± 24^{cd}
3	13.92 ± 0.48^{bc}	0.33 ± 0.04^{e}	341 ± 18^{b}
4	13.85 ± 0.47^{ab}	0.23 ± 0.05^{bc}	372 ± 11^{d}
5	13.69 ± 0.30^{a}	0.20 ± 0.03^{ab}	416 ± 16^{f}
6	13.71 ± 0.44^{a}	0.16 ± 0.04^{a}	390 ± 15^{e}

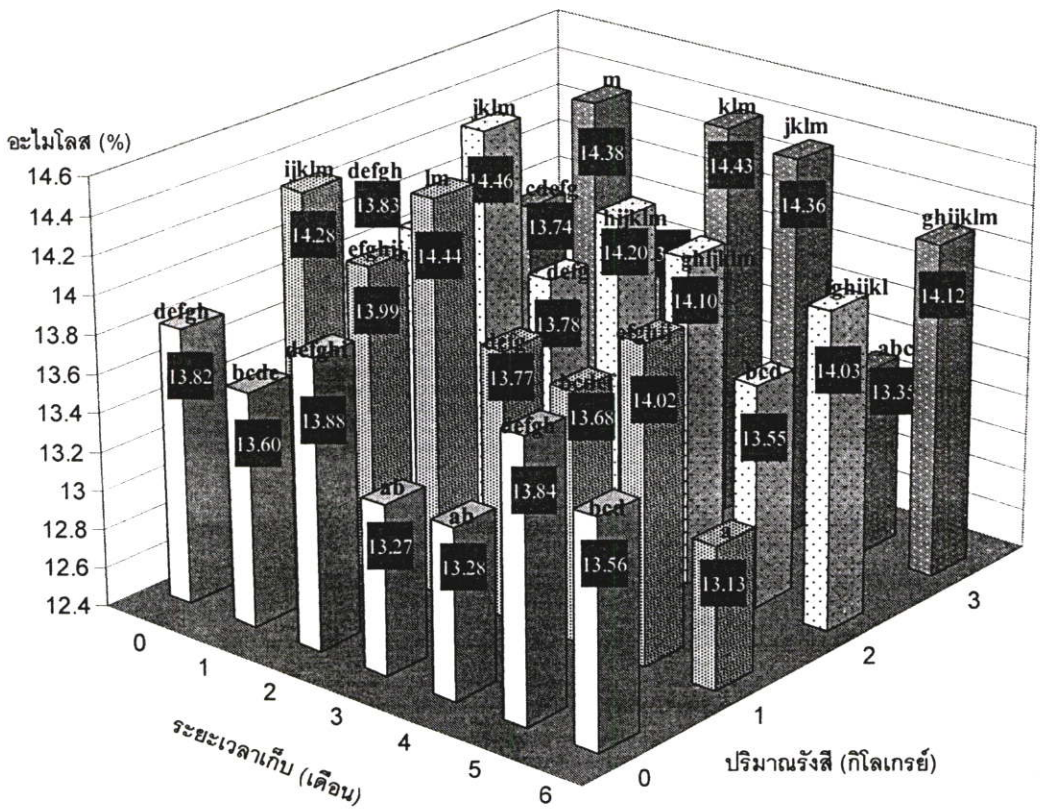
หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.3 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสของข้าวกล้องมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเห็นได้ว่าหลังจากเก็บไว้ตั้งแต่ 5 เดือนขึ้นไป ปริมาณอะไมโลสลดลงจากเมื่อเริ่มต้นเก็บอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ Patindol และคณะ (2005) ที่ทดลองเก็บข้าวเปลือกไว้เป็นเวลา 9 เดือน พบว่าอัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคตินลดลงซึ่งได้สันนิษฐานว่าอะไมโลสถูกไฮโดรไลซ์ ทำให้ง่ายต่อการทำลายของเอนไซม์และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แต่ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองของงามชื่น คงเสรี (2532) ซึ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวกล้องและข้าวสารตลอดระยะเวลาเก็บ 6 เดือน และพบว่าระยะเวลาเก็บไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส แต่อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองเมื่อเก็บไว้นาน 6 เดือน ปริมาณอะไมโลสลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งผลการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนของการวิธีการวิเคราะห์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนการทดลองผลของปริมาณรังสีต่อปริมาณอะไมโลส

จากการทดลองพบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่า TBA ในข้าวกล้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยค่า TBA ไม่มีการเปลี่ยนแปลงใน 3 เดือนแรกของการเก็บและมีค่าลดลงในช่วง 3 เดือนหลัง ในการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) ได้ฉายรังสีปริมาณ 0.2-1.0 กิโลเกรย์ในข้าวดอกมะลิ 105 ขัดขาว แล้วเก็บไว้นาน 12 เดือน พบว่า ค่า TBA เพิ่มขึ้นใน 2 เดือนแรก และมีค่าลดลงหลังจากเก็บไว้นาน 4 เดือน

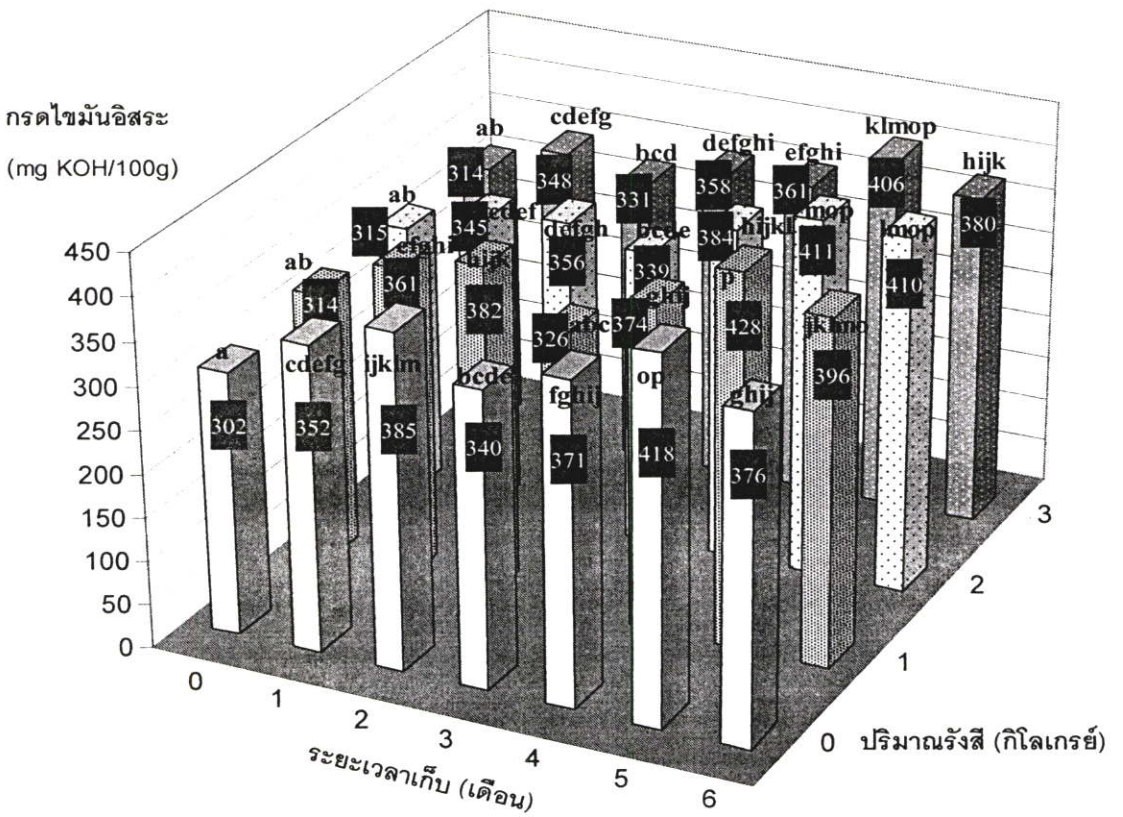
จากผลการทดลองนี้ค่า TBA มีค่าลดลงในช่วง 3 เดือนหลังของการเก็บ อาจเนื่องมาจากปริมาณอัลดีไฮด์ที่เกิดในระหว่างการเก็บเป็นสารที่ว่องไวต่อปฏิกิริยามาก อาจเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นได้ เช่น ปฏิกิริยารีดักชันถูกรีดิวซ์เป็นแอลกอฮอล์

จากตารางที่ 4.3 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวกล้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หลังจากเก็บไว้ 1 เดือนปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเกิดเนื่องจากเมื่อเก็บนานขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสโดยเอนไซม์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Dhaliwal และคณะ(1991) ที่ทดลองเก็บรักษาข้าวไว้เป็นเวลา 12 เดือน



รูปที่ 4.1 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณอะไมโลสของข้าวกล้อง
หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากรูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลให้ปริมาณอะไมโลสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อมีเฉพาะปัจจัยระยะเวลาเก็บจะทำให้ปริมาณอะไมโลสลดลงเล็กน้อยแต่เมื่อมีปัจจัยของปริมาณรังสีร่วมด้วยค่าที่ได้มีแนวโน้มไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.2 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากรูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บทำให้กรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเมื่อมีปัจจัยระยะเวลาเก็บอย่างเดียวปริมาณกรดไขมันอิสระจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อมีปัจจัยปริมาณรังสีร่วมด้วยค่าที่ได้มีแนวโน้มไม่ชัดเจน

4.1.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.1.2.1 การทดสอบค่าสีเหลืองของข้าวกล้อง (ค่า b)

เมื่อเก็บรักษาข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือน และติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของสีของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก โดยใช้เครื่อง Chromameter ในการวัดสีทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก

sov	df	p - value	
		ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
ปริมาณรังสี	3	0.001*	0.000*
error	4		
ระยะเวลาเก็บ	6	0.001*	0.004*
error	24		
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.284ns	0.731ns
pooled error	24		

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่า b ซึ่งแสดงความเป็นสีเหลืองของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวที่หุงสุกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่า b ของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลของรังสีแกมมาในปริมาณที่ต่างกันต่อค่าสีเหลืองของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ค่าสีเหลือง	
	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
0	14.53 ± 0.49^{a}	9.19 ± 0.61^{a}
1	15.27 ± 0.49^{b}	11.54 ± 0.79^{b}
2	15.50 ± 0.45^{b}	11.76 ± 0.47^{b}
3	16.12 ± 0.59^{c}	12.25 ± 0.58^{c}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.5 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า b ของข้าวกล้องทั้งเป็นข้าวสารและและข้าวสุกหุงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยข้าวกล้องที่ฉายรังสี 1 และ 2 กิโลเกรย์มีค่า b ไม่ต่างกันและมากกว่าข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสี ส่วนข้าวกล้องที่ฉายรังสี 3 กิโลเกรย์จะมีค่า b มากกว่าข้าวกล้องที่ฉายรังสี 1 และ 2 กิโลเกรย์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhom (2005) ซึ่งฉายรังสีข้าวขัดขาวปริมาณ 0.2 – 2.0 กิโลเกรย์แล้วพบว่าสีเหลืองในข้าวเพิ่มขึ้นเมื่อฉายรังสีในปริมาณที่มากขึ้น และยังสอดคล้องกับการทดลองของ Kang และ Byun (1996) ฉายรังสีแป้งข้าวโพด แล้วพบว่าแป้งข้าวโพดที่มีการฉายรังสี 10 ถึง 50 กิโลเกรย์มีสีเหลืองเพิ่มขึ้น

Oh และคณะ (2005) ได้ทดลองฉายรังสีสารละลายแป้งที่ไม่มีและมีกรดอะมิโน พบว่าสารละลายแป้งที่มีกรดอะมิโนหลังจากการฉายรังสีแล้วมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น ส่วนสารละลายแป้งที่ไม่มีกรดอะมิโนไม่มีการเปลี่ยนแปลง การที่มีสีเหลืองมากขึ้นนี้คาดว่าเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เนื่องจากข้าวที่ผ่านการฉายรังสีนั้นโมเลกุลของสตาร์ชโดนย่อยเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากขึ้น ทำให้มีสีเข้มขึ้น (Anunthaswamy *et al.*, 1970)

ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าสีเหลืองของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก

ระยะเวลาเก็บ	ค่าสีเหลือง	
(เดือน)	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
0	14.64 ± 0.54^{a}	10.41 ± 1.27^{a}
1	15.40 ± 0.52^{b}	10.87 ± 0.94^{ab}
2	15.41 ± 0.54^{b}	11.32 ± 1.57^{bc}
3	15.59 ± 0.86^{b}	11.32 ± 1.38^{bc}
4	15.48 ± 1.01^{b}	11.53 ± 1.25^{c}
5	15.32 ± 0.73^{b}	11.52 ± 1.44^{c}
6	15.63 ± 0.75^{b}	11.32 ± 1.54^{bc}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.6 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลต่อค่า b ของข้าวกล้องทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก โดยค่า b ของข้าวสารเพิ่มขึ้นหลังจากเก็บไว้ตั้งแต่หนึ่งเดือนขึ้นไป ส่วนข้าวกล้องที่หุงสุกพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หลังจากเก็บไว้ตั้งแต่สองเดือนขึ้นไป ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการทดลองของ Chrastil (1990) ที่เก็บข้าวไว้นาน 10 เดือน พบว่าค่า b เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เมื่อระยะเวลาการเก็บนานขึ้นข้าวจะมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์เพิ่มขึ้น (Matsuo, 1995) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดเพิ่มขึ้นได้ ทำให้ข้าวกล้องมีสีเข้มขึ้น และการที่สีของข้าวสารเปลี่ยนแปลงเร็วกว่าสีของข้าวสุกอาจเนื่องจากเมื่อนำข้าวไปหุง ความเข้มของสีจะลดลงเนื่องจากเมล็ดข้าวขยายขนาดขึ้น

4.1.2.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง

เมื่อเก็บข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องโดยใช้เครื่อง RVA ทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.9 และรูปที่ 4.3 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้อง

sov	df	p - value			
		ความหนืดสูงสุด (peak viscosity)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak time)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (breakdown)	การคืนตัว (set back)
ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
error	4				
ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.000*	0.000*	0.001*
error	24				
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000*	0.000*	0.002*	0.000*
pooled error	24				

หมายเหตุ : * หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.7 พบว่าปริมาณรังสี ระยะเวลาเก็บ รวมทั้งอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (breakdown) และการคืนตัว (set back) ของข้าวกล้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ			
	ความหนืดสูงสุด (cP)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (นาที)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (cP)	การคืนตัว (cP)
0	2986 ± 108^{d}	5.46 ± 0.16^{d}	1362 ± 131^{d}	1868 ± 132^{d}
1	1863 ± 131^{c}	5.38 ± 0.12^{c}	792 ± 143^{c}	1635 ± 64^{c}
2	1226 ± 108^{b}	5.26 ± 0.07^{b}	597 ± 65^{b}	1102 ± 62^{b}
3	868 ± 142^{a}	5.19 ± 0.08^{a}	479 ± 109^{a}	726 ± 61^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.8 พบว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวกล้องลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยแป้งจากข้าวที่ไม่ฉายรังสีมีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นแป้งจากข้าวที่ฉายรังสี 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ตามลำดับ

ค่าความหนืดสูงสุดเกิดจากเมื่อเม็ดแป้งดูดน้ำและได้รับความร้อนทำให้เกิดการพองตัว ส่งผลให้มีความหนืดเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดก่อนที่เม็ดแป้งจะแตกตัวแล้วความหนืดจึงลดลง ในกรณีของค่าความหนืดสูงสุดที่ลดลงเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากสตาร์ชเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันทำลายพันธะของสตาร์ชทำให้เกิดเป็นโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตขนาดเล็ก (Deschreider, 1960) และเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีมากขึ้นก็ยิ่งทำให้เกิดโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตขนาดเล็กมีปริมาณมากขึ้น แป้งจากข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์จึงมีค่าน้อยที่สุดและแป้งจากข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีมีค่าความหนืดสูงสุดมากที่สุดซึ่งได้ผลทำนองเดียวกันกับ Wu และคณะ (2002) ที่ฉายรังสีปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์ในข้าวเปลือก และการทดลองของ Sabularse และคณะ (1992) ที่ฉายรังสีปริมาณ 1.0 – 3.0 กิโลเกรย์ให้กับข้าวขัดขาวและข้าวกล้อง รวมทั้งการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) ที่ฉายรังสีข้าวขาวดอกมะลิ 105 ขัดขาวในปริมาณ 0.2 -1.0 กิโลเกรย์

จากการทดลองพบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดลดลงเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งเป็นผลมาจากรังสีทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้ง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งไม่แข็งแรงมีความต้านทานในการพองตัวต่ำลง แตกตัวได้เร็วขึ้น และความสามารถในการละลายของแป้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดจึงน้อยลงซึ่งได้ผลทำนองเดียวกันกับ Wu และคณะ (2002)

พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) เพราะว่ารังสีทำลายพันธะภายในเม็ดแป้งทำให้ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลง

จากผลการทดลอง ค่าการคืนตัวของแป้งจากข้าวกล้องลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อฉายรังสีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกันกับการทดลองของ Kang และคณะ (1999) ที่ฉายรังสีแกมมาแป้งข้าวโพดที่ 10 20 และ 30 กิโลเกรย์ ทำให้ค่าการคืนตัวลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น และเช่นเดียวกันกับการทดลองของ Wu และคณะ (2002) ฉายรังสีปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์กับข้าวอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสปานกลาง และข้าวเหนียว พบว่ารังสีมีผลให้ค่าการคืนตัวลดลงเช่นกัน โดย Deschreider (1960) อธิบายว่าเนื่องมาจากรังสีแกมมาได้ตัดพันธะของสตาร์ชกลายเป็นโพลีแซคคาไรด์สายสั้นทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้ดี ค่าการคืนตัวจึงลดลง

ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำแสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ			
	ความหนืดสูงสุด (cP)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (นาที)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (cP)	การคืนตัว (cP)
0	1750 ± 757^{b}	5.21 ± 0.08^{a}	938 ± 339^{d}	1249 ± 404^{a}
1	1770 ± 856^{ab}	5.26 ± 0.15^{b}	880 ± 371^{c}	1307 ± 418^{b}
2	1859 ± 867^{b}	5.30 ± 0.12^{cd}	877 ± 409^{c}	1393 ± 451^{d}
3	1731 ± 825^{ab}	5.43 ± 0.17^{e}	712 ± 266^{a}	1334 ± 467^{bc}
4	1753 ± 904^{ab}	5.47 ± 0.18^{f}	748 ± 357^{ab}	1382 ± 540^{d}
5	1656 ± 912^{a}	5.32 ± 0.09^{d}	732 ± 413^{ab}	1366 ± 533^{cd}
6	1633 ± 934^{a}	5.28 ± 0.05^{bc}	768 ± 422^{b}	1300 ± 548^{b}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

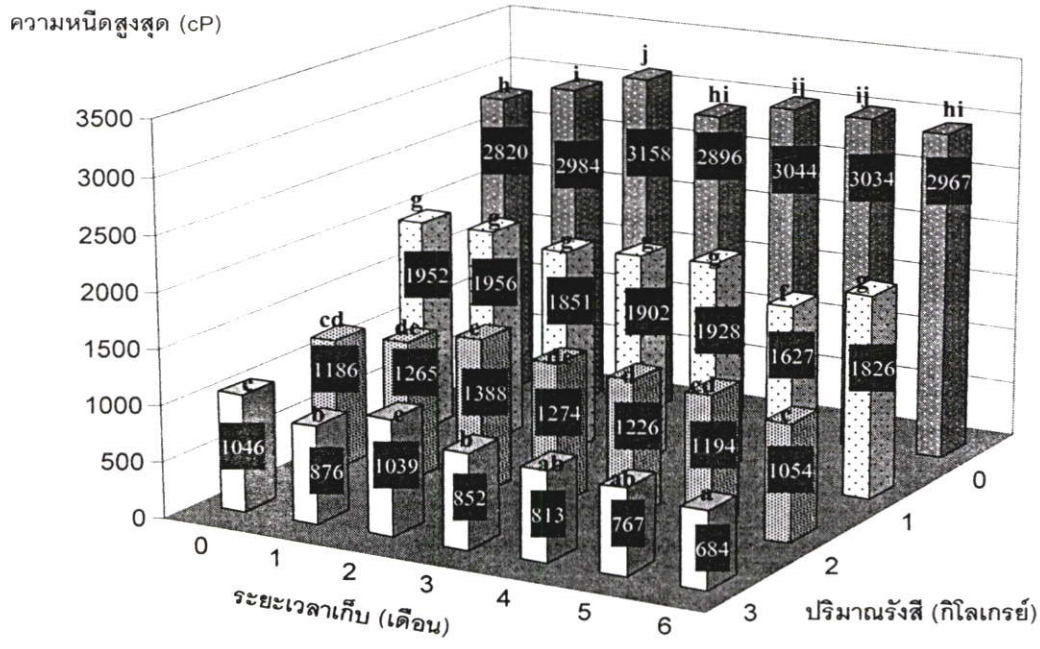
จากตารางที่ 4.9 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ต่อค่าความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวกล้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค่าความหนืดสูงสุดตลอดทั้งระยะเวลาเก็บ 6 เดือนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในเดือนที่เริ่มเก็บถึงเดือนที่ 4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเดือนที่ 5 และ 6 ค่าความหนืดสูงสุดลดลงจากเมื่อเริ่มเก็บอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อาจเป็นเพราะเมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้นเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีน (ออริซานิน) กับสตาร์ช (protein-starch interaction) ซึ่งจะขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช ทำให้ความหนืดสูงสุดลดลง (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) ซึ่งเก็บข้าวไว้เป็นเวลา 12 เดือนแล้วมีค่าความหนืดสูงสุดลดลงเล็กน้อยตลอดอายุการเก็บ

ส่วนเวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดเมื่อเก็บข้าวกล้องไว้ พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เมื่อเริ่มเก็บจนถึงเดือนที่ 4 อาจเป็นผลมาจากการจับกันระหว่างโปรตีนและสตาร์ชทำให้เกิดเจลาติไนซ์ได้ยากขึ้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในเดือนที่ 5 และ 6 เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดลดลง

ค่าความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้งคือค่าความต่างระหว่างความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดของการวัดด้วยเครื่อง RVA พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่าความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเก็บไว้ตั้งแต่ 1 เดือนเป็นต้นไป ค่าความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้งลดลง และมีค่าต่ำสุดตั้งแต่เดือนที่ 3 ถึงเดือนที่ 6 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Patindol และคณะ (2005) ที่เก็บข้าวพันธุ์ Bengal และ Cypress เป็นเวลา 9 เดือน ซึ่งสันนิษฐานว่ามีปัจจัยที่ให้ความคงตัว (stabilizing factor) ได้แก่ องค์ประกอบที่ไม่ใช่สตาร์ช (non – starch components) สามารถลดการแตกหักของโมเลกุลอะไมโลส ส่งผลให้ความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้งต่ำลง

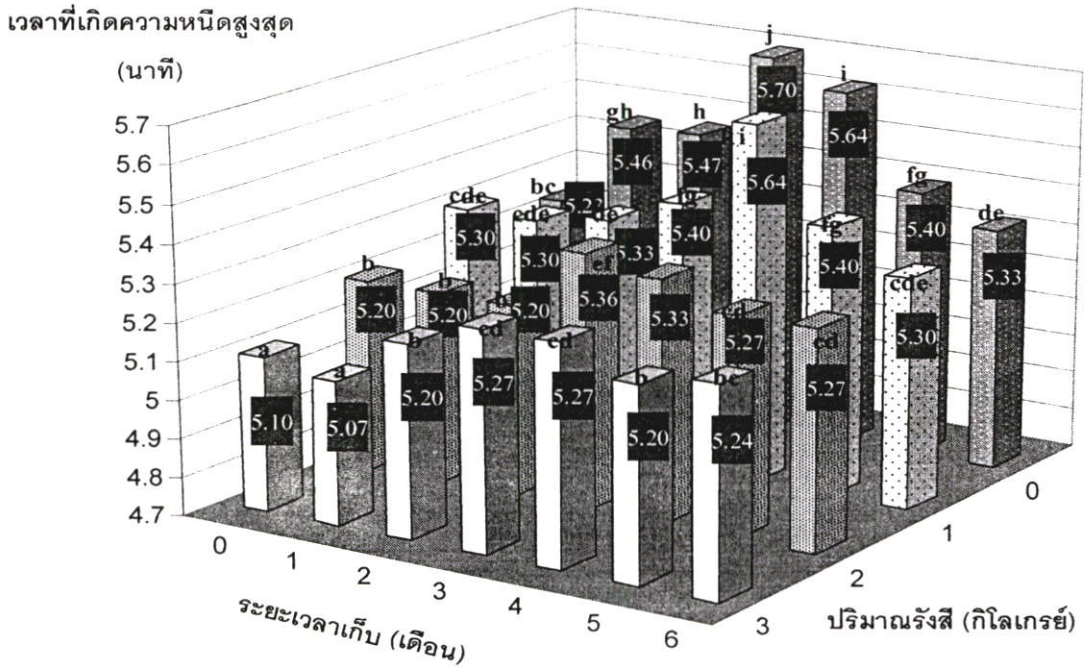
จากผลการทดลองพบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่าการคืนตัวเพิ่มขึ้นจากเมื่อเริ่มเก็บอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บไว้ตั้งแต่ 1 เดือนเป็นต้นไป อาจเนื่องมาจากเมื่อเก็บรักษาไว้นานขึ้นทำให้โมเลกุลของอะไมโลเพคตินปรับเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นกิ่งก้าน (branch chain molecule) เป็นโมเลกุลสายตรง (linear molecule) มากขึ้น (Patindol *et al.*, 2005) เนื่องมาจากการทำงานของเอนไซม์อะไมโลไลติค (amylolytic enzyme) (Chrastill, 1994) ทำให้การคืนตัวสามารถทำได้ดีขึ้น เพราะการคืนตัวนั้นมีทั้งอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งการคืนตัวจะเกิดในส่วนของอะไมโลสก่อนเพราะเป็นโมเลกุลสายตรงจึงสามารถจับกันได้ง่ายกว่า หลังจากนั้นจึงเกิดการคืนตัวกับส่วนของอะไมโลเพคติน (Whistler and Bemiller, 1999)



รูปที่ 4.3 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

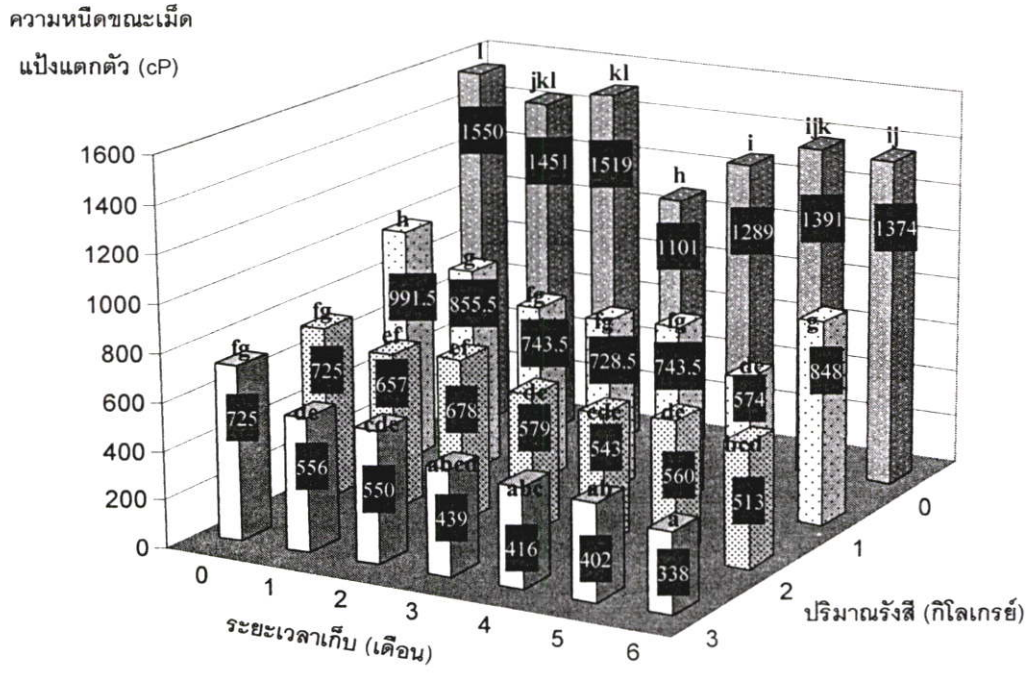
จากรูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อค่าความหนืดสูงสุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 4 ถึง 6 เดือนในข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ



รูปที่ 4.4 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อเวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดของจากแป้งข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

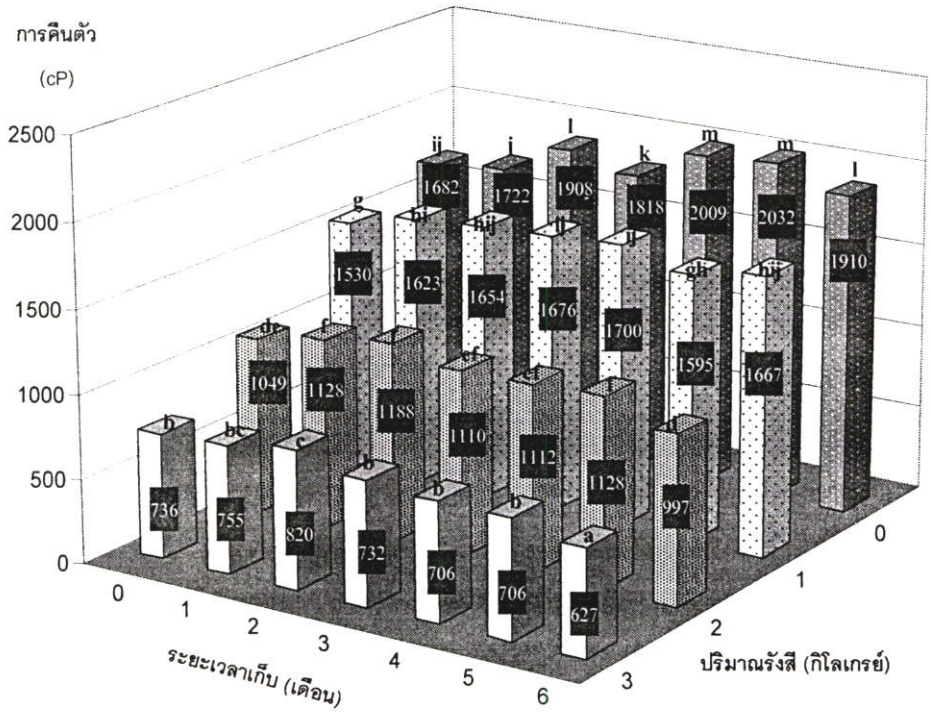
จากรูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อเวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 เดือน และมีค่าต่ำสุดตั้งแต่เมื่อเริ่มเก็บถึงระยะเวลาเก็บ 1 เดือนในข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.5 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากรูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีมีค่าสูงสุดตั้งแต่เริ่มเก็บจนถึงระยะ เวลาเก็บ 2 เดือน และมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ระยะเวลาเก็บ 3 ถึง 6 เดือนในข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ



รูปที่ 4.6 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวของแป้งจากข้าวกล้อง
หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากรูปที่ 4.6 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การคืนตัวของแป้งจากข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสีมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 4 ถึง 5 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือน ในข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การคืนตัวลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ

4.1.2.3 ความแข็ง (hardness) ของข้าวสุก

เมื่อเก็บข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความแข็งของข้าวกล้องหุงสุกทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.10 ถึง 4.12

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความแข็งของข้าวกล้องหุงสุก

sov	df	p - value
		ความแข็ง (hardness)
ปริมาณรังสี	3	0.003*
error	4	
ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*
error	24	
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.243 ns
pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลของรังสีแกมมาในปริมาณที่ต่างกันต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวกล้องแสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลของรังสีแกมมาต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวกล้อง

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความแข็ง (kg.force)
0	4.89 ± 0.43^{d}
1	4.45 ± 0.54^{c}
2	4.18 ± 0.37^{b}
3	3.66 ± 0.45^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.11 พบว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องหุงสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการฉายรังสีที่ปริมาณสูงสุด คือ 3 กิโลเกรย์ ทำให้ข้าวมีความแข็งน้อยที่สุด ส่วนข้าวกล้องที่ไม่ผ่านการฉายรังสีพบว่าข้าวมีความแข็งมากที่สุด อาจเนื่องมาจากข้าวที่ผ่านการฉายรังสีจะมีความแข็งลดลงเนื่องจากรังสีแกมมามีผลทำให้พันธะไกลโคซิดิค (glycosidic) ของสตาร์ชถูกทำลาย ทำให้มีขนาดโมเลกุลสตาร์ชเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ดีขึ้น (Deschreider, 1960) ทำให้เนื้อสัมผัสของข้าวที่ผ่านการฉายรังสีจึงมีความแข็งน้อยลง

ผลของระยะเวลาเก็บต่าง ๆ ต่อความแข็งของข้าวกล้องหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลของระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวกล้องหุงสุก

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ความแข็ง (kg . force)
0	3.76 ± 0.39^{a}
1	3.81 ± 0.62^{a}
2	4.09 ± 0.49^{b}
3	4.41 ± 0.52^{c}
4	4.56 ± 0.46^{c}
5	4.61 ± 0.53^{c}
6	4.83 ± 0.63^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.12 พบว่าระยะเวลาเก็บที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องหุงสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อระยะเวลาเก็บข้าวกล้องนานขึ้น ข้าวกล้องหุงสุกจะมีความแข็งมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่เก็บไว้ 2 เดือน เนื่องจากเมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้นโปรตีนในข้าวซึ่งส่วนใหญ่เป็นออไรเซนิน (oryzenin) (Cass Mutters, 2003) เกิดการรวมตัวระหว่างโปรตีนและสตาร์ช (protein-starch interaction) ภายในข้าว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ (Charstil, 1990) ที่ทดลองเก็บข้าว 6 ชนิด ได้แก่ ข้าวกล้องและข้าวขัดขาวเมล็ดยาว ข้าวกล้องและข้าวขัดขาวเมล็ดปานกลาง และข้าวกล้องและข้าวขัดขาวเมล็ดสั้นไว้เป็นเวลา 10 เดือนแล้วข้าวทุกชนิดมีความนุ่มลดลง

4.1.2.4 การพองตัวเนื่องจากการทอด

เมื่อเก็บข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงการพองตัวเนื่องจากการทอดทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวกล้อง

sov	df	p - value
		การพองตัว
ปริมาณรังสี	3	0.997^{ns}
error	4	
ระยะเวลาเก็บ	6	0.670^{ns}
error	24	
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.429^{ns}
pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.13 พบว่าปริมาณรังสีแกมมา ระยะเวลาเก็บ รวมทั้งอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้การพองตัวของข้าวกล้องเนื่องจากการทอดมีความแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ข้าวที่ไม่ผ่านการฉายรังสีและข้าวที่ผ่านการฉายรังสีที่ 1 2 และ3 กิโลเกรย์ มีการพองตัวจากการทอดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ในการทดลองของ Chinnaswamy (1993) พบว่าเมื่อฉายรังสีในสตาร์ชปริมาณ 10 20 และ 30 กิโลเกรย์ จะทำให้การพองตัวของสตาร์ชลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นหลังจากการเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) และได้สันนิษฐานว่าเกิดจากรังสีแกมมาปริมาณสูงไปตัดกิ่งก้าน (debranching) ของโมเลกุลสตาร์ชทำให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้การพองตัวลดลง แต่ในการทดลองนี้ปริมาณรังสีไม่มีผลต่อการพองตัวของข้าวจากการทอดอาจเนื่องมาจากฉายรังสีในปริมาณที่ต่ำกว่าการทดลองของ Chinnaswamy (1993)

4.1.3 คุณภาพการหุงต้ม (Cooking quality)

เมื่อเก็บข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือน และติดตามผลการเปลี่ยนแปลงคุณภาพการหุงต้มข้าวกล้องทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.14 ถึง 4.16 และ รูปที่ 4.7 ถึง 4.8

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง

sov	df	p - value			
		เวลาต้มสุก	การดูดซึมน้ำ	การขยายตัวของข้าวสุก	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้
ปริมาณรังสี	3	0.002*	0.004*	0.025*	0.000*
error	4				
ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.000*	0.002*	0.000*
error	24				
ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.245ns	0.035*	0.709ns	0.000*
pooled error	24				

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.14 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาต้มสุก (cooking time) การดูดซึมน้ำ (water uptake) การขยายตัวของข้าวสุก (volume expansion) และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (total soluble solid) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้เวลาต้มสุกและการขยายตัวของข้าวสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีผลทำให้การดูดซึมน้ำและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลของรังสีแกมมาในปริมาณต่างกันมีผลต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	คุณภาพการหุงต้ม			
	เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	การขยายตัวของข้าวสุก (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
0	14.9 ± 0.9^{d}	2.8 ± 0.1^{c}	2.9 ± 0.2^{bc}	5.5 ± 1.3^{a}
1	14.2 ± 0.8^{c}	2.8 ± 0.1^{c}	3.0 ± 0.2^{c}	6.6 ± 0.6^{b}
2	13.8 ± 0.9^{b}	2.6 ± 0.1^{b}	2.8 ± 0.1^{b}	8.4 ± 0.6^{c}
3	13.4 ± 0.7^{a}	2.5 ± 0.1^{a}	2.6 ± 0.1^{a}	10.8 ± 0.5^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.15 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีใช้เวลาต้มสุกน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเวลาต้มสุกจะลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองของ Sabularse และคณะ (1991) ที่ฉายรังสีข้าวกล้องปริมาณ 1 และ 2 กิโลเกรย์ พบว่าเวลาต้มสุกน้อยลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากรังสีทำลายโครงสร้างของสตาร์ชทำให้เกิดมีโมเลกุลที่เล็กลง เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้การเกิดเจลาติไนซ์เร็วขึ้นกว่าโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ใช้เวลาต้มสุกน้อยลง (Navanugraha and Grant, 1992) ซึ่งสอดคล้องกับเมื่อใช้ปริมาณรังสีเพิ่มขึ้นจะมีผลให้เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดลดลงในการวัดความหนืดของแป้งจากข้าวกล้องด้วยเครื่อง RVA

การดูดซึมน้ำของข้าวกล้องหุงสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการดูดซึมน้ำของข้าวกล้องฉายรังสีน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่รังสีแกมมาก่อให้เกิดการดีพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลสตาร์ชให้มีขนาดเล็กลงและมีมวลโมเลกุลต่ำ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดแป้งลดลงแต่ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น (El Saadany *et al.*,1979)

ปริมาณรังสีมีผลทำให้การขยายตัวของข้าวสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณ 3 กิโลเกรย์มีการขยายตัวของข้าวสุกต่ำกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีและฉายรังสีที่ปริมาณ 1 และ 2 กิโลเกรย์ อาจเนื่องมาจากรังสีแกมมาทำลายโครงสร้างของเม็ดแป้งทำให้โมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีขนาดเล็กลง ความต้านทานใน

การพองตัวของเม็ดแป้งจึงลดลง ส่งผลให้ข้าวหุงสุกมีการขยายตัวของเมล็ดข้าวน้อยลง (El Saadany *et al.*,1979)

ปริมาณรังสีมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้จากข้าวกล้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น การที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีมากขึ้นอาจเนื่องจากเมื่อข้าวผ่านการฉายรังสีทำให้สตาร์ชแตกตัวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงและเมื่อข้าวผ่านการต้มสุกทำให้โมเลกุลเหล่านี้หลุดออกมาและละลายอยู่ในน้ำมากขึ้น (Kume and Tamura, 1987)

ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้องหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวกล้อง

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	คุณภาพการหุงต้ม			
	เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	การขยายตัว (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
0	13.7 ± 0.7^{a}	2.6 ± 0.2^{a}	2.7 ± 0.1^{a}	8.3 ± 1.7^{d}
1	13.5 ± 0.5^{a}	2.6 ± 0.1^{a}	2.8 ± 0.2^{ab}	8.4 ± 1.8^{d}
2	13.5 ± 0.8^{a}	2.6 ± 0.2^{a}	2.9 ± 0.2^{b}	7.6 ± 2.1^{b}
3	13.4 ± 0.5^{a}	2.6 ± 0.2^{a}	2.9 ± 0.3^{b}	7.7 ± 2.1^{bc}
4	14.1 ± 0.8^{b}	2.6 ± 0.1^{a}	2.8 ± 0.2^{ab}	8.1 ± 2.2^{cd}
5	15.1 ± 0.7^{c}	2.8 ± 0.2^{b}	2.9 ± 0.2^{b}	7.8 ± 2.6^{bc}
6	15.2 ± 0.6^{c}	2.7 ± 0.2^{b}	2.9 ± 0.2^{b}	6.9 ± 3.0^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.16 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาในการต้มสุกสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อมีระยะเวลาเก็บในเดือนที่ 4 และ 5 เมื่อระยะเวลาเก็บนานขึ้นเวลาในการต้มสุกก็เพิ่มมากขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อเก็บข้าวกล้องไว้นานขึ้นไว้เป็นเวลานาน อะไมโลส ไขมัน และโปรตีนจะมาจับกันทำให้มีโมเลกุลเชิงซ้อน (complex molecule) ขนาดใหญ่ขึ้น (Juliano,1985) จึงต้องใช้เวลานานขึ้นในการเกิดเจลาติไนซ์

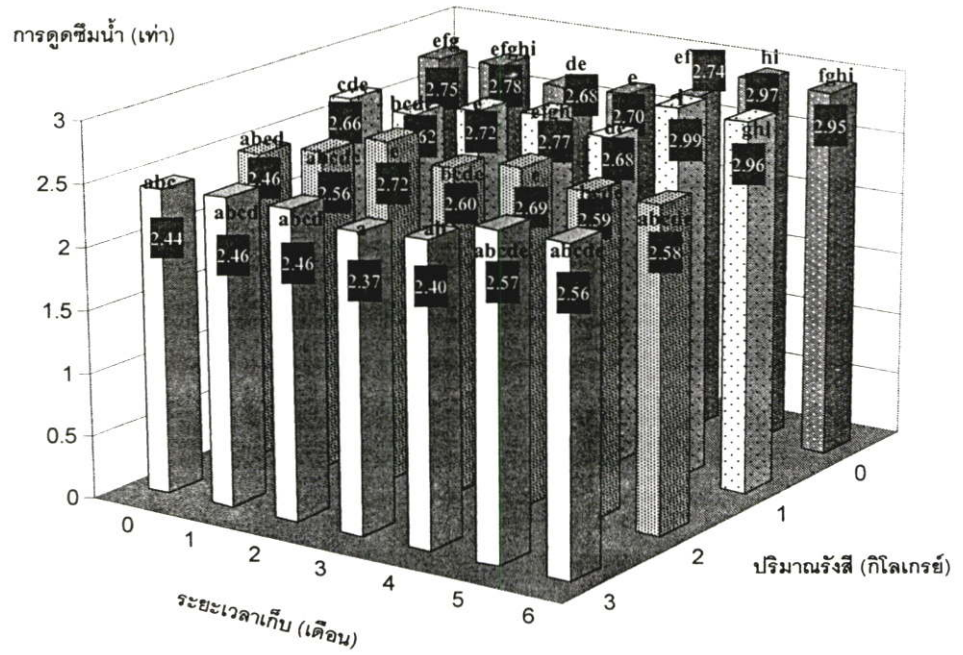
ระยะเวลาในการเก็บมีผลทำให้การดูดซึมน้ำของข้าวกล้องมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อเก็บข้าวกล้องไว้นานขึ้นพบว่ามีการดูดซึมน้ำมากขึ้น โดยข้าวกล้องที่เก็บไว้ตั้งแต่เดือนที่ 5 ขึ้นไป มีการดูดซึมน้ำมากกว่าข้าวที่เก็บไว้ในช่วง 4 เดือนแรกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ระยะเวลาเก็บก็มีผลทำให้การขยายตัวของข้าวสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตั้งแต่เดือนที่ 2 ของการเก็บ อาจเนื่องจากเมื่อมีการเก็บข้าวไว้นานขึ้น โปรตีนในข้าวซึ่งส่วนใหญ่เป็นออไรเซนิน (oryzenin) (Cass Mutters, 2003) เกิดการรวมตัวระหว่างโปรตีนและสตาร์ชภายในข้าว (protein-starch interaction) โมเลกุลของเม็ดแป้งจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้มากขึ้น และทำให้ข้าวสุกมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าข้าวหุงสุกจากข้าวเก่าจะหุงขึ้นหม้อ คือมีการขยายตัวของเมล็ดข้าวมากกว่าข้าวใหม่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547)

ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้จะลดลงเมื่อเก็บไว้ตั้งแต่เดือนที่ 2 เป็นต้นไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจเป็นเพราะข้าวใหม่เมื่อนำมาหุงต้ม เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและมีโมเลกุลขนาดเล็กหลุดออกมามากกว่าข้าวเก่า แต่เมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้นจะเกิดการจับกันของโปรตีนและสตาร์ชทำให้เม็ดแป้งมีความสามารถละลายได้ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) อีกทั้งมีรายงานว่าปริมาณน้ำตาลนอนรีดิวซ์ (non reducing sugar) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดลดลงเมื่อเก็บข้าวไว้นาน 5 เดือน (Barber, 1972)

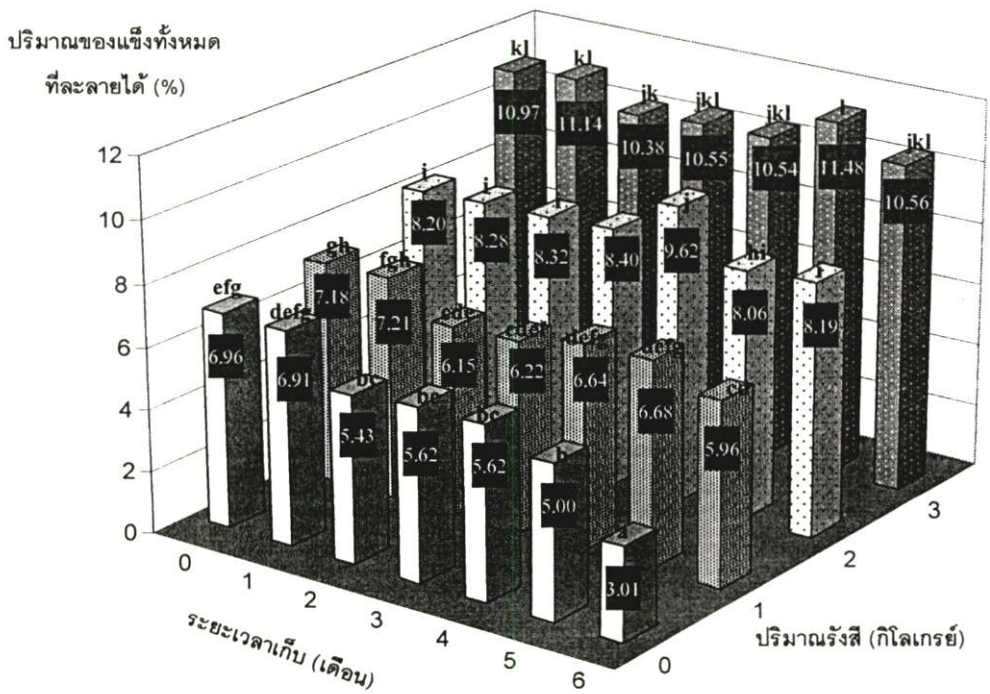
รูปที่ 4.7 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการดูดซึมน้ำมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การดูดซึมน้ำมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 เดือนของข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ และมีค่าต่ำสุดที่ทุกระยะเวลาเก็บข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์

รูปที่ 4.8 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 3 ถึง 6 เดือนของข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือนของข้าวกล้องที่ไม่ฉายรังสี และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ



รูปที่ 4.7 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการดูดซึมน้ำของข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.8 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวกล้อง

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.1.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (sensory test)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุกจากข้าวกล้องที่ฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ และมีระยะเวลาเก็บนาน 6 เดือน โดยให้ผู้ทดสอบ 20 คน ให้คะแนนตามความพึงพอใจ 9 ระดับ (9 point hedonic scale) (Larmond, 1977) ทดสอบในด้านของสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของตัวอย่างทั้งในข้าวหุงสุกอุ่นอุณหภูมิประมาณ 45°ซ. และในข้าวหุงสุกเย็นที่ตั้งไว้ในอุณหภูมิห้อง (28 – 30°ซ.) ประมาณ 3 ชั่วโมง ได้ผลดังตารางที่ 4.17 ถึง 4.18

ตารางที่ 4.17 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกอุ่นในแต่ละระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
		0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.8^{b}	7.6^{ns}	7.5^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}
	1	7.7^{b}	7.6^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	2	7.0^{a}	7.3^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}	6.9^{ns}
	3	6.8^{a}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	6.7^{ns}	6.6^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{ns}
กลิ่น	0	7.0^{b}	7.6^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	1	6.9^{b}	7.5^{ns}	7.3^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	2	6.2^{ab}	7.2^{ns}	6.8^{ns}	6.7^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.7^{ns}
	3	5.8^{a}	7.0^{ns}	6.5^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{ns}
รสชาติ	0	7.6^{b}	7.8^{ns}	7.8^{ns}	7.5^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.2^{ns}
	1	7.3^{ab}	7.6^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}
	2	6.9^{ab}	7.6^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	6.9^{ns}
	3	6.4^{a}	7.5^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	6.8^{ns}	6.7^{ns}
เนื้อสัมผัส	0	7.8^{b}	7.8^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	1	7.6^{ab}	7.8^{ns}	7.6^{ns}	7.6^{ns}	7.5^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}
	2	7.1^{ab}	7.7^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	3	6.6^{a}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.1^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.18 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกเย็นในแต่ละระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
		0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.7^{c}	7.4^{ns}	7.6^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.6^{ns}	7.6^{ns}
	1	7.6^{bc}	7.5^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}
	2	7.1^{ab}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.3^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}
	3	6.8^{a}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.5^{ns}	6.6^{ns}
กลิ่น	0	6.7^{ns}	7.4^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	1	6.6^{ns}	7.1^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	6.8^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}
	2	6.1^{ns}	7.0^{ns}	6.7^{ns}	6.7^{ns}	6.7^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}
	3	6.1^{ns}	6.5^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}
รสชาติ	0	7.5^{b}	7.8^{b}	7.5^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}
	1	7.2^{ab}	7.7^{ab}	7.2^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.3^{ns}
	2	6.8^{ab}	7.3^{ab}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	6.9^{ns}
	3	6.3^{a}	7.0^{a}	6.9^{ns}	6.7^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.7^{ns}
เนื้อสัมผัส	0	7.8^{b}	7.8^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	1	7.5^{ab}	7.5^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}
	2	7.4^{ab}	7.6^{ns}	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}
	3	6.8^{a}	7.3^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.17 และ ตารางที่ 4.18 แสดงคะแนนเฉลี่ยของผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องหุงสุกอุ่นและเย็นตามลำดับ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ในแต่ละเดือนเป็นเวลา 6 เดือน ซึ่งพบว่า

การทดสอบข้าวกล้องในเดือนที่เริ่มเก็บ (เดือน 0) ปริมาณรังสีมีผลทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านสี รสชาติ และเนื้อสัมผัสของทั้งข้าวกล้องหุงสุกอุ่นและเย็น และคะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่นของข้าวหุงสุกอุ่นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่คะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่นของข้าวหุงสุกเย็นไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

หลังจากเก็บไว้นาน 1 เดือนคะแนนเฉลี่ยด้านสี กลิ่น และเนื้อสัมผัส ของทั้งข้าวกล้องหุงสุกอุ่นและเย็น และคะแนนเฉลี่ยด้านรสชาติของทั้งข้าวกล้องหุงสุกอุ่นที่ฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่คะแนนเฉลี่ยด้านรสชาติของข้าวกล้องหุงสุกเย็นที่ฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ ยังคงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

แต่หลังจากเก็บไว้นาน 2 เดือนขึ้นไป คะแนนเฉลี่ยด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ของทั้งข้าวกล้องหุงสุกอุ่นและเย็นที่ฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีเมื่อเริ่มเก็บ (เดือน 0) มีคะแนนด้านสีแตกต่างจากข้าวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในข้าวหุงสุกอุ่นและเย็น เมื่อฉายรังสีปริมาณตั้งแต่ 2 กิโลเกรย์ขึ้นไป อาจเนื่องมาจากข้าวกล้องที่ฉายรังสีจะมีสีเข้มกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสี ทำให้ผู้ทดสอบมีความชอบน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองวัดค่า b โดยใช้เครื่อง chromameter โดยพบว่าข้าวที่มีการฉายรังสีมีสีเหลือง (ค่า b) มากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี

ข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีเมื่อเริ่มเก็บ (เดือน 0) โดยเฉพาะข้าวที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ จะได้คะแนนด้านกลิ่นของข้าวหุงสุกอุ่น และคะแนนด้านรสชาติและเนื้อสัมผัสทั้งของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในด้านของกลิ่นและรสชาตินั้นอาจเกิดเนื่องมาจากเมื่อมีการฉายรังสีค่า TBA จะเพิ่มขึ้น ทำให้ข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีมีกลิ่นหืนมากกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ผู้ทดสอบจึงให้การยอมรับน้อยกว่า ส่วนด้านเนื้อสัมผัสของทั้งข้าวหุงสุกอุ่นและเย็น ผู้ทดสอบให้คะแนนการยอมรับข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีน้อยกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งอาจเนื่องมาจากข้าวกล้องที่ผ่านการฉายรังสีมีลักษณะของเนื้อสัมผัสที่เละและแฉะ ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบความแข็งของข้าวด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (ตารางที่ 4.11) ที่พบว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่าความแข็งต่ำกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสี ทั้งยังสัมพันธ์กับการทดสอบความหนืดของแป้งโดยใช้เครื่อง RVA ซึ่งพบว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสีมีค่าการคืนตัวต่ำกว่าข้าวที่ไม่มีการฉายรังสี โดยค่าการคืนตัวนี้สามารถใช้บอกถึงความแข็งของข้าวสุกได้ ถ้าค่าคืนตัวสูงข้าวสุกก็จะแข็ง

แม้ว่าผู้ทดสอบให้คะแนนด้านสี กลิ่น รสชาติและเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องไม่ฉายรังสีที่หุงสุกทั้งอุ่นและเย็นมากกว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสี แต่คะแนนของข้าวกล้องหุงสุกที่ฉายรังสีก็ยังอยู่ในระดับที่ผู้ทดสอบมีความชอบ (คะแนนมากกว่า 5 ขึ้นไป)

4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูง

4.2.1 คุณสมบัติทางเคมี

เมื่อเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวอะไมโลสสูงที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value		
			ปริมาณอะไมโลส	ค่า TBA	ปริมาณกรดไขมันอิสระ
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.843^{ns}	N.D.	0.148^{ns}
	error	4			
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.477^{ns}	N.D.	0.483^{ns}
	error	24			
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.225^{ns}	N.D.	0.303^{ns}
	pooled error	24			
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.915^{ns}	N.D.	0.560^{ns}
	error	4			
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.846^{ns}	N.D.	0.191^{ns}
	error	24			
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.419^{ns}	N.D.	0.305^{ns}
	pooled error	24			

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

N.D. หมายถึง ไม่สามารถวัดค่าได้ (non-detectable)

จากตารางที่ 4.19 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ส่วนอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บก็ไม่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสของข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

การที่ปริมาณรังสีไม่มีผลต่อปริมาณอะไมโลสอาจเป็นไปได้ว่าปริมาณรังสีที่ใช้ต่ำจึงไม่มีผลต่อปริมาณของอะไมโลส ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wu และคณะ (2002) ที่ฉายรังสีปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์กับข้าวอะไมโลสสูงแล้วพบว่าปริมาณรังสีไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอะไมโลส

พบว่าระยะเวลาเก็บไม่มีผลต่อปริมาณอะไมโลสเช่นเดียวกับผลการทดลองของ Noomhorm และคณะ (1997) ที่ทำการเก็บข้าวพันธุ์ RD6 และ RD 8 ไว้นาน 4 เดือน แต่ Chrastil (1990) ได้รายงานว่าปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บข้าวไว้นาน 12 เดือน

จากการทดลองไม่สามารถหาค่า TBA ได้ เนื่องจากปริมาณไขมันในข้าวขัดขาวมีน้อยมาก ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทดสอบปริมาณไขมันในข้าวอะไมโลสสูงแล้วพบว่ามีปริมาณเพียง 0.32 % ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลของ Lorenz และ Kulp (1991) ที่พบว่ามีปริมาณไขมันในข้าวขัดขาว 0.45 % ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันจึงเกิดขึ้นน้อยจนไม่สามารถตรวจวัดได้

จากการทดลองปริมาณรังสีไม่มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Vacat และ Harms-Ringdahl (1986) ที่ฉายรังสีแป้งข้าวปริมาณ 1 ถึง 4 กิโลเกรย์ แล้วพบว่าไม่มีผลทำให้ปริมาณของกรดไขมันอิสระเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อฉายรังสีปริมาณสูงถึง 63 กิโลเกรย์ จะมีผลให้ปริมาณกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้น

ส่วนระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งอาจเนื่องจากในข้าวขัดขาวมีปริมาณไขมันอยู่น้อยดังที่กล่าวแล้วข้างต้น ทำให้ไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงการเปลี่ยนแปลง

4.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.2.2.1. การวัดค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวอะไมโลสสูง

เมื่อเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงสีโดยใช้เครื่อง Chromameter ของข้าวทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุกที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.20 - 4.22

ตารางที่ 4.20 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p – value	
			ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.032*
	error	4		
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.193ns
	error	24		
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.496ns	0.669ns
	pooled error	24		
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.006*	0.002*
	error	4		
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.225ns
	error	24		
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.594ns	0.125ns
	pooled error	24		

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.20 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า b ของทั้งข้าวสารและข้าวหุงสุกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ส่วนระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่า b ของข้าวสารอะไมโลสสูงที่บรรจุแบบมีอากาศและสุญญากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ไม่มีผลทำให้ค่า b ของข้าวหุงสุกทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ด้านอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่า b ของข้าวอะไมโลสสูงทั้งของข้าวสารและข้าวหุงสุกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ผลของรังสีแกมมาในปริมาณที่ต่างกันต่อค่าสีเหลืองของข้าวอะไมโลสสูงทั้งของข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ผลของปริมาณรังสีต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวอะไมโลสสูง

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ค่าสีเหลือง			
	บรรจุแบบมีอากาศ		บรรจุแบบสุญญากาศ	
	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
0	9.766 ± 0.52^{a}	2.84 ± 0.39^{a}	9.56 ± 0.49^{a}	3.14 ± 0.67^{a}
1	11.37 ± 0.79^{b}	4.87 ± 0.77^{b}	11.29 ± 0.84^{b}	4.24 ± 0.42^{b}
2	12.70 ± 0.73^{c}	5.91 ± 0.75^{c}	12.61 ± 0.92^{c}	5.51 ± 0.52^{c}
3	14.12 ± 1.17^{d}	6.55 ± 0.66^{c}	14.02 ± 0.97^{d}	6.46 ± 0.47^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.21 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า b ของข้าวอะไมโลสสูงทั้งของข้าวสารและข้าวหุงสุกทั้งที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศเพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยทั้งข้าวสารและข้าวหุงสุกทั้งที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศมีค่า b เพิ่มขึ้นตามลำดับของการฉายรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองเป็นเช่นเดียวกับกรณีของข้าวกล้องและสอดคล้องกับผลการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhom (2005) รวมทั้งของ Kang และ Byun (1996) การที่มีสีเหลืองมากขึ้นนี้คาดว่าเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าวกล้อง

ผลของระยะเวลาเก็บที่มีต่อค่าสีเหลืองของข้าวอะไมโลสสูงทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวอะไมโลสสูง

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ค่าสีเหลือง			
	บรรจุแบบมีอากาศ		บรรจุแบบสุญญากาศ	
	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก^{ns}	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก^{ns}
0	11.06 ± 1.06^{a}	4.76 ± 1.60	10.93 ± 1.40^{a}	4.85 ± 1.60
1	11.46 ± 1.54^{ab}	5.04 ± 1.75	11.57 ± 1.55^{ab}	4.76 ± 1.43
2	12.01 ± 1.92^{bc}	5.06 ± 1.60	11.95 ± 1.84^{bcd}	5.16 ± 1.38
3	11.99 ± 1.80^{bc}	5.26 ± 1.83	11.69 ± 2.07^{bc}	5.17 ± 1.48
4	12.11 ± 1.88^{bc}	5.05 ± 1.47	12.02 ± 1.94^{bcd}	4.28 ± 1.34
5	12.25 ± 2.29^{c}	5.11 ± 1.63	12.38 ± 2.05^{cd}	4.92 ± 1.28
6	13.08 ± 2.04^{d}	5.03 ± 1.60	12.54 ± 2.19^{d}	4.76 ± 1.43

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึง ค่าตัวเลขในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.22 พบว่าระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่า b ของข้าวหุงสุกทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่มีผลทำให้ค่า b ของข้าวสารทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หลังจากเก็บไว้นานตั้งแต่ 2 เดือนขึ้นไป ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าวกล้อง แต่จากการทดลองพบว่าระยะเวลาเก็บไม่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของข้าวหุงสุก เนื่องจากเมื่อนำข้าวสารมาหุงเป็นข้าวหุงสุก เมล็ดข้าวจะมีการขยายตัวทำให้สีของเมล็ดข้าวสุกจางลงจนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.2.2.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูง

เมื่อเก็บรักษาข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงโดยใช้เครื่อง RVA ที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.23 – 4.25 และรูปที่ 4.9 – 4.14

ตารางที่ 4.23 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value			
			ความหนืดสูงสุด (peak viscosity)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak time)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (breakdown)	การคืนตัว (set back)
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.000*	0.008*	0.017*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000*	0.294ns	0.000*	0.038*
	pooled error	24				
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.025*	0.000*	0.000*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.009*	0.019*	0.019*	0.000*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.002*	0.263ns	0.002*	0.000*
	pooled error	24				

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.23 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของแป้งข้าว แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ด้านอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แต่ไม่มีผลทำให้เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง แสดงดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ผลของปริมาณรังสีต่อค่าความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความหนืดสูงสุด (cP)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (นาที)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (cP)	การคืนตัว (cP)
แบบมีอากาศ	0	2862 ± 348^{d}	5.54 ± 0.09^{d}	936 ± 140^{d}	2081 ± 68^{d}
	1	1901 ± 136^{c}	5.47 ± 0.05^{c}	728 ± 114^{c}	1518 ± 118^{c}
	2	1161 ± 117^{b}	5.32 ± 0.05^{b}	408 ± 155^{b}	863 ± 62^{b}
	3	856 ± 103^{a}	5.23 ± 0.05^{a}	336 ± 87^{a}	544 ± 52^{a}
แบบสุญญากาศ	0	2848 ± 331^{d}	5.52 ± 0.08^{d}	918 ± 181^{c}	2072 ± 119^{d}
	1	1885 ± 93^{c}	5.46 ± 0.06^{c}	708 ± 87^{b}	1529 ± 128^{c}
	2	1232 ± 262^{b}	5.33 ± 0.07^{b}	420 ± 178^{a}	842 ± 62^{b}
	3	839 ± 68^{a}	5.24 ± 0.05^{a}	377 ± 70^{a}	543 ± 38^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะบรรจุเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.24 พบว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศเป็นเช่นเดียวกับข้าวกล้อง

ตารางที่ 4.25 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความหนืดของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ความหนืดสูงสุด (cP)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (นาที)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (cP)	การคืนตัว (cP)
แบบมีอากาศ	0	1547 ± 630^{a}	5.34 ± 0.10^{a}	639 ± 117^{bc}	1222 ± 575^{ab}
	1	1668 ± 718^{abc}	5.34 ± 0.11^{a}	692 ± 227^{c}	1227 ± 637^{ab}
	2	1614 ± 814^{a}	5.35 ± 0.13^{ab}	577 ± 266^{ab}	1216 ± 640^{a}
	3	1636 ± 806^{ab}	5.38 ± 0.13^{bc}	573 ± 244^{ab}	1292 ± 640^{bc}
	4	1769 ± 924^{bc}	5.42 ± 0.14^{cd}	574 ± 309^{ab}	1232 ± 641^{ab}
	5	1818 ± 925^{c}	5.43 ± 0.15^{d}	546 ± 363^{a}	1257 ± 666^{abc}
	6	1815 ± 1041^{c}	5.48 ± 0.17^{e}	614 ± 389^{abc}	1317 ± 668^{c}
แบบสุญญากาศ	0	1553 ± 632^{a}	5.32 ± 0.10^{a}	633 ± 147^{abc}	1153 ± 576^{a}
	1	1633 ± 722^{ab}	5.33 ± 0.12^{a}	672 ± 159^{c}	1202 ± 593^{ab}
	2	1641 ± 803^{ab}	5.36 ± 0.12^{a}	642 ± 258^{bc}	1276 ± 667^{cd}
	3	1805 ± 826^{b}	5.37 ± 0.11^{ab}	576 ± 257^{ab}	1234 ± 637^{bc}
	4	1708 ± 877^{ab}	5.40 ± 0.13^{bc}	566 ± 278^{ab}	1287 ± 648^{cd}
	5	1758 ± 930^{b}	5.44 ± 0.13^{cd}	548 ± 313^{a}	1263 ± 654^{bcd}
	6	1811 ± 1015^{b}	5.47 ± 0.16^{d}	600 ± 402^{abc}	1308 ± 710^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะการบรรจุเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.25 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%เมื่อมีระยะเวลาเก็บนานขึ้นทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Dhaliwal และคณะ (1991) ที่เก็บรักษาข้าวพันธุ์ IR-8 PR-108 และ Basmati 370 ไว้นาน 12 เดือน แล้วมีผลให้ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บ และตรวจพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ไดแอสเทส (diastase enzyme) ลดลง จึง

สันนิษฐานว่าเป็นเหตุให้ความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นซึ่งได้ผลการทดลองที่ตรงกันข้ามกับในข้าวกล้องที่เมื่อมีระยะเวลาเก็บนานขึ้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากอายุหลังการเก็บเกี่ยวที่แท้จริงของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูงไม่เท่ากัน ดังนั้นปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในข้าวจึงไม่เหมือนกัน

จากการทดลอง เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาข้าวอะไมโลสสูงนานขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการจับกันระหว่างโปรตีนและสตาร์ชซึ่งส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดเจลาติไนซ์ได้ยาก ทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งเพิ่มขึ้น ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับในข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ

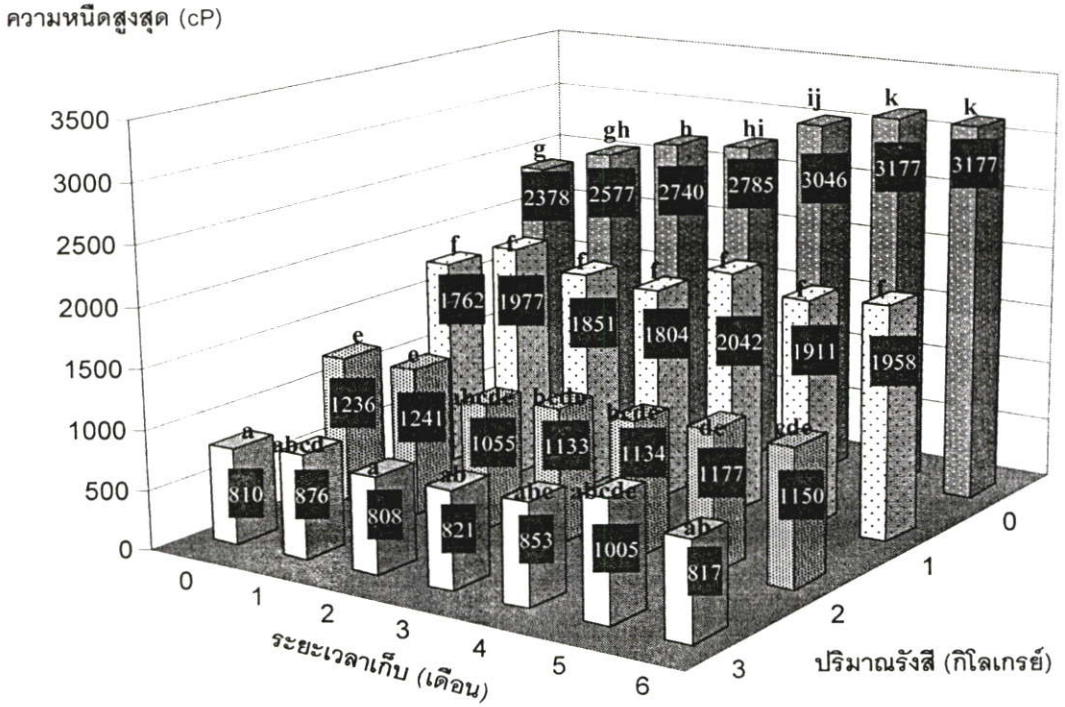
สำหรับค่าความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้ง พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่าความหนืดจากการแตกตัวของเม็ดแป้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งเมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้นค่าที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Noomhorm และคณะ (1997) ที่ทำการเก็บข้าวพันธุ์ RD6 และ RD8 ไว้เป็นเวลา 8 เดือน และการทดลองของ Sririisoontaralak และ Noomhorm (2007) ที่ทำการฉายรังสีในข้าวขาวดอกมะลิ 105 แล้วเก็บไว้เป็นเวลา 12 เดือน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการจับกันระหว่างโปรตีนและสตาร์ชซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับในข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ

การคืนตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เมื่อมีระยะเวลาเก็บนานขึ้นทั้งในการบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าวกล้อง อาจเนื่องมาจากเมื่อเก็บข้าวไว้นานขึ้นมีการรวมตัวกันระหว่างโปรตีนและสตาร์ชเป็นผลให้มีโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นมีผลให้การคืนตัวดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของละมุล วิเศษ (2541) ที่เก็บรักษาข้าวกล้องพันธุ์ขาวมะลิ 105 ไว้เป็นเวลา 7 เดือน และเช่นเดียวกับการทดลองของ Zhou และคณะ (2003) ที่เก็บข้าวพันธุ์ Kosshihikari Kyeema และ Doongara เป็นเวลา 12 เดือน

รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ ค่าความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 และ 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดทุกระยะเวลาเก็บในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ ส่วนค่าความหนืดสูงสุดของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดทุกระยะเวลาเก็บในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ

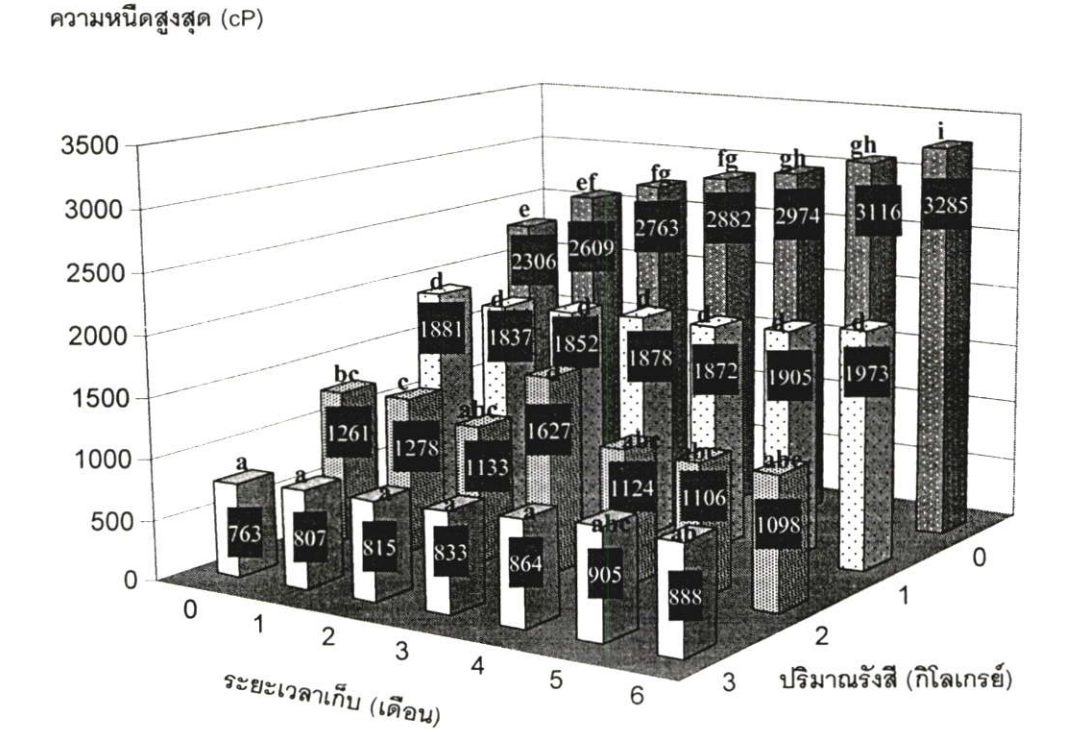
รูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 และ 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 – 6 เดือนในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ ส่วนความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 3 และ 6 เดือนในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ

รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บทำให้การคืนตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งการบรรจุแบบมีอากาศและสุญญากาศตามลำดับ การคืนตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดทุกระยะเวลาเก็บ และมีค่าต่ำสุดทุกระยะเวลาเก็บในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ ส่วนการคืนตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 4 และ 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดทุกระยะเวลาเก็บในข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การคืนตัวลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บ



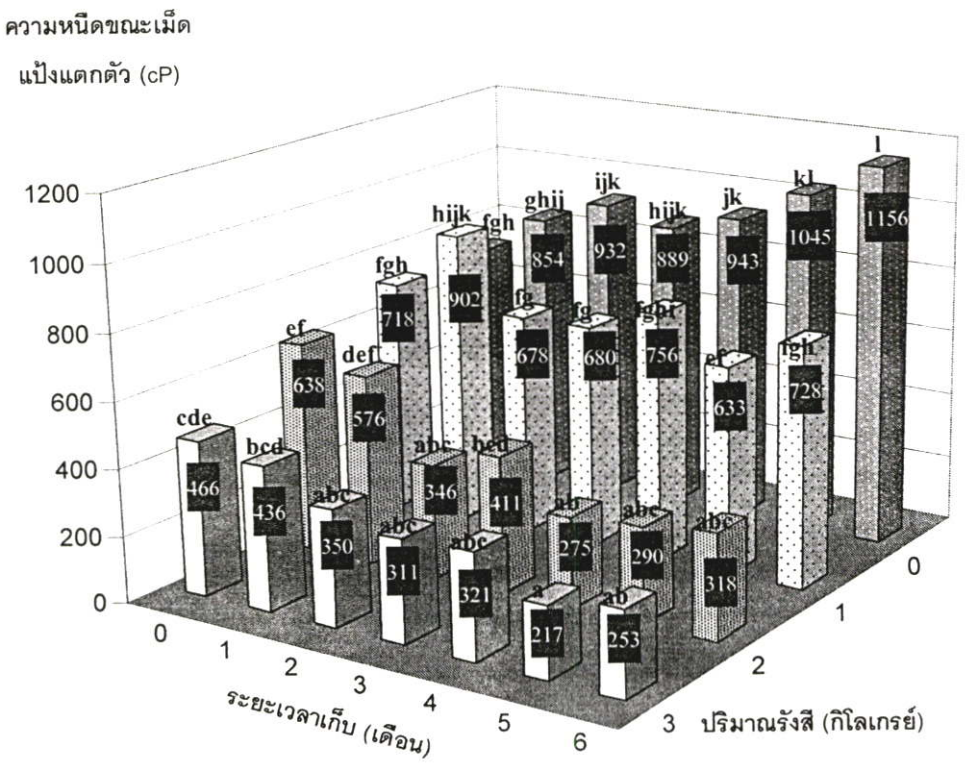
รูปที่ 4.9 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุดของข้าวอะไมโลสสูง ในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

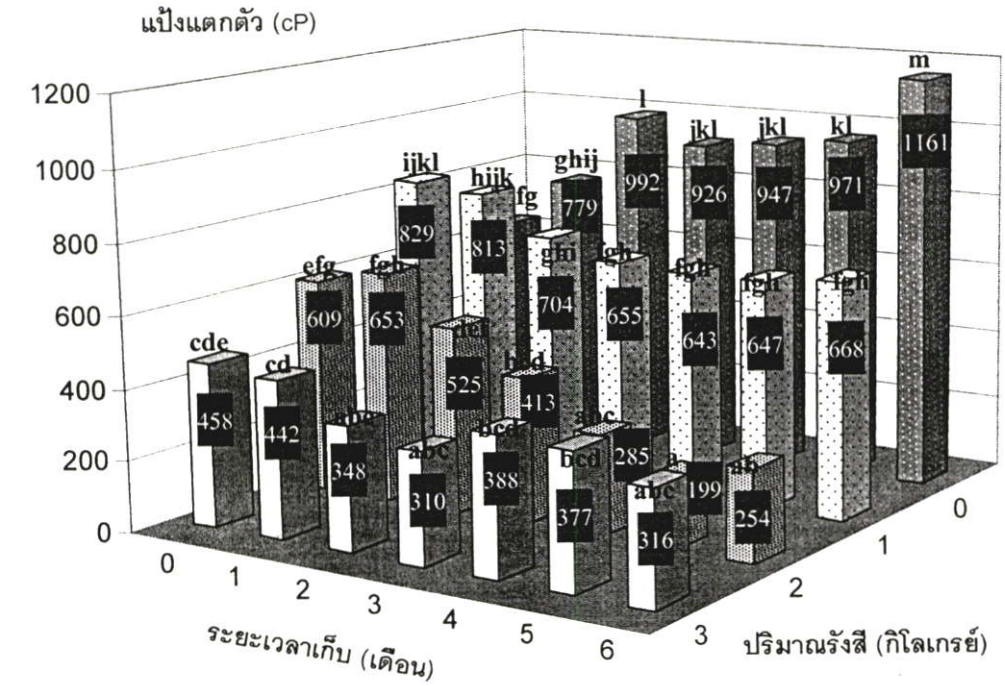


รูปที่ 4.10 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดสูงสุดของข้าวอะไมโลสสูง ในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



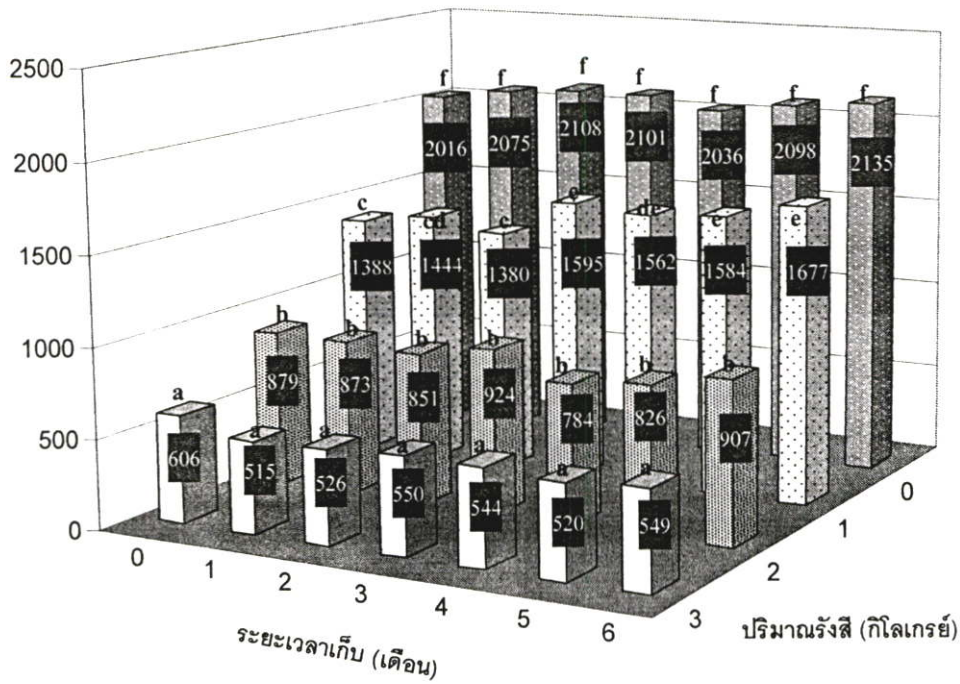
รูปที่ 4.11 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ



รูปที่ 4.12 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวของแป้งจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

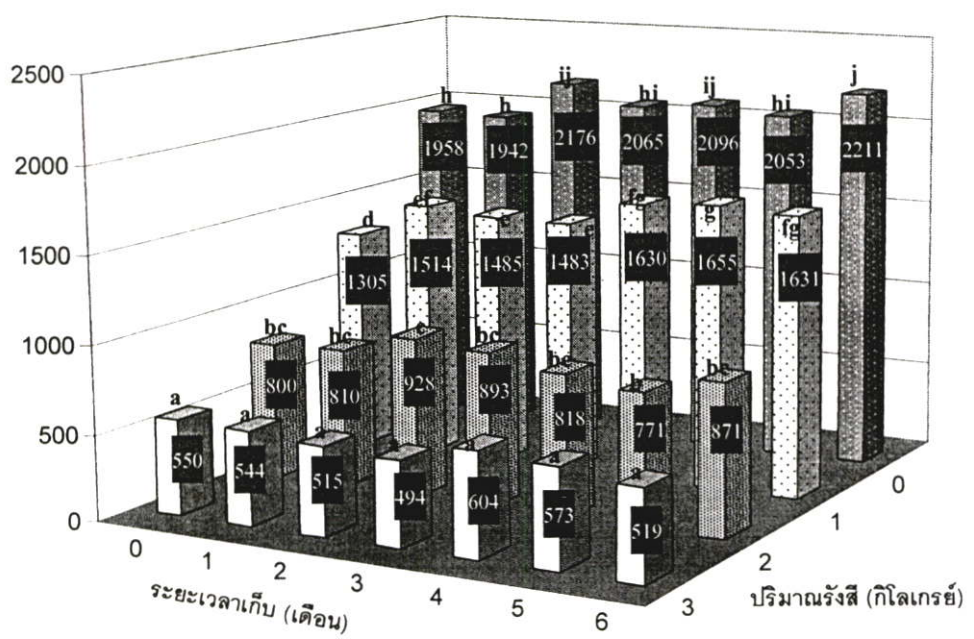
การคืนตัว(cP)



รูปที่ 4.13 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การคืนตัว(cP)



รูปที่ 4.14 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อการคืนตัวข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.2.3 ความแข็ง (hardness) ของข้าวสุกอะไมโลสสูง

เมื่อเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของความแข็งโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.26 - 4.28 และรูปที่ 4.15 - 4.16

ตารางที่ 4.26 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value
			ความแข็ง (hardness)
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.009*
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000*
	pooled error	24	
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.011*
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000*
	pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.26 พบว่าปริมาณรังสี ระยะเวลาเก็บ และอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

รังสีแกมมาในปริมาณที่ต่างกันมีผลต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูง แสดงดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูง

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความแข็ง (kg.force)	
	บรรจุแบบมีอากาศ	บรรจุแบบสุญญากาศ
0	6.96 ± 0.39^{d}	6.95 ± 0.34^{d}
1	6.55 ± 0.32^{c}	6.54 ± 0.34^{c}
2	6.41 ± 0.36^{b}	6.41 ± 0.37^{b}
3	6.01 ± 0.50^{a}	5.97 ± 0.48^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.27 พบว่าปริมาณรังสีที่ต่างกันมีผลทำให้ความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยการฉายรังสีที่ปริมาณสูงสุด คือ 3 กิโลเกรย์ ทำให้ข้าวมีความแข็งน้อยที่สุด ส่วนข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ผ่านการฉายรังสีพบว่าข้าวมีความแข็งมากที่สุด และผลของปริมาณรังสีต่อค่าความแข็งมีผลการทดลองเช่นเดียวกันกับในข้าวกล้อง

ระยะเวลาเก็บมีผลต่อความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูง แสดงดังตารางที่ 4.28

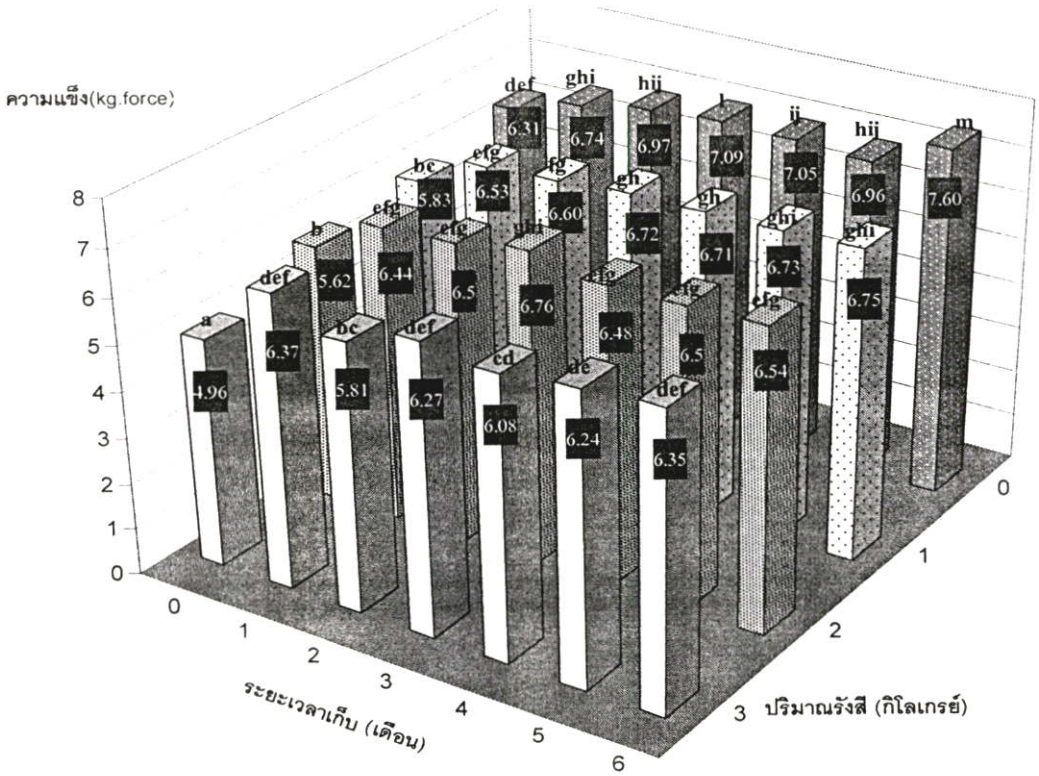
ตารางที่ 4.28 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูง

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ความแข็ง (kg.force)	
	บรรจุแบบมีอากาศ	บรรจุแบบสุญญากาศ
0	5.68 ± 0.52^{a}	5.68 ± 0.52^{a}
1	6.52 ± 0.18^{b}	6.52 ± 0.18^{b}
2	6.47 ± 0.46^{b}	6.47 ± 0.46^{b}
3	6.71 ± 0.34^{cd}	6.71 ± 0.34^{c}
4	6.58 ± 0.40^{bc}	6.62 ± 0.45^{bc}
5	6.61 ± 0.30^{bc}	6.64 ± 0.42^{bc}
6	6.81 ± 0.52^{d}	6.64 ± 0.44^{bc}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

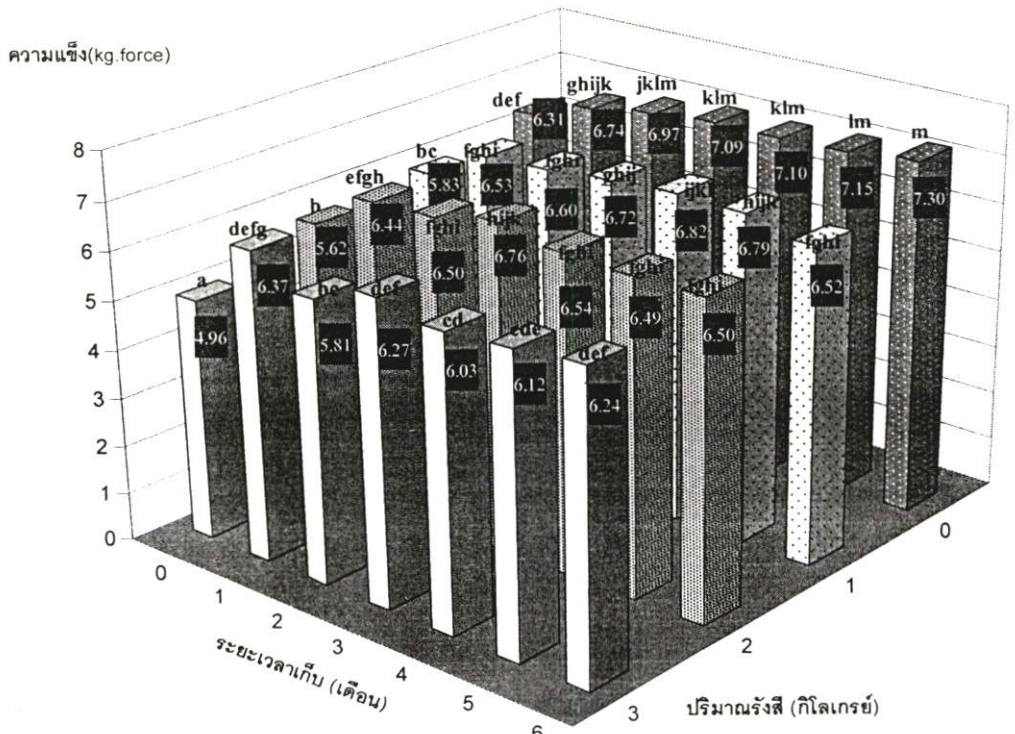
จากตารางที่ 4.28 พบว่าระยะเวลาเก็บที่นานขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ความแข็งของข้าวหุงสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระยะเวลาเก็บ 1 เดือนเป็นต้นไปทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความแข็งของข้าวอะไมโลสสูงหุงสุกเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

รูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือนและมีค่าต่ำสุดเมื่อเริ่มเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ ส่วนความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 – 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดเมื่อเริ่มเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.15 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.16 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีแกมมาและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวสุกจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.2.4 การพองตัวเนื่องจากการทอด

เมื่อเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือน และติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของค่าการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวอะไมโลสสูงที่มีสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.29

ตารางที่ 4.29 การวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value
			การพองตัวเนื่องจากการทอด
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.978^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.910^{ns}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.942^{ns}
	pooled error	24	
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.922^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.829^{ns}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.697^{ns}
	pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.29 พบว่าปริมาณรังสี ระยะเวลาเก็บ และอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้การพองตัวจากการทอดของข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งการพองตัวจากการทอดของข้าวอะไมโลสสูงไม่แตกต่างกันโดยมีผลการทดลองเช่นเดียวกันกับในข้าวกล้อง

4.2.3 คุณสมบัติการหุงต้ม (cooking quality)

เมื่อเก็บข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการหุงต้มจากข้าวอะไมโลสสูงในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.30 - 4.32

ตารางที่ 4.30 การวิเคราะห์ความแปรปรวนคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value			
			เวลาต้มสุก	การดูดซึมน้ำ	การขยายตัวของข้าวสุก	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.002*	0.025*	0.035*	0.003*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000*	0.000*	0.000*	0.000*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.098ns	0.878ns	0.500ns	0.725ns
	pooled error	24				
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.035*	0.015*	0.003*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.005*	0.000*	0.000*	0.000*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.090ns	0.554ns	0.843ns	0.445ns
	pooled error	24				

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.30 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาต้มสุก การดูดซึมน้ำ การขยายตัวของข้าวสุก และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้เวลาต้มสุก การดูดซึมน้ำ การขยายตัวของข้าวสุก และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ผลของรังสีแกมมาในปริมาณต่างกันต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง แสดงดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 ผลของปริมาณรังสีต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	การขยายตัวของข้าวสุก (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
แบบมีอากาศ	0	17.9 ± 0.8^{c}	3.3 ± 0.2^{c}	3.6 ± 0.3^{d}	4.4 ± 0.6^{a}
	1	17.6 ± 0.6^{c}	3.3 ± 0.2^{bc}	3.5 ± 0.2^{c}	5.9 ± 0.7^{b}
	2	16.1 ± 0.5^{b}	3.2 ± 0.2^{ab}	3.4 ± 0.3^{b}	7.7 ± 0.8^{c}
	3	15.4 ± 0.5^{a}	3.1 ± 0.2^{a}	3.3 ± 0.3^{a}	9.5 ± 0.5^{d}
แบบสุญญากาศ	0	17.7 ± 0.8^{c}	3.4 ± 0.2^{b}	3.5 ± 0.2^{b}	4.7 ± 0.5^{a}
	1	17.4 ± 0.5^{c}	3.3 ± 0.2^{b}	3.5 ± 0.2^{b}	6.2 ± 0.5^{b}
	2	15.9 ± 0.6^{b}	3.2 ± 0.3^{b}	3.4 ± 0.3^{a}	7.6 ± 0.8^{c}
	3	15.4 ± 0.5^{a}	3.1 ± 0.2^{a}	3.3 ± 0.3^{a}	9.6 ± 0.4^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะการบรรจุเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.31 พบว่าข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีใช้เวลาต้มสุกน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยเวลาต้มสุกน้อยลงเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งผลของปริมาณรังสีต่อเวลาต้มสุกของข้าวอะไมโลสสูงเป็นเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

ปริมาณรังสีมีผลทำให้การดูดซึมน้ำของข้าวอะไมโลสสูงลดลงกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยการดูดซึมน้ำของข้าวอะไมโลสสูงน้อยลงเมื่อมีการฉายรังสีในปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์ในข้าวอะไมโลสสูงที่บรรจุในสภาวะแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ ซึ่งผลของปริมาณรังสีต่อการดูดซึมน้ำของข้าวอะไมโลสสูงเป็นเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การขยายตัวของข้าวสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยการขยายตัวของข้าวสุกลดลงเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณ 1 และ 2 กิโลเกรย์ในข้าวอะไมโลสสูงที่บรรจุในสภาวะแบบ

มีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ ซึ่งผลของปริมาณรังสีต่อการขยายตัวของข้าวสุกของข้าวอะไมโลสสูงเป็นเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

ปริมาณรังสีมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวอะไมโลสสูงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้จะมีมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งข้าวที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มากที่สุด โดยได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง แสดงดังตารางที่ 4.32

ตารางที่ 4.32 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวอะไมโลสสูง

สภาวะบรรจุ	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	การขยายตัวของข้าวสุก (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
แบบมีอากาศ	0	16.4 ± 0.7^{a}	3.0 ± 0.2^{a}	3.2 ± 0.2^{a}	7.7 ± 2.0^{d}
	1	16.4 ± 0.7^{a}	3.0 ± 0.1^{ab}	3.2 ± 0.2^{a}	7.2 ± 1.8^{cd}
	2	16.4 ± 1.1^{a}	3.1 ± 0.1^{abc}	3.4 ± 0.1^{b}	7.0 ± 2.0^{bc}
	3	16.5 ± 1.4^{a}	3.2 ± 0.1^{bc}	3.5 ± 0.2^{b}	6.8 ± 2.2^{abc}
	4	16.9 ± 1.2^{ab}	3.2 ± 0.2^{c}	3.6 ± 0.2^{c}	6.8 ± 2.4^{abc}
	5	17.2 ± 1.2^{bc}	3.4 ± 0.2^{d}	3.7 ± 0.2^{c}	6.4 ± 2.1^{ab}
	6	17.4 ± 1.6^{d}	3.5 ± 0.1^{d}	3.8 ± 0.2^{d}	6.3 ± 2.3^{a}
แบบสุญญากาศ	0	16.6 ± 0.5^{a}	3.0 ± 0.1^{a}	3.1 ± 0.2^{a}	7.5 ± 1.8^{c}
	1	16.4 ± 0.7^{a}	3.3 ± 0.1^{bcd}	3.1 ± 0.1^{a}	7.4 ± 1.9^{bc}
	2	16.3 ± 0.9^{a}	3.1 ± 0.2^{ab}	3.3 ± 0.2^{b}	7.1 ± 1.9^{abc}
	3	16.4 ± 1.3^{a}	3.2 ± 0.2^{abc}	3.4 ± 0.1^{c}	7.0 ± 1.9^{abc}
	4	16.5 ± 1.4^{a}	3.3 ± 0.2^{cd}	3.5 ± 0.1^{c}	6.9 ± 2.1^{ab}
	5	17.1 ± 1.4^{b}	3.4 ± 0.1^{d}	3.7 ± 0.1^{d}	6.7 ± 2.1^{a}
	6	17.1 ± 1.6^{b}	3.4 ± 0.1^{d}	3.7 ± 0.1^{d}	6.5 ± 2.1^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะการบรรจุเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.32 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาต้มสุกของข้าวอะไมโลสสูงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ เวลาต้มสุกของข้าวอะไมโลสเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บไว้หลังจาก 5 เดือนทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้การดูดซึมน้ำของข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยข้าวอะไมโลสสูงมีการดูดซึมน้ำมากขึ้นเมื่อเก็บไว้หลังจาก 3 และ 4 เดือนในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ

ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้การขยายตัวของข้าวอะไมโลสสูงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยการขยายตัวของข้าวอะไมโลสสูงเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บไว้หลังจาก 2 เดือนทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวอะไมโลสสูงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวอะไมโลสสูงจะลดลงเมื่อเก็บไว้หลังจาก 2 และ 4 เดือนในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ

ผลของระยะเวลาเก็บต่อเวลาต้มสุก การดูดซึมน้ำ การขยายตัว และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวอะไมโลสสูงเป็นเช่นเดียวกับในข้าวกล้อง

4.2.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory test)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสีปริมาณต่างกันและมีระยะเวลาเก็บนาน 6 เดือน โดยทดสอบเช่นเดียวกับในเรื่องข้าวกล้อง คะแนนการทดสอบในด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของตัวอย่างทั้งในข้าวสุกอุ่น และข้าวสุกเย็น แสดงในตารางที่ 4.33 ถึง 4.34 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.33 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูงหุงสุกอุ่นในแต่ละระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
		0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.7^{b}	7.5^{b}	7.7^{b}	7.7^{b}	7.8^{b}	7.7^{b}	7.5^{b}
	1	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.4^{b}	7.2^{b}
	2	7.0^{a}	7.1^{a}	7.3^{ab}	7.0^{a}	7.1^{a}	7.0^{a}	6.4^{a}
	3	6.9^{a}	7.1^{a}	6.9^{a}	6.8^{a}	6.5^{a}	6.6^{a}	6.2^{a}
กลิ่น	0	7.3^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	1	7.2^{ns}	7.4^{ns}	7.2^{ns}	7.0^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}
	2	7.2^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}
	3	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	6.8^{ns}	6.8^{ns}	6.5^{ns}	6.9^{ns}
รสชาติ	0	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.1^{b}	6.0^{b}
	1	6.5^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{b}	6.2^{b}
	2	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.1^{ns}	5.4^{a}	5.3^{a}
	3	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	5.2^{a}	5.2^{a}
เนื้อสัมผัส	0	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.5^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.5^{b}	6.5^{b}
	1	6.4^{ns}	6.5^{ns}	6.5^{ns}	6.6^{ns}	6.7^{ns}	6.8^{b}	6.9^{b}
	2	6.5^{ns}	6.3^{ns}	6.6^{ns}	6.3^{ns}	6.0^{ns}	6.1^{ab}	5.6^{a}
	3	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}	6.0^{ns}	5.5^{a}	5.5^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.34 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูงหุงสุกเย็นในแต่ละระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
		0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.8^{b}	7.4^{ab}	7.6^{b}	7.6^{b}	7.6^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}
	1	7.7^{b}	7.5^{ab}	7.5^{b}	7.5^{b}	7.5^{b}	7.5^{b}	7.5^{b}
	2	7.3^{a}	7.1^{ab}	7.0^{a}	7.1^{a}	7.2^{ab}	7.0^{a}	6.5^{a}
	3	6.8^{a}	6.7^{a}	6.8^{a}	6.7^{a}	6.7^{a}	6.6^{a}	6.0^{a}
กลิ่น	0	7.4^{ns}	7.2^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.4^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	1	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}
	2	7.2^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}
	3	7.3^{ns}	7.5^{ns}	7.5^{ns}	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	6.9^{ns}
รสชาติ	0	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}	6.1^{b}	6.0^{b}
	1	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.2^{b}	6.2^{b}
	2	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.1^{ns}	5.6^{a}	5.4^{a}
	3	6.3^{ns}	6.5^{ns}	6.5^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	5.5^{a}	5.3^{a}
เนื้อสัมผัส	0	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.1^{ns}	6.1^{a}	6.0^{b}
	1	6.4^{ns}	6.5^{ns}	6.5^{ns}	6.6^{ns}	6.7^{ns}	6.8^{b}	6.9^{c}
	2	6.5^{ns}	6.3^{ns}	6.6^{ns}	6.2^{ns}	6.0^{ns}	6.0^{a}	5.7^{ab}
	3	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.1^{ns}	6.0^{ns}	5.6^{a}	5.5^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.33 และ 4.34 แสดงคะแนนเฉลี่ยของผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นตามลำดับ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ในแต่ละเดือนเป็นเวลา 6 เดือน

ผลการทดสอบประสาทสัมผัสด้านสีของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นทุกระยะเวลาเก็บที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนด้านสีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยผู้ทดสอบให้คะแนนด้านสีของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นที่ไม่ฉายรังสีและข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ มากกว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์อย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% อาจเนื่องมาจากข้าวที่ผ่านการฉายรังสีมีสีเข้มกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการฉายรังสีหรือฉายรังสีในปริมาณที่ต่ำกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวัดค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวใช้เครื่อง chromameter

ผลการทดสอบประสาทสัมผัสด้านกลิ่นของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่มีการฉายรังสีที่ปริมาณต่าง ๆ ซึ่งผู้ทดสอบให้คะแนนด้านกลิ่นของข้าวสุกอุ่นและเย็นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทุกระยะเวลาเก็บ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้าวสารอะไมโลสสูงนั้นมีปริมาณของไขมันอยู่น้อยทำให้ไม่มีผลในการเกิดกลิ่นหืนเมื่อเก็บไว้นานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางเคมีในการหาค่า TBA และปริมาณกรดไขมันอิสระในข้าวที่ไม่แตกต่างกันระหว่างข้าวที่ฉายรังสีและไม่ฉายรังสี

ผลการทดสอบประสาทสัมผัสด้านรสชาติของข้าวหุงสุกจากข้าวอะไมโลสสูงที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่าง ๆ พบว่าผู้ทดสอบให้คะแนนด้านรสชาติของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นไม่แตกต่างกันตั้งแต่เดือนที่เริ่มเก็บถึงเดือนที่ 4 แต่ที่ระยะเวลาเก็บ 5 และ 6 เดือน ผู้ทดสอบให้คะแนนข้าวที่ไม่ฉายรังสีและข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ทั้งของข้าวหุงสุกอุ่นและข้าวหุงสุกเย็นมากกว่าข้าวที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกอุ่นและเย็นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตั้งแต่เดือนที่เริ่มเก็บถึงเดือนที่ 4 ส่วนในเดือนที่ 5 และ 6 ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกอุ่นจากข้าวฉายรังสี 2 และ 3 กิโลเกรย์น้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีและข้าวที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผู้ทดสอบให้คะแนนด้านเนื้อสัมผัสของข้าวหุงสุกเย็นที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์สูงที่สุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 และ 6 เดือน จากการทดลองปริมาณรังสี 1 กิโลเกรย์ เป็นปริมาณรังสีที่เหมาะสมต่อคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวอะไมโลสสูง ส่วนข้าวที่มีการฉายรังสี 2 และ 3 กิโลเกรย์นั้น เมล็ดข้าวสุกจะมีเมือกห่อหุ้มอยู่ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นเจลของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตเล็ก ๆ ซึ่งเกิดจากการแตกพันธะไกลโคซิดิคของสตาร์ชหลังจากการฉายรังสี โดยมีลักษณะคล้ายข้าวบูดและมีลักษณะเช่นนี้เพิ่มมากขึ้นเมื่อข้าวเย็นลง

4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ การหุงต้มและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวเหนียว

4.3.1 คุณสมบัติทางเคมี

เมื่อเก็บข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวเหนียวที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติทางเคมีของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value		
			ปริมาณอะไมโลส	ค่า TBA	ปริมาณกรดไขมันอิสระ
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.282^{ns}	N.D.	0.921^{ns}
	error	4			
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.807^{ns}	N.D.	0.075^{ns}
	error	24			
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.864^{ns}	N.D.	0.445^{ns}
	pooled error	24			
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.978^{ns}	N.D.	0.977^{ns}
	error	4			
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.637^{ns}	N.D.	0.965^{ns}
	error	24			
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.240^{ns}	N.D.	0.825^{ns}
	pooled error	24			

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

N.D. หมายถึง ไม่สามารถวัดค่าได้ (non-detectable)

จากตารางที่ 4.35 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศเช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าวอะไมโลสสูง และผลการทดลองในส่วนของระยะเวลาเก็บต่อปริมาณอะไมโลสสอดคล้องกับผลการทดลองของ Noomhorm และคณะ (1997) ที่เก็บข้าวเหนียวไว้เป็นเวลา 4 เดือน แล้วปริมาณอะไมโลสไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่า TBA นั้นไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากปริมาณไขมันในข้าวเหนียวมีน้อย ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันเกิดขึ้นน้อยมาก ซึ่งในการทดลองนี้ก็ได้ทำการทดสอบหาปริมาณไขมันในข้าวเหนียวแล้วพบว่ามีปริมาณเพียง 0.35 % โดยใกล้เคียงกับข้อมูลของ Lorenz และ Kulp (1991) ที่มีปริมาณไขมันในข้าวขัดขาว 0.45 %

ด้านอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ปริมาณอะไมโลสและปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพ

4.3.2.1 การทดสอบค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวเหนียว

เมื่อเก็บรักษาข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงสีของข้าวโดยใช้เครื่อง Chromameter ทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุกที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.36 ถึง 4.38

ตารางที่ 4.36 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสีเหลือง (ค่า b) ในข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	sov	df	p – value	
			ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.015^{*}	0.045^{*}
	error	4		
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.001^{*}	0.000^{*}
	error	24		
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.487^{ns}	0.135^{ns}
	pooled error	24		
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.005^{*}	0.003^{*}
	error	4		
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000^{*}	0.000^{*}
	error	24		
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.165^{ns}	0.725^{ns}
	pooled error	24		

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.36 พบว่าปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารเหนียวและข้าวเหนียวหุงสุกแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารเหนียวและข้าวเหนียวหุงสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

รังสีแกมมาในปริมาณที่ต่างกันมีผลต่อค่าสีเหลืองของข้าวเหนียวทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.37

ตารางที่ 4.37 ผลของปริมาณรังสีต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารและข้าวหุงสุกจากข้าวเหนียว

ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ค่าสีเหลือง			
	บรรจุแบบมีอากาศ		บรรจุแบบสุญญากาศ	
	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
0	11.15 ± 1.17^{a}	5.21 ± 0.81^{a}	11.44 ± 1.33^{a}	4.97 ± 0.80^{a}
1	12.61 ± 1.41^{b}	6.24 ± 0.77^{b}	12.97 ± 1.02^{b}	6.17 ± 0.95^{b}
2	13.54 ± 1.13^{c}	7.03 ± 0.81^{c}	14.43 ± 1.32^{c}	7.07 ± 0.92^{c}
3	14.90 ± 1.17^{d}	8.12 ± 0.77^{d}	15.23 ± 1.07^{d}	8.26 ± 0.86^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.37 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า b ของข้าวสารและข้าวสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยทั้งของข้าวสารและข้าวหุงสุกทั้งที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศมีค่า b เพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลของปริมาณรังสีต่อค่า b เป็นเช่นเดียวกันกับในข้าวอะไมโลสสูง

ผลของระยะเวลาเก็บที่มีต่อค่าสีเหลืองของข้าวเหนียวทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวหุงสุก แสดงดังตารางที่ 4.38

ตารางที่ 4.38 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าสีเหลือง (ค่า b) ของข้าวสารและข้าวหุงสุกจากข้าวเหนียว

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ค่าสีเหลือง			
	บรรจุแบบมีอากาศ		บรรจุแบบสุญญากาศ	
	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก	ข้าวสาร	ข้าวหุงสุก
0	12.67 ± 1.13^{a}	6.04 ± 1.43^{a}	12.59 ± 2.05^{a}	5.88 ± 1.43^{a}
1	12.23 ± 1.98^{ab}	6.07 ± 1.02^{a}	13.64 ± 1.95^{ab}	6.20 ± 1.52^{ab}
2	12.76 ± 1.69^{ab}	6.46 ± 1.34^{ab}	13.82 ± 1.86^{ab}	6.38 ± 1.55^{ab}
3	13.51 ± 2.31^{ab}	7.17 ± 1.30^{b}	12.83 ± 2.04^{a}	6.56 ± 1.58^{ab}
4	12.58 ± 2.23^{ab}	7.12 ± 1.33^{b}	13.31 ± 1.66^{a}	6.94 ± 1.55^{ab}
5	13.28 ± 1.64^{ab}	6.66 ± 1.51^{ab}	13.88 ± 1.59^{ab}	7.16 ± 1.62^{b}
6	14.07 ± 1.58^{b}	7.04 ± 1.24^{b}	14.56 ± 1.81^{b}	7.22 ± 1.19^{b}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.38 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ค่า b ของข้าวเหนียวทั้งที่เป็นข้าวสารและข้าวสุกทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีค่า b ของข้าวสารเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหลังจากเก็บไว้นาน 6 เดือนทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ส่วนค่า b ของข้าวเหนียวหุงสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บไว้นาน 3 เดือนในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ ส่วนในสภาวะแบบสุญญากาศ ค่า b ของข้าวเหนียวหุงสุกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บไว้ตั้งแต่ 5 เดือน ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาเมลลาร์ดเช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าวกล้อง

4.3.2.2 คุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวเหนียว

เมื่อเก็บรักษาข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวเหนียวที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน โดยใช้เครื่อง RVA ได้ผลดังตารางที่ 4.39 - 4.40

ตารางที่ 4.39 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value			
			ความหนืดสูงสุด (peak viscosity)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (peak time)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (breakdown)	การคืนตัว (set back)
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.014*	0.000*	0.000*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.719ns	0.424ns	0.893ns	0.120ns
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.981ns	0.182ns	0.997ns	0.267ns
	pooled error	24				
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.000*	0.014*	0.000*	0.000*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.572ns	0.996ns	0.097ns	0.125ns
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.977ns	0.998ns	0.061ns	0.225ns
	pooled error	24				

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.39 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้ความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวเหนียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่ระยะเวลาเก็บและอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ความหนืดสูงสุด

เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว และการคืนตัวของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติด้านความหนืดของข้าวเหนียวแสดงดังตารางที่ 4.40

ตารางที่ 4.40 ผลของปริมาณรังสีแกมมาต่อความหนืดของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	ความหนืดสูงสุด (cP)	เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (นาที)	ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัว (cP)	การคืนตัว (cP)
แบบมีอากาศ	0	2682 ± 150^{d}	3.35 ± 0.03^{d}	1816 ± 173^{d}	1512 ± 103^{d}
	1	1456 ± 139^{c}	3.32 ± 0.02^{c}	734 ± 148^{c}	588 ± 99^{c}
	2	1058 ± 156^{b}	3.26 ± 0.02^{b}	481 ± 189^{b}	272 ± 83^{b}
	3	500 ± 56^{a}	3.22 ± 0.03^{a}	144 ± 66^{a}	103 ± 22^{a}
แบบสุญญากาศ	0	2726 ± 160^{d}	3.40 ± 0.08^{c}	1836 ± 97^{d}	1510 ± 71^{d}
	1	1471 ± 120^{c}	3.31 ± 0.04^{b}	723 ± 135^{c}	585 ± 102^{c}
	2	1035 ± 119^{b}	3.26 ± 0.03^{b}	445 ± 88^{b}	254 ± 93^{b}
	3	496 ± 67^{a}	3.20 ± 0.03^{a}	107 ± 65^{a}	98 ± 54^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะบรรจุเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.40 พบว่าปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวและการคืนตัวของข้าวเหนียวลดลงและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ และได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับในข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง และได้ผลทำนองเดียวกับการทดลองของ Wu และคณะ (2002) ที่ได้ฉายรังสีแกมมาในข้าวเหนียวที่ปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์

4.3.2.3 ความแข็ง (hardness) ของข้าวเหนียวหุงสุก

เมื่อเก็บรักษาข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือนโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส ได้ผลดังตารางที่ 4.41 - 4.42 และรูปที่ 4.17 - 4.18

ตารางที่ 4.41 การวิเคราะห์ความแปรปรวนความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุก

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value
			ความแข็ง (hardness)
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.906^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000^{*}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000^{*}
	pooled error	24	
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.812^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.000^{*}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.000^{*}
	pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.41 พบว่าปริมาณรังสีไม่มีผลทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่ระยะเวลาเก็บและอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ระยะเวลาเก็บมีผลต่อความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกแสดงดังตารางที่ 4.42

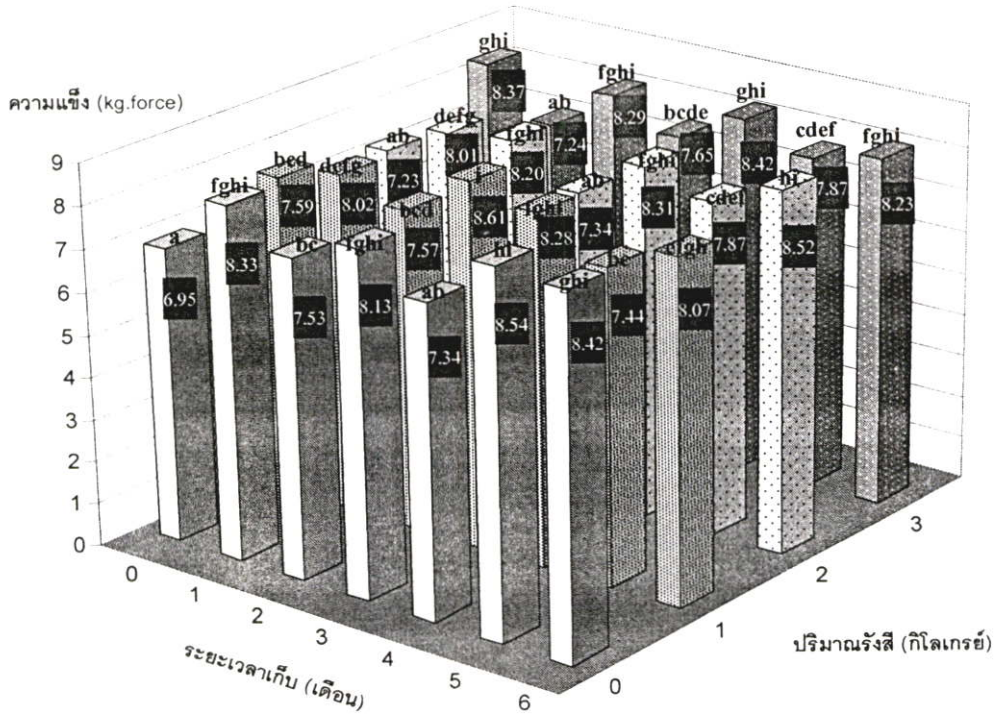
ตารางที่ 4.42 ผลของระยะเวลาเก็บต่อค่าความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุก

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ความแข็ง (kg.force)	
	บรรจุแบบมีอากาศ	บรรจุแบบสุญญากาศ
0	7.55 ± 0.60^{a}	7.54 ± 0.49^{a}
1	7.90 ± 0.41^{b}	8.04 ± 0.51^{bc}
2	7.90 ± 0.39^{b}	8.00 ± 0.37^{bc}
3	7.93 ± 0.52^{b}	7.84 ± 0.70^{b}
4	8.09 ± 0.50^{b}	8.12 ± 0.60^{c}
5	7.94 ± 0.43^{b}	7.95 ± 0.54^{bc}
6	8.31 ± 0.22^{c}	8.42 ± 0.23^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

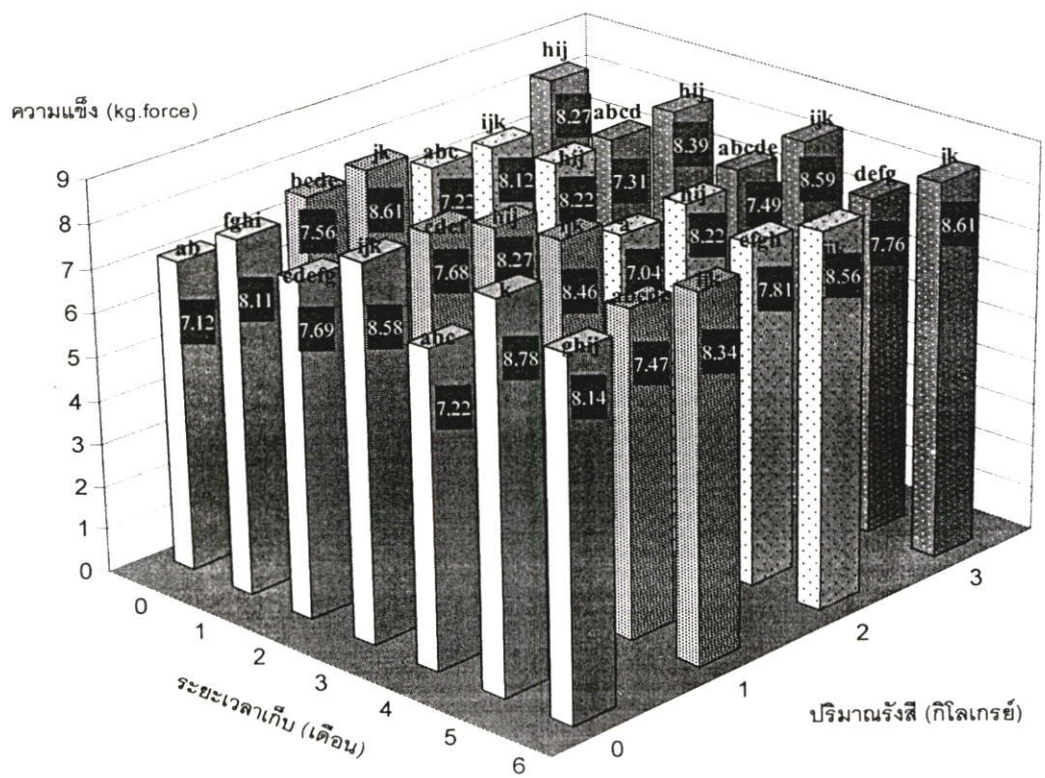
จากตารางที่ 4.42 พบว่าระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ เมื่อระยะเวลาเก็บนานขึ้นข้าวเหนียวหุงสุกจะมีความแข็งมากขึ้น โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเมื่อเริ่มเก็บอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเก็บนาน 1 เดือนขึ้นไป และค่าความแข็งไม่แตกต่างกันเมื่อเก็บตั้งแต่ 1 ถึง 5 เดือน และเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในเดือนที่ 6 ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยระยะเวลาเก็บมีผลต่อความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกด้วยเหตุผลเดียวกับการทดลองเรื่องข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

รูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บที่ทำให้ความแข็งของข้าวเหนียวหุงสุกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 เดือนและมีค่าต่ำสุดที่เวลาเริ่มเก็บของข้าวเหนียวไม่ฉายรังสี ส่วนความแข็งของข้าวหุงสุกจากข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 5 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 3 เดือนของข้าวเหนียวที่ฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์



รูปที่ 4.17 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวเหนียว ในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.18 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่อความแข็งของข้าวเหนียวใน สภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3.2.4 การพองตัวเนื่องจากการทอด

เมื่อเก็บข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของค่าการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวเหนียวที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.43

ตารางที่ 4.43 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value
			การพองตัวเนื่องจากการทอด
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.259^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.359^{ns}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.119^{ns}
	pooled error	24	
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.837^{ns}
	error	4	
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.816^{ns}
	error	24	
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.870^{ns}
	pooled error	24	

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.43 พบว่าปริมาณรังสี ระยะเวลาเก็บ และอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้การพองตัวเนื่องจากการทอดของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับในกรณีของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

4.3.3 คุณสมบัติการหุงต้ม

เมื่อเก็บข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่ต่างกันไว้เป็นเวลา 6 เดือนและติดตามผลการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติการหุงต้มของข้าวเหนียวที่บรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศทุก 1 เดือน ได้ผลดังตารางที่ 4.44 - 4.46 และรูปที่ 4.19 – 4.20

ตารางที่ 4.44 การวิเคราะห์ความแปรปรวนคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	sov	df	p-value			
			เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	การขยายตัวของข้าวสุก (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
แบบมีอากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.002*	0.019*	0.179ns	0.002*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.301ns	0.325ns	0.115ns	0.000*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.010*	0.225ns	0.948ns	0.825ns
	pooled error	24				
แบบสุญญากาศ	ปริมาณรังสี	3	0.002*	0.015*	0.127ns	0.003*
	error	4				
	ระยะเวลาเก็บ	6	0.505ns	0.144ns	0.075ns	0.001*
	error	24				
	ปริมาณรังสี x ระยะเวลาเก็บ	18	0.002*	0.536ns	0.435ns	0.265ns
	pooled error	24				

หมายเหตุ : ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

* หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.44 พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้เวลาต้มสุก การดูดซึมน้ำ และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่การขยายตัวของข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อาจเนื่องจากปริมาณอะไมโลสเป็นส่วนสำคัญในการขยายตัว

ของข้าวและข้าวเหนียวมีปริมาณอะไมโลสต่ำ จึงทำให้การขยายตัวของข้าวเหนียวที่มีการฉายรังสีในปริมาณต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันถึงแม้ว่ารังสีได้ทำลายโครงสร้างของสตาร์ช ส่วนระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เฉพาะปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาต้มสุกของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้การดูดซึมน้ำ การขยายตัวของข้าว และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำของข้าวเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ

ผลของรังสีแกมมาปริมาณต่าง ๆ ต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียวแสดงดังตารางที่ 4.45

ตารางที่ 4.45 ผลของปริมาณรังสีต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว

สภาวะบรรจุ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)	เวลาต้มสุก (นาที)	การดูดซึมน้ำ (เท่า)	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (%)
แบบมีอากาศ	0	14.6 ± 0.5^{d}	3.0 ± 0.1^{c}	4.9 ± 0.5^{a}
	1	14.0 ± 0.4^{c}	2.9 ± 0.1^{c}	8.0 ± 0.9^{b}
	2	12.9 ± 0.5^{b}	2.7 ± 0.1^{b}	9.3 ± 0.7^{c}
	3	12.3 ± 0.5^{a}	2.6 ± 0.1^{a}	12.3 ± 0.7^{d}
แบบสุญญากาศ	0	14.6 ± 0.6^{d}	3.0 ± 0.1^{b}	4.8 ± 0.7^{a}
	1	13.8 ± 0.4^{c}	2.9 ± 0.1^{b}	7.4 ± 0.7^{b}
	2	12.9 ± 0.4^{b}	2.7 ± 0.1^{a}	9.4 ± 0.8^{c}
	3	12.1 ± 0.6^{a}	2.6 ± 0.1^{a}	12.5 ± 0.9^{d}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งและสภาวะบรรจุเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 4.45 พบว่าข้าวเหนียวที่ผ่านการฉายรังสีทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศใช้เวลาต้มสุกน้อยกว่าข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยเวลาต้มสุกจะลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น โดยข้าวเหนียวฉายรังสี 3 กิโลเกรย์มีเวลาต้มสุกน้อยที่สุด เช่นเดียวกับการทดลองในกรณีของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

ปริมาณรังสีมีผลทำให้การดูดซึมน้ำของข้าวเหนียวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ การดูดซึมน้ำของข้าวเหนียวฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ไม่แตกต่างจากข้าวเหนียวไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ เมื่อฉายรังสีข้าวเหนียวปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์ทำให้การดูดซึมน้ำลดลงต่างจากข้าวเหนียวไม่ฉายรังสีและข้าวเหนียวฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในข้าวเหนียวที่มีสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ แต่ในข้าวเหนียวที่มีสภาวะแบบสุญญากาศ การดูดซึมน้ำของข้าวเหนียวฉายรังสีปริมาณ 2 และ 3 กิโลเกรย์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกับการทดลองในกรณีของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

ปริมาณรังสีมีผลทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของข้าวเหนียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้จากข้าวเหนียวทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศมีมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น โดยข้าวเหนียวที่มีการฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มากที่สุด รองลงมาเป็นข้าวเหนียวที่ฉายรังสี 2 และ 1 กิโลเกรย์ตามลำดับเช่นเดียวกับการทดลองในกรณีของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว แสดงดังตารางที่ 4.46

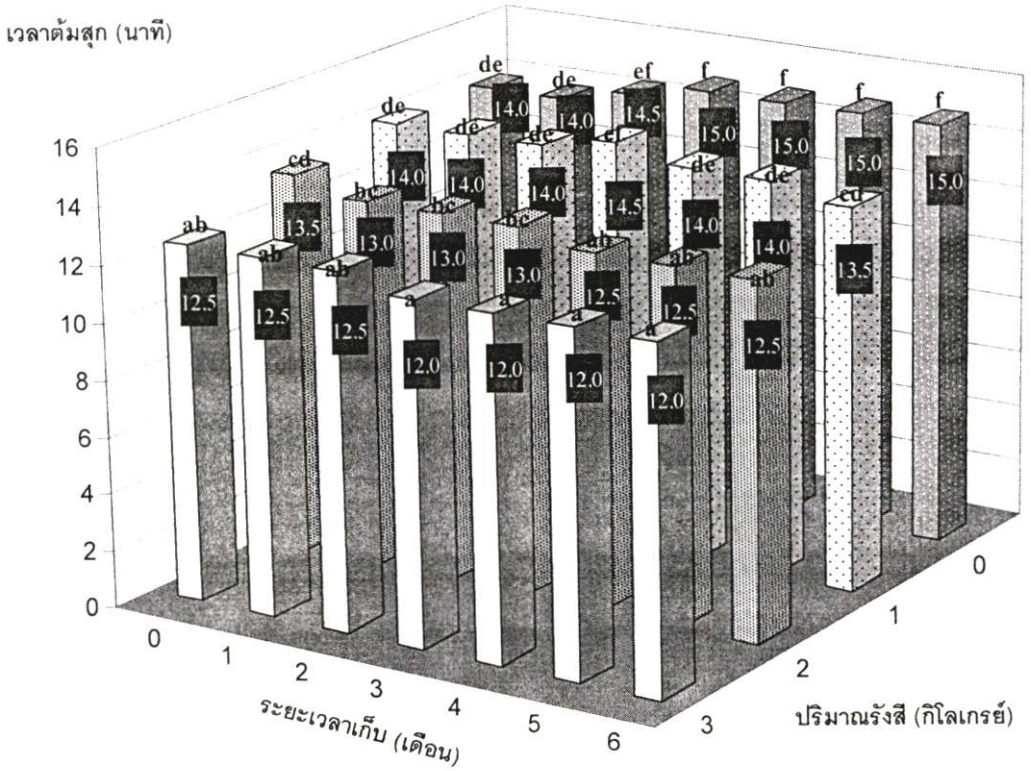
ตารางที่ 4.46 ผลของระยะเวลาเก็บต่อคุณภาพการหุงต้มของข้าวเหนียว

ระยะเวลาเก็บ (เดือน)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด ที่ละลายได้ (%)	
	บรรจุแบบมีอากาศ	บรรจุแบบสุญญากาศ
0	7.7 ± 2.0^{d}	7.5 ± 1.8^{c}
1	7.2 ± 1.8^{cd}	7.4 ± 1.9^{bc}
2	7.0 ± 2.0^{bc}	7.1 ± 1.9^{abc}
3	6.8 ± 2.2^{abc}	7.0 ± 1.9^{abc}
4	6.8 ± 2.4^{abc}	6.9 ± 2.1^{ab}
5	6.4 ± 2.1^{ab}	6.7 ± 2.1^{a}
6	6.3 ± 2.3^{a}	6.5 ± 2.1^{a}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

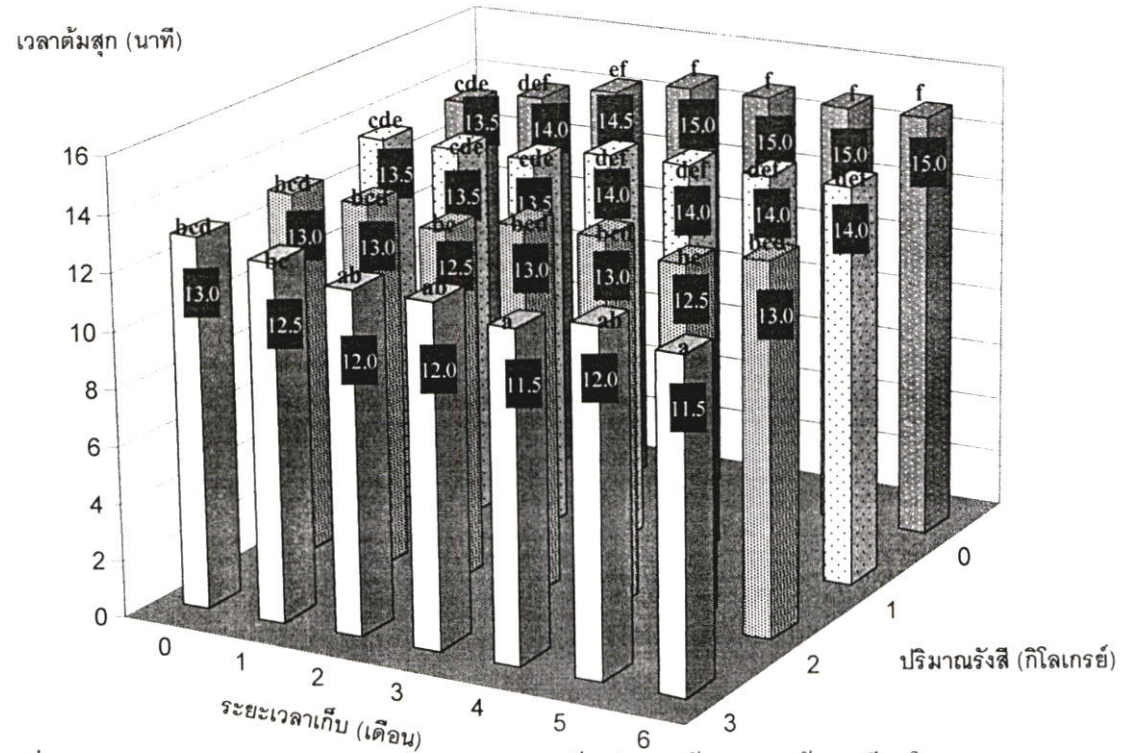
จากตารางที่ 4.46 พบว่า เมื่อมีระยะเวลาเก็บนานขึ้นปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากเดือนที่ 2 และ 4 เดือนขึ้นไปในข้าวเหนียวที่มีสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับเช่นเดียวกับการทดลองในกรณีของข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง

รูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาต้มสุกของข้าวเหนียวมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศตามลำดับ เวลาต้มสุกของข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 ถึง 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 4 ถึง 6 เดือนในข้าวเหนียวที่ฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์และทุกระยะเวลาเก็บของข้าวเหนียวที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ ส่วนเวลาต้มสุกของข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลาเก็บ 4 ถึง 6 เดือน และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาเก็บ 2 ถึง6 เดือนในข้าวเหนียวที่ฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์ และเห็นได้ว่าการฉายรังสีปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลทำให้เวลาต้มสุกลดลงที่ทุกระยะเวลาเก็บทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.19 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่อเวลาต้มสุกของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 4.20 อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่อเวลาต้มสุกของข้าวเหนียวในสภาวะบรรจุแบบสุญญากาศ

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.3.4 การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory test)

การทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าวหุงสุกจากข้าวเหนียวที่ฉายรังสีปริมาณต่างกันและมีระยะเวลาเก็บนาน 6 เดือน โดยทดสอบเช่นเดียวกับในเรื่องข้าวกล้องและข้าวอะไมโลสสูง คะแนนการทดสอบในด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของตัวอย่างทั้งในข้าวหุงสุกอุ่นและข้าวหุงสุกเย็น แสดงในตารางที่ 4.47 ถึง 4.48 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.47 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวหุงสุกอุ่นในแต่ละระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
	(กิโลเกรย์)	0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.7^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.7^{b}	7.6^{b}	7.7^{b}	7.5^{b}
	1	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.2^{b}
	2	7.1^{a}	7.1^{a}	7.0^{a}	6.9^{a}	7.0^{a}	6.7^{a}	6.5^{a}
	3	6.9^{a}	7.0^{a}	6.9^{a}	6.8^{a}	6.6^{a}	6.6^{a}	6.2^{a}
กลิ่น	0	7.3^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.2^{ns}	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	1	7.3^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}	7.2^{ns}	7.2^{ns}
	2	7.2^{ns}	7.2^{ns}	7.3^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}
	3	7.1^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	6.9^{ns}	6.8^{ns}
รสชาติ	0	6.4^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.1^{ns}	6.3^{b}
	1	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.2^{b}
	2	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.0^{ns}	5.8^{a}
	3	6.2^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	5.9^{ns}	5.8^{a}
เนื้อสัมผัส	0	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}
	1	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.5^{ns}	6.5^{ns}	6.2^{ns}	6.2^{ns}	6.5^{ns}
	2	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}
	3	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.48 ผลของปริมาณรังสีต่อคะแนนคุณภาพด้านประสาทสัมผัสของข้าวเหนียวหุงสุกเย็นในแต่ระยะเวลาเก็บ

คุณภาพ	ปริมาณรังสี	ระยะเวลาเก็บ (เดือน)						
	(กิโลเกรย์)	0	1	2	3	4	5	6
สี	0	7.5^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}
	1	7.4^{ab}	7.5^{b}	7.5^{b}	7.6^{b}	7.5^{b}	7.5^{b}	7.5^{b}
	2	7.3^{ab}	7.1^{ab}	7.1^{a}	7.0^{a}	6.8^{a}	6.7^{a}	6.3^{a}
	3	6.7^{a}	6.7^{a}	6.8^{a}	6.7^{a}	6.6^{a}	6.5^{a}	6.1^{a}
กลิ่น	0	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.0^{ns}	7.0^{ns}
	1	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.5^{ns}	7.4^{ns}	7.3^{ns}	7.1^{ns}	7.0^{ns}
	2	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}
	3	7.3^{ns}	7.3^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.4^{ns}	7.0^{ns}	7.1^{ns}
รสชาติ	0	6.1^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.1^{ns}	6.0^{b}
	1	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.2^{ns}	6.2^{b}
	2	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.0^{ns}	5.8^{a}
	3	6.1^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.0^{ns}	5.6^{a}
เนื้อสัมผัส	0	6.5^{ns}	6.5^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}
	1	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.5^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}	6.4^{ns}
	2	6.4^{ns}	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.1^{ns}	6.2^{ns}	6.4^{ns}
	3	6.4^{ns}	6.3^{ns}	6.3^{ns}	6.2^{ns}	6.1^{ns}	6.3^{ns}	6.4^{ns}

หมายเหตุ : ตัวอักษรกำกับต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างกันในแนวตั้งเดียวกันของแต่ละคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.47 และตารางที่ 4.48 แสดงคะแนนเฉลี่ยของผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวหุงสุกอุ่นและเย็นตามลำดับ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลของปริมาณรังสีแกมมาในแต่ละเดือนเป็นเวลา 6 เดือน พบว่าปริมาณรังสีมีผลทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านสีของทั้งข้าวเหนียวสุกอุ่นและเย็นแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศที่ทุก ๆ ระยะเวลาเก็บ โดยปริมาณรังสี 2 และ 3 กิโลเกรย์มีผลทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านสีลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากคะแนนของข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีและที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์

ปริมาณรังสีไม่มีผลทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านรสชาติของทั้งข้าวเหนียวหุงสุกอุ่นและเย็นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ แต่คะแนนเฉลี่ยด้านรสชาติหลังจากเก็บไว้ 5 เดือน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งข้าวเหนียวสุกอุ่นและเย็นทั้งในสภาวะบรรจุแบบมีอากาศและแบบสุญญากาศ โดยปริมาณรังสี 2 และ 3 กิโลเกรย์มีผลทำให้คะแนนเฉลี่ยด้านรสชาติลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีและที่ผ่านการฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Sirisoontaralak และ Noomhorm (2007) ที่ฉายรังสีปริมาณ 0.2 – 1.0 กิโลเกรย์ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 เก็บไว้เป็นเวลา 1 ปี พบว่าคะแนนประสาทสัมผัสด้านรสชาติของข้าวที่ฉายรังสีต่ำกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีตั้งแต่ระยะเวลาเก็บ 6 เดือนเป็นต้นไป ซึ่งได้ให้เหตุผลว่าเกิดจากปฏิกิริยาไลปิดไฮโดรไลซิสและไลปิดออกซิเดชัน ส่วนในการทดสอบนี้ยังไม่ทราบสาเหตุที่แน่ชัดเนื่องจากปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่า TBA และปริมาณกรดไขมันอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ คุณภาพการหุงต้ม และการทดสอบทางประสาทสัมผัสของข้าว 3 ชนิด คือ ข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวที่บรรจุและเก็บรักษาในสภาวะต่างกันคือข้าวกล้องบรรจุในถุงพลาสติกแบบสุญญากาศ ส่วนข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวมีการบรรจุทั้งแบบธรรมดาและแบบสุญญากาศ เมื่อนำไปฉายรังสีแกมมาด้วยปริมาณ 1 2 และ 3 กิโลเกรย์ และเก็บเป็นเวลา 6 เดือนที่อุณหภูมิห้อง แล้ววิเคราะห์คุณภาพทุก 1 เดือนเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ฉายรังสี สรุปผลการทดลองได้ว่า

1. ด้านคุณสมบัติทางด้านเคมี ปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่า TBA เพิ่มขึ้นเมื่อมีการฉายรังสีปริมาณ 3 กิโลเกรย์กับข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ และระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่างก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอะไมโลสและปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอะไมโลสและปริมาณกรดไขมันอิสระของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. ด้านค่าสีเหลืองของข้าว ปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บต่างก็มีผลทำให้ค่าสีเหลืองของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นตามปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บไม่มีผลทำให้ค่าสีเหลืองของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
3. คุณสมบัติด้านความหนืดของแป้ง ปริมาณรังสีมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลงและการคืนตัวของแป้งข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวลดลงตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด และการคืนตัวของแป้งข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนอิทธิพลร่วมของปริมาณรังสีและระยะเวลาเก็บมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดสูงสุด เวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลง และการคืนตัวของแป้งข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ และค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดขณะเม็ดแป้งแตกตัวลดลง และการคืนตัวของข้าวอะไมโลสสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุดของข้าวอะไมโลสสูง และคุณสมบัติด้านความหนืดทั้งหมดของข้าวเหนียวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4. ด้านความแข็งของข้าว ระยะเวลาเก็บมีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความแข็งของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำและข้าวอะไมโลสสูงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นการฉายรังสีข้าวสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของข้าวที่ต้องเก็บรักษานานให้มีความนุ่มขึ้น
5. ด้านคุณสมบัติการหุงต้ม ระยะเวลาเก็บทำให้เวลาต้มสุก การดูดซึมน้ำ และการขยายตัวของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำและข้าวอะไมโลสสูง เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ปริมาณรังสีมีผลในทางตรงข้าม ดังนั้นข้าวที่ผ่านการฉายรังสีจึงมีการใช้เวลาในการหุงต้มลดลงอาจเหมาะสมต่ออุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์บางประเภทที่ใช้ข้าวเป็นวัตถุดิบ
6. คะแนนความชอบของผู้ทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ด้านสี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัสของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูง และข้าวเหนียวที่ฉายรังสีน้อยกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสเฉพาะของข้าวอะไมโลสสูงที่ฉายรังสี 1 กิโลเกรย์ ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบมากที่สุดแม้ว่าข้าวนั้นมีระยะเวลาเก็บนาน 5 ถึง 6 เดือน ฉะนั้นรังสีแกมมาปริมาณ 1 กิโลเกรย์จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการฉายรังสีข้าวอะไมโลสสูงเพื่อให้มีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสดีกว่าข้าวที่ไม่ฉายรังสีและข้าวที่ฉายรังสี 2 และ 3 กิโลเกรย์ แต่ข้าวกล้องอะไมโลสต่ำและข้าวเหนียวที่ไม่ฉายรังสีมีคะแนนทางด้านประสาทสัมผัสมากกว่าหรือเท่ากับข้าวที่ฉายรังสี อย่างไรก็ตามผู้ทดสอบให้คะแนนคุณภาพทางประสาทสัมผัสของข้าวทั้ง 3 ชนิดที่ฉายรังสีอยู่ในเกณฑ์ชอบแม้จะเก็บรักษาไว้นาน 6 เดือน

บรรณานุกรม

กรมวิชาการเกษตร. 2532. "การใช้สถิติกับงานวิจัย เล่มที่ 2." ใน **การฝึกอบรมสถิติหลักสูตรการใช้สถิติกับงานวิจัย มีนาคม 2532.** กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร กองแผนงานและวิชาการ ฝ่ายวิชาการสถิติ.

กล้าณรงค์ ศรีรอต และ เกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2543. **เทคโนโลยีของแป้ง.** พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โกวิทย์ นุชประมูล. 2546. "การใช้รังสีในกิจการอาหาร." ใน **การฝึกอบรมหลักสูตรพลังงานนิวเคลียร์และการใช้ประโยชน์ 21-25 เมษายน 2546.** กรุงเทพฯ : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

งามชื่น คงเสรี. 2528. "การเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดเมื่อเก็บในลักษณะข้าวกล้องและข้าวสาร." **วารสารวิชาการเกษตร.** 1: 38-43.

งามชื่น คงเสรี. 2532. "การเปลี่ยนแปลงคุณภาพข้าวสารที่บรรจุในภาชนะแบบต่าง ๆ." ใน **การประชุมวิชาการ ประจำปี 2532.** ปทุมธานี : ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี.

งามชื่น คงเสรี. 2539. "คุณภาพข้าวสารและข้าวสุก." ใน **การสัมมนาเรื่องข้าวกับคน** ณ. โรงแรมรีเจนท์ จ.เพชรบุรี 24 สิงหาคม 2539. เพชรบุรี : สมาคมโรงสีข้าวไทย.

จารนัย พาณิชยกุล. 2537. "แป้ง (starch) การเปลี่ยนแปลงระหว่างการทำให้แป้งสุก." **วารสารจาร์พา.** 12 : 33-35.

ปกรณ์พรรณ เผือกสวัสดิ์. 2545. "กระบวนการผลิตข้าวพองด้วยไมโครเวฟเพื่อใช้ในผลิตภัณฑ์กราโนลาบาร์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ละมุล วิเศษ. 2541. "ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณไขมันคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของข้าวกล้องพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สายวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2538. **เคมีทางธัญญาหาร.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. **ข้าว : วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี** กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ananthaswamy, H.N., Vakil, U.K. and Sreenivasan, A. 1970. "Effect of Gamma Radiation on Wheat Starch and its Components." **J. Food Sci.** 35 : 795.

AOAC. 1990. **Official Method of Analysis.** 15th. Ed. Arlington, Virginia : The Association of Official Analytical Chemists.

Barber, S. 1972. "Milled Rice and Changes during Aging." 215-216. In Houston, D.F., editor. **Rice Chemistry and Technology.** St. Paul, Minnesota : Amer. Assoc. Cereal Chem.

Batcher, O.M. , Helmintholet, K.F. and Dawson, E.H. 1956. "Development and Application of Methods of Evaluating Cooking and Eating Quality of Rice." **Rice J.** 59(13) : 4-18.

Biliaderis, C.G. and Tonugai, J.R. 1991. "Influence of Lipids on the Thermal and Mechanical Properties of Concentrated Starch Gel." **J. Agri. Food Chem.** 39 : 833.

Cass Mutters, U.C. 2003. "Quality Change during Storage." in **Rice Quality Workshop 2003.** California : Cooperative Extension, Butte County, University of California.

Champagne, T.E. 1993. "Brown Rice Stabilization." 17-35. In Marshall, E.W. and Wadsworth, I.J., editors. **Rice : Science and Technology.** New Orleans, Louisiana : Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.

Chrastil, J. 1990. "Chemical and Physicochemical changes of Rice during Storage at Difference Temperatures ." **J. Cereal Sci**. 11:71.

Chrastil, J. 1994. "Effect of Storage on the Physicochemical Properties and Quality Factors of Rice." 49-81. In Marshall, E.W. and Wadsworth, I.J., editors. **Rice : Science and Technology.** New Orleans, Louisiana : Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.

Chinnaswamy, R. 1993. "Basis of Cereal Starch Expansion." **Carbohydr. Polym**. 21:157-167.22

Ciesla, K. and Eliasson, A.C. 2002. "Influence of Gamma Radiation on Potato Starch Gelatinization Studied by Differential Scanning Calorimetry." **Radiat. Phys. Chem.** 64 : 137-148.

Daniel, M.J., Makrs, B. P., Siebenmorgen, T. J., Mcnew, R.W. and Meullenet, J. F. 1998. "Effects of Long-Grain Rough Rice Storage History on End-Use Quality." **J. Food Sci.** 63(5) : 832–840.

Deschreider, A.R. 1960. "Changes in Starch and its Degradation Products on Irradiating Wheat Flour with Gamma Rays." **Starch/Stärke.** 12 : 197.

Dhaliwal, Y.S., Sekhon, K. S. and Nagi, H. P. S. 1991. "Enzymatic Activities and Rheological Properties of Stored Rice." **Cereal Chemistry.** 68(1) : 18–21.

Diehl, J.F. 1975. "Thiamin in Irradiated Foodstuffs. 1. Influence of Different Conditions and of Time after Irradiation (in German)." **Z. Leben. Unters Forsch.** 157 : 317-321.

Diehl, J.F., Adam, S., Delincee, H., Jakubick, V. 1978. "Radiolysis of Carbohydrates and Carbohydrate-Containing Foods." **J. Agi. Food Chem.** 26 : 15.

Diehl, J.F. 1979. "Reduction of Radiation Induced Vitamin Losses by Irradiation of Foodstuffs at Low Temperature and by Exclusion of Atmospheric Oxygen (in German)." **Z. Leben. Unters Forsch.** 169 : 276.

Diehl, J.F. 1990. **Safety of Irradiated Foods.** New York : Marcel Dekker : 129-220.

El Saadany, R.M.A., Toda, Y.H. and El saadany, F.M. 1979. "Improving of Egyptian Rice by Means of Gamma-Irradiation." **Starch/Stärke.** 31 : 230.

Hamaker, B.R. 1993. "The Influence of Rice Protein on Rice Quality." 177-193. In Marshall, E.W. and Wadsworth, I.J. , Wadsworth, I.J., editors. **Rice : Science and Technology.** New Orleans, Louisiana : Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture.

Indudhara, Y.M., Sowbhagya, C.M.and Bhattacharya,K.R. 1978. "Change in the Physicochemical Properties of Rice with Aging." **J. Sci. Food Agri.** 29 : 627-639.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 1982. **Training Manual on Food Irradiation Technology and Techniques.** Vienna :Joint FAO/IAEA Division of Isotope and Radiation Applications of Atomic Energy for Food and Agriculture Development. Technical Report Series No.114. : 112-195.

Juliano, B.O. , Onate, L.U. and Del mundo, A.M. 1965. "Relation of Starch Composition Protein Content and Gelatinization Temperature to Cooking and Eating Qualities of Milled Rice." **Food Technol.** 19 : 1006-1011.

Juliano, B.O. 1972. "The Rice Caryopsis and its Composition." 16-74. In Houston, D.F., editor. **Rice Chemistry and Technology.** St. Paul, Minnesota : Amer. Assoc. Cereal Chem.

Juliano, B.O., Perez, C.M., Blakeney, A.B., Castillo, D.T., Kongseree, N., Laignelet, B., Lapis, E.T., Murty, V.V.S., Paule, C.M. and Wehh, B.B.1981." International Cooperative Testing on the Amylose Content of Milled Rice Starch." **Starch/Stärke.** 33 (5) : 157-162.

Juliano, B.O. 1985. "Polysaccharides, Proteins and Lipids of Rice." In Juliano, B.O., editor. **Rice Chemistry and Technology.** St. Paul, Minnesota : Amer. Assoc. Cereal Chem.

Kang, I.J. and Byun, M.W. 1996. "Development of Modified Starch by Gamma Irradiation." **Korean J. Food Sci. and Technol.** 28 : 514.

Kang, I.J., Yook, H.S., Bae, C.H., Lee, H.S., Kwon, J.H. and Chung, C.K. 1999. "Production of Modified Starches by Gamma Irradiation." **Radiat. Phys. Chem.** 54 : 425-530.

Kerteesz, Z.I., Schulz, E.R., Fox, G. and Gibson, G. 1959. "Effects of Ionizing Radiations on Plant Tissues. 4. Some Effect of Gamma Radiation on Starch and Starch Fractions." **Food Res.** 24 : 609.

Kume, T. and Tamura, N. 1987. "Change in Digestibility of Raw Starch by Gamma Irradiation." **Starch/Stärke.** 39 : 71.

Lagunas-solar, M.C. 1995. "Radiation Processing of Food : An Overview of Scientific Principals and Current Status." **J. Food Prot.** 58(2) : 186.

Larmond, E. 1977. **Laboratory Methods for Sensory Evaluation of Foods.** Canada : Agriculture Canada Publication 1637/E, Department of Supply and Services.

Liebster, J. and Kopoldova, J. 1964. "The Radiation Chemistry of Amino Acids." **Adv. Radiat. Biol.** 1 : 157.

Lorenze, K.J. and Kulp, K. 1991. **Handbook of Cereal Science and Technology.** New York : Marcel Dekker.

MacArthur, L.A. and D'Appolonia, B.L. 1984. "Gamma Irradiation of Wheat. II. Effects of Low Dosage Radiation on Starch Properties." **Cereal Chem.** 61 : 321-326.

Martin, M. and Fitzgerald, M.A. 2002. "Proteins in Rice Grains Influence Cooking Properties." **J. Cereal Sci.** 36 : 285-294.

Matsuo, T. 1995. "Rice Grain Storage." In Matsuo et al., editors. **Physiology of Science of Rice Plant. Vol. 2.** Tokyo, Japan : Food and Agriculture Policy Research Center.

Navanugraha, U. and Grant, D.R. 1992. "Effect of Gamma Irradiation on the Cooking Characteristics of Wild Rice (*Zizania aquatica* L.)." **Food Res. Inter.** 25 : 199–202.

Nawar, W.W. 1983. "Comparison of Chemical Consequences of Heat and Irradiation Treatment of Lipids." In Elias, P.S. and Cohen, A.J., editors. **Recent Advances in Food Irradiation.** Amsterdam : Elsevier :115.

Newport Scienctific Ply,Ltd. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyzer.** Newport, Australia : Newport Scientific Pty.

Noomhorm, A., Kongseree, N. and Apintanapong, M. 1997. "Effect of Aging on the Quality of Glutinous Rice Crackers." **Cereal Chem.** 74(1) : 12-15.

Oh, S.H., Lee, Y.S., Lee, J.W., Kim, M.R., Yook, H.S. and Byun, M.W. 2005. "The Effect of Gamma Irradiation on Non Enzymatic Browning Reaction in the Aqueous Model Solutions." **Food Chem.** 92 : 357.

Patindol, J., Wang, Y.J. and Jane, J.L. 2005. "Structure-Functionality Changes in Starch Following Rough Rice Storage." **Starch/Stärke.** 57 : 197-207.

Perdon, A.A., Slebenmorgen, T.J. , Buescher, R.W. and Gbur, E.E.1999. "Starch Retrogradation and Texture of Cooked Milled Rice during Storage." **J. Food Sci.** 64(5) : 828-832.

Roy, M.K., Ghosh, S.K. and Chatterjee, S.R. 1991. "Gamma Irradiation of Rice Grains." **J. Food Sci. and Technol.** 28 : 337–340.

Sabularse, V.C., Liuzio, J.A. , Rao, R.M. and Grodner, R.M. 1991. "Cooking Quality of Brown Rice as Influenced by Gamma Irradiation Variety and Storage." **J. Food Sci.** 56(1) : 96-98.

Sabularse, V.C., Liuzio, J.A., Rao, R.M. and Grodner, R.M. 1992. "Physicochemical Characteristics of Brown Rice as Influenced by Gamma Irradiation." **J. Food Sci.** 57(1) : 143-145.

Scherz, H. 1979. "Radiolysis of Starch (in German)." **Starch/Stärke.** 31 : 423.

Sesmat, A. and Meullenet, J.F. 2001. "Prediction of Rice Sensory Texture Attributes from a Single Compression Test , Multivariate Regression , and a Stepwise Model Optimization Method." **J. Food. Sci.** 66(1) : 124-131.

Shastry, B.S. and Raghavendra Rao, M.R. 1971. "Studies on Rice Bran Lipase." **Indian J. Biochem. Biophys.** 8 : 327.

Sirisoontaralak, P and Noomhorm, A. 2005. "Changes to Physicochemical Properties and Aroma of Irradiated Rice." **Food Chem**. 93(1) : 103-111.

Sirisoontaralak, P. and Noomhorm, A. 2007. "Changes in Physicochemical and Sensory Properties of Irradiated Rice During Storage." **J. Stored. Prod. Res.** 43(3) : 282-289.

Tarladgis, B.G., Watts, B.M., Younathan, M.T. and Dugan, L.R. Jr. 1960. "A distillation method for quatilative determination of malonaldehyde in rancid foods." **J. Am. Oil Chemists' Soc.** 37 : 44.

Teo, C.H. and Seow, C.C. 1992. "A Pulsed NMR Method for the Study of Starch Retrogradation." **Starch/Stärke.** 44(8) : 288-292.

Thayer, D.W., Christopher, J.P., and Campbell, L.A. 1987. "Toxicology Studies of Irradiation-Sterilized Chicken." **J. Food Prot.** 50 : 278.

Uzonov, G., Tsoluva, C. and Nestorov, N. 1972. "Change in Soluble Muscle Proteins and Isoenzymes of Lactate Dehydrogenase in Irradiated Beef Meat." **Int. J. Radiat. Biol.** 22 : 437.

Vacat, C.E. and Harms-Ringdahl, M. 1986. "Radiation-Induced Lipid Peroxidation in Whole Grain of Rye Wheat and Rice : Effect on Linoleic and Linolenic Acid." **Radiat. Phys. Chem.** 28 : 325-330.

Whislter, R.L. and Benmiller, J.N. 1999. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists.** St. Paul, Minnesota : Eagan Press.

Wootton, M., Djojonegoro, H. and Driscoll, R. 1988. "The Effect of Gamma Irradiation on the Quality of Australian Rice." **J. Cereal Sci.** 7 : 309–315.

Wu, D., Shu, Q., Wang, Z. and Xia, Y. 2002. "Effect of Gamma Irradiation on Starch Viscosity and Physicochemical Properties of Different Rice." **Radiat. Phys. Chem.** 65(1) : 79-86.

Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S. and Blanchard, C. 2003. "Effect of Rice Storage on Pasting Properties of Rice Flour." **Food Res. Inter**. 36 : 625-634.

ภาคผนวก ก.
วิธีวิเคราะห์

1. ปริมาณอะไมโลส (Juliano *et al.*, 1981)

1.1 เครื่องมือวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer)

1.2 สารเคมี

1.2.1 1 N Acetic acid

1.2.2 1 N Sodium hydroxide

1.2.3 95 % Ethyl alcohol

1.2.4 Iodine solution (I_2 0.4 g. and KI 4.0 g. in 200 ml distillation water)

1.2.5 Potato amylose standard

1.3 วิธีการทดลอง

<u>การเตรียมตัวอย่าง</u>

1.3.1 บดข้าวให้เป็นแป้ง ชั่งแป้ง 0.1 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติม 95% Ethyl alcohol 1 มิลลิลิตร หมุนขวดเบา ๆ ให้แป้งกระจายตัว แล้วเติม 1 N Sodium hydroxide 9 มิลลิลิตร

1.3.2 ต้มในน้ำเดือด 10 นาที แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตั้งไว้ 24 ชั่วโมง

1.3.3 ปิเปตสารละลายแป้ง 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มี 1 N Acetic acid 1 มิลลิลิตร และ Iodine solution 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น ตั้งไว้ 30 นาที

1.3.4 นำไปวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 620 นาโนเมตร คำนวณค่าที่ได้จากกราฟมาตรฐาน

<u>การทำกราฟมาตรฐาน</u>

1.3.5 ชั่ง Potato amylose standard 0.04 กรัม ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10มิลลิลิตร แล้วทำตามข้อ 1.3.1 – 1.3.2

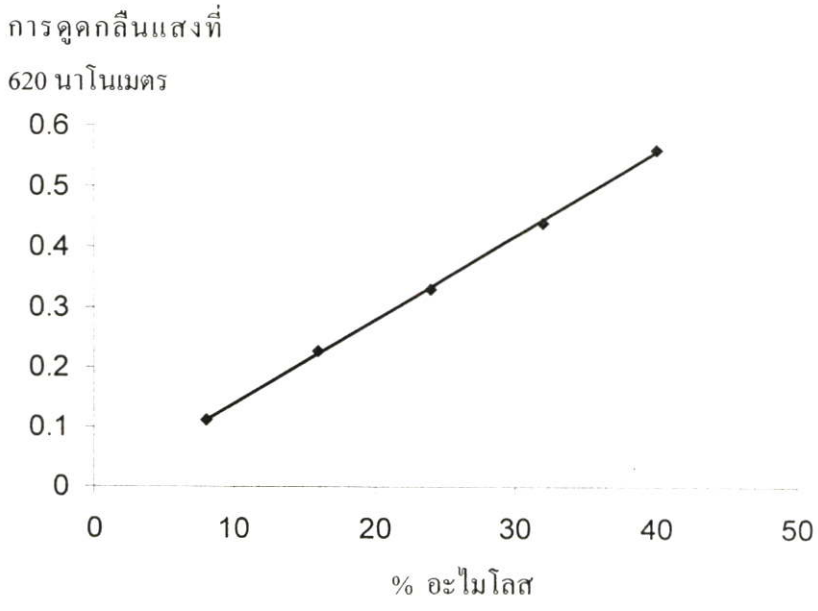
1.3.6 ปิเปตสารละลาย Potato amylose standard 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

1.3.7 เติม 1 N Acetic acid 0.2 0.4 0.6 0.8 และ1.0 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรที่มีสารละลาย Potato amylose standard ตามลำดับ

1.3.8 เติม Iodine solution 2 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ครบ 100 มิลลิลิตร

1.3.9 นำไปวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 620 นาโนเมตร

1.3.10 พล็อตกราฟมาตรฐานระหว่าง % amylose (8 16 24 32 และ 40%) กับค่าการดูดกลืนคลื่นแสง ดังรูป ก. 1



รูป ก.1 กราฟมาตรฐานของการหาปริมาณอะไมโลส

2. วิเคราะห์ค่า TBA โดยวิธี TBA test (Tarladgis *et al.*, 1960)

2.1 เครื่องมือ

2.1.1 เครื่องกลั่นระเหยสุญญากาศ

2.1.2 เครื่องมือวัดการดูดกลืนคลื่นแสง (Spectrophotometer)

2.2 สารเคมี

2.2.1 4 M Hydrochloric acid

2.2.2 Thiobarbituric acid solution (0.2883 กรัมในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร)

2.3 วิธีการทดลอง

2.3.1 ชั่งตัวอย่างข้าวบดละเอียด 10 กรัม ลงในขวดก้นกลม เติมน้ำกลั่น 97.5 มิลลิลิตร ตามด้วย 4 M Hydrochloric acid 2.5 มิลลิลิตร

2.3.2 ทำการกลั่นภายใต้สุญญากาศ จนสารที่กลั่นได้ครบ 50 มิลลิลิตร

2.3.3 ดวงสารละลายที่กลั่นได้ 5 มิลลิลิตร ตามด้วย Thiobabituric acid solution 5 มิลลิลิตร

2.3.4 ต้มในน้ำเดือด 35 นาที ทำให้เย็น 10 นาที เขย่า ทำการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 538 นาโนเมตร

2.3.5 ทำ Blank โดยใช้น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ตามด้วย Thiobabituric acid solution 5 มิลลิลิตร

2.3.6 คำนวณผลการทดลอง

TBA value = 7.8 A (mg malonaldehyde / kg sample)

โดย A คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง

3. การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ (AOAC, 1990)

3.1 สารเคมี

3.1.1 Alcohol – phenolphthalein solution (0.4 g phenolphthalein to 1 L alcohol)

3.1.2 0.0178 N Potassium hydroxide standard solution (1 ml = 1 mg KOH)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 ชั่งแป้ง 20 $\pm$ 0.01 กรัม ลงใน flask เติมเบนซิน 50 มิลลิลิตร ปิดปาก flask

3.2.2 เขย่า 30 นาที ทำการกรอง ปิเปตมา 25 มิลลิลิตร ลงใน flask ตามด้วย 25 มิลลิลิตร ของ Alcohol – phenolphthalein solution

3.2.3 ไตเตรทด้วย 0.0178 N Potassium hydroxide standard solution จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู

3.2.4 บันทึกผล คำนวณ

mg KOH /100 g sample (dry basis) = 10 x (titration – blank) volume

4. การวัดสีเหลืองของข้าวก่อนและหลังการหุง ใช้เครื่องวัดสี Chromameter ในค่า Hunter Lab

4.1 เครื่องวัดสี (Chromameter)

4.2 วิธีการ

4.2.1 ใส่ตัวอย่างลงในภาชนะ ทำการวัด

4.2.2 ค่าที่อ่านได้ คือ L a b โดย b คือค่าสีเหลือง

5 คุณสมบัติด้านความหนืด (Anonymous, 1995)

5.1 เครื่องมือ ใช้เครื่องวัดความหนืดของแป้ง (Rapid visco analyzer)

5.2 วิธีการ

5.2.1 ชั่งของตัวอย่าง 14% แต่ถ้าตัวอย่างมีความชื้นไม่เป็น 14% ต้องนำไป

คำนวณหาปริมาณตัวอย่างและน้ำกลั่นใหม่ ดังนี้ น้ำหนักแป้งข้าว 3.00 $\pm$ 0.01 กรัม น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร ที่ความชื้น

$$S = \frac{86 \times A}{100 - M}$$

$$W = 25.0 + (A - S)$$

โดย S = น้ำหนักตัวอย่างที่ถูกต้อง

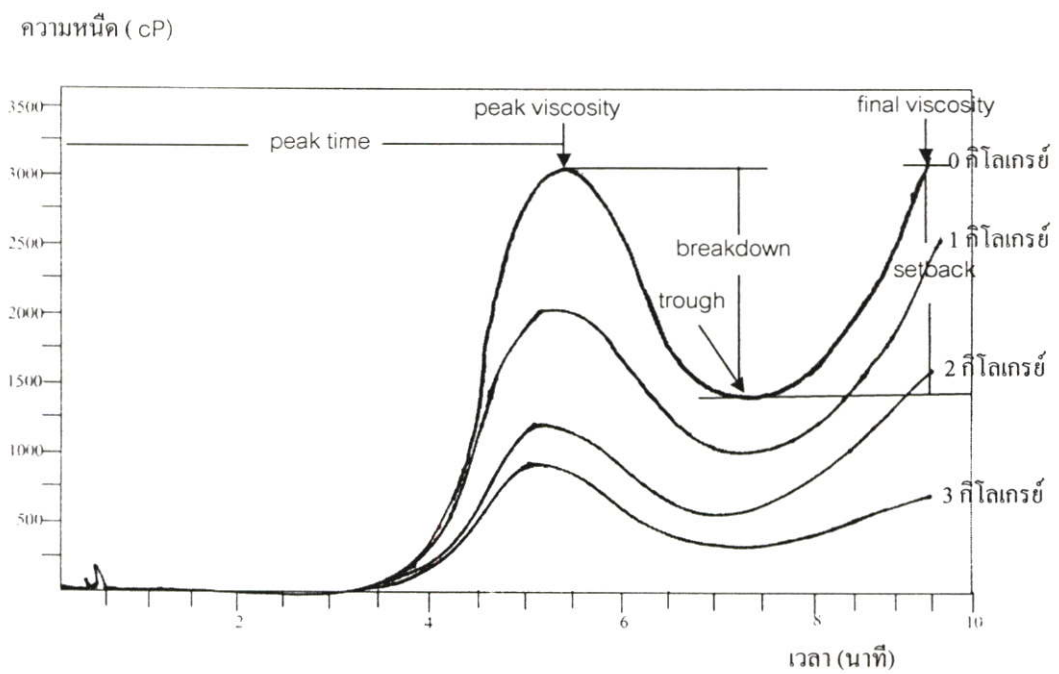
A = น้ำหนักตัวอย่างที่ความชื้น 14%

M = ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง

W = น้ำหนักน้ำที่ถูกต้อง

5.2.2 เทแป้งลงในภาชนะที่เติมน้ำไว้แล้ว คนตัวอย่างและน้ำให้ทั่วถึง

5.2.3 ทำตามวิธีการใช้เครื่องวัดความหนืดของแป้ง อ่านค่าที่ได้จากวิเคราะห์ บันทึกผล



หมายเหตุ : หน่วยความหนืด cP = หน่วยความหนืด RVU x 12

6. การวัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุกโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

6.1 เครื่องมือ

6.1.1 เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

6.1.2 หม้อหุงข้าวไฟฟ้า ยี่ห้อ Sharp ขนาด 0.6 ลิตร

6.2 วิธีการทดลอง

วิธีการเตรียมตัวอย่าง (งามชื่น คงเสรี, 2532)

6.2.1 ชั่งข้าว 100 กรัม ลงในหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เติมน้ำ 160 มิลลิลิตร โดย ปริมาณน้ำและน้ำหนักข้าวได้จากสูตร

$W = 0.874 + 0.056A$

W = ปริมาณน้ำหุงต้มที่เหมาะสม (เท่า ของน้ำหนักข้าวสาร)

A = % อะไมโลส

6.2.2 หลังจากข้าวสุก นำไปแช่ในตู้เย็นอุณหภูมิ 5°ซ. 1 ชั่วโมง แล้ว นำมาไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที

6.2.3 นำไปวัดเนื้อสัมผัสของข้าวสุก ตามวิธีการของ Sesmat และ Meullenet (2001)

วิธีการวัดเนื้อสัมผัสข้าวสุกโดยใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

6.2.4 ใช้เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer)

6.2.5 ใช้วิธีการ Flat plate compression test โดยใช้หัววัดแบนขนาด 75 มิลลิเมตร

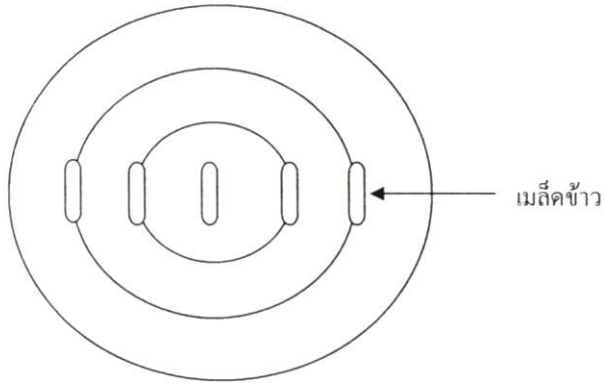
6.2.6 เลือกรูปแบบการวัดเป็น

Test mode and option : Measure force in compression

Parameter :

pretest	20 มิลลิเมตร/วินาที
Test speed	0.5 มิลลิเมตร/วินาที
Post test	20 มิลลิเมตร/วินาที
Distance	90%

6.2.7 เลือกเมล็ดข้าวที่มีลักษณะสมบูรณ์ 5 เมล็ดวางบนฐานทดสอบ ดังรูป



6.2.8 อ่านค่าที่ได้เป็นความแข็งมีหน่วยเป็นกิโลกรัม.แรง (kg.force)

7. การพองตัวของข้าวโดยใช้การทอด (ปกรณ์พรรณ เผือกสวัสดิ์, 2545)

7.1 อุปกรณ์

7.1.1 กระทะไฟฟ้าตั้งอุณหภูมิได้

7.1.2 ตู้อบ (Hot air oven)

7.2 วิธีการ

7.2.1 นำข้าวหุงสุกที่เหลือจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส มาอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 70°ซ. เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

7.2.2 ชั่งน้ำหนักข้าวที่ผ่านการอบแห้ง 5 กรัม นำมาวัดปริมาตรโดยใช้หลักการการแทนที่ด้วยเมล็ดแมงลัก วัดปริมาตรเม็ดแมงลักที่ถูกแทนที่ในกระบอกขนาด 10 มิลลิลิตร บันทึกผลค่าที่ได้เป็นปริมาตรของข้าวก่อนการพองตัว

7.2.3 นำข้าวจากข้อ 7.2.2 มาทอดในกระทะไฟฟ้าที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 200°ซ. (อุณหภูมิของน้ำมันเท่ากับ 180°ซ.) จนข้าวพองเต็มที่

7.2.4 ทำการวัดปริมาตรเช่นเดียวกับข้อ 7.2.2 ค่าที่ได้เป็นปริมาตรของข้าวพอง

7.2.5 คำนวณค่าการพองตัว

$$\text{การพองตัว (เท่า)} = \frac{\text{ปริมาตรของข้าวพอง}}{\text{ปริมาตรของข้าวก่อนการพองตัว}}$$

8. คุณสมบัติการหุงต้ม (Batcher *et al.*, 1956)

8.1 เครื่องมือ

8.1.1 ตะแกรงลวดทรงกระบอก

8.1.2 คาลิปเปอร์ เวอร์เนีย

8.1.3 ตู้อบ (Hot air oven)

8.2 วิธีการ

8.2.1 ชั่งข้าวสาร 10 กรัม ลงในตะแกรงลวดทรงกระบอก วัดความสูงของข้าวโดยรอบ 6 จุด บันทึกค่า

8.2.2 นำไปต้มในน้ำกลั่นเดือดเป็นเวลานานเท่าเวลาต้มสุกที่หาได้

8.2.3 ยกตะแกรงขึ้น ล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างใส (น้ำที่ใช้ล้างกับน้ำต้มข้าวรวมกัน)

8.2.4 ตั้งตะแกรงให้สะเด็ดน้ำ วัดความสูงของข้าวโดยรอบ 6 จุด บันทึกค่า

คำนวณ

$$\text{การขยายตัวของข้าวสุก (เท่า)} = \frac{\text{ความสูงเฉลี่ยของข้าวสุก}}{\text{ความสูงเฉลี่ยของข้าวสาร}}$$

8.2.5 นำข้าวสุกที่ได้ชั่งน้ำหนัก บันทึกผล

$$\text{การดูดซึมน้ำ (เท่า)} = \frac{\text{น้ำหนักข้าวสุก}}{\text{น้ำหนักข้าวสาร}}$$

8.2.6 นำน้ำข้าวที่ได้จากข้อ 8.2.3 ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร

8.2.7 ตวงน้ำข้าว 25 มิลลิลิตร ลงในกระป๋องอะลูมิเนียม ที่ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักแล้ว นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 110°ซ. เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้เย็นใน Desiccators ชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำข้าว

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายในน้ำข้าว(\%)} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำข้าวหลังอบ} \times 250 \times 100}{\text{น้ำหนักน้ำข้าวก่อนอบ} \times \text{น้ำหนักข้าวสาร}}$$

9. เวลาต้มสุก

วิธีการทดลอง

9.1 ชั่งข้าวสาร 5 กรัม ลงในน้ำเดือดปริมาตร 150 มิลลิลิตร

9.2 เมื่อครบ 10 นาที ตักข้าว 10 เมล็ดมาทดสอบโดยการบี้บนจานแก้วทุก 1 นาที จนกระทั่งข้าวที่นำมาทดสอบ ไม่มีลักษณะเป็นไต และเวลาที่ได้เป็นเวลาต้มสุก

10. การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยการใช้ผู้ทดสอบชิม

10.1 ชั่งข้าว 250 กรัม ลงในหม้อหุงข้าวไฟฟ้า เติมน้ำ 400 มิลลิลิตร โดยปริมาณน้ำและน้ำหนักข้าวได้จากสูตร (งามชื่น คงเสรี, 2532)

สูตร $W = 0.874 + 0.056A$

W = ปริมาณน้ำหุงต้มที่เหมาะสม (เท่า ของน้ำหนักข้าวสาร)

A = % อะไมโลส

10.2 เสนอตัวอย่างข้าวสุกเย็นก่อนแล้วตามด้วยข้าวสุกอุ่น ประมาณ 20 กรัม (ดังรูปที่ 3 ในภาคผนวก ง.)

ข้าวสุกอุ่น คือ ข้าวสุกที่อยู่ในหม้อ โดยเสียบปลั๊กไฟฟ้า อุ่นไว้อุณหภูมิข้าวประมาณ 45 – 50°ซ.

ข้าวสุกเย็น คือ ตักข้าวสุกตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3 ชั่วโมง

10.3 ผู้ชิมให้คะแนนตามระดับความพึงพอใจ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) (Larmond, 1977) โดยมีผู้ทดสอบ 20 คน

ภาคผนวก ข.

แบบทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ชื่อ.....

วันที่.....

ขอให้ท่านชิมข้าวเพื่อตรวจสอบ สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส แล้วใส่คะแนนลงในช่องว่างการให้คะแนนถือหลักเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

1 ไม่ชอบมากที่สุด

2 ไม่ชอบมาก

3 ไม่ชอบปานกลาง

4 ไม่ชอบน้อย

5 ชอบและไม่ชอบเท่ากัน

6 ชอบน้อย

7 ชอบปานกลาง

8 ชอบมาก

9 ชอบมากที่สุด

รหัสตัวอย่าง	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส

รหัสตัวอย่าง	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส

ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลอง
(กรมวิชาการเกษตร, 2532)

sov (source of variation)	df	SS	MS	F	p value
ปริมาณรังสี (a)	a-1	SS_a	$MS_a = SS_a /(a-1)$	MS_a/MS_r	* หรือ ns
error (r ภายใน a)	a(r-1)	SS_R	$MS_r = SS_R /a(r-1)$		
ระยะเวลาเก็บ (b)	(b-1)	SS_b	$MS_b = SS_b /(b-1)$	MS_b/MS_E	* หรือ ns
error	a(r-1)(b-1)				
ปริมาณรังสี * ระยะเวลาเก็บ (a*b)	(a-1)(b-1)	SS_{a*b}	$MS_{a*b}=SS_{a*b}/(a-1)(b-1)$	MS_{a*b}/MS_E	* หรือ ns
pooled error (E)	a(r-1)(b-1)	SS_E	$MS_E =SS_E/ a(r-1)(b-1)$		

a หมายถึง ปริมาณรังสี

b หมายถึง ระยะเวลาเก็บ

r หมายถึง จำนวนซ้ำของการทดลอง

a*b หมายถึง ปริมาณรังสีร่วมกับระยะเวลาเก็บ

* หมายถึง เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติสำเร็จรูปแล้วมีค่า $p < 0.05$ คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ns หมายถึง เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณทางสถิติสำเร็จรูปแล้วมีค่า $p \geq 0.05$ คือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$C.F. = [\sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} (X_{ij})^2] / abr$$

$$SS_a = [\sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} (\frac{X_{ij}}{br})^2] - C.F. = \text{ผลรวมของ } SS_a \text{ ของทุกปริมาณรังสี}$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^{a} (SS_r)_i^2 = \text{ผลรวมของ } SS_r \text{ ของทุกปริมาณรังสี}$$

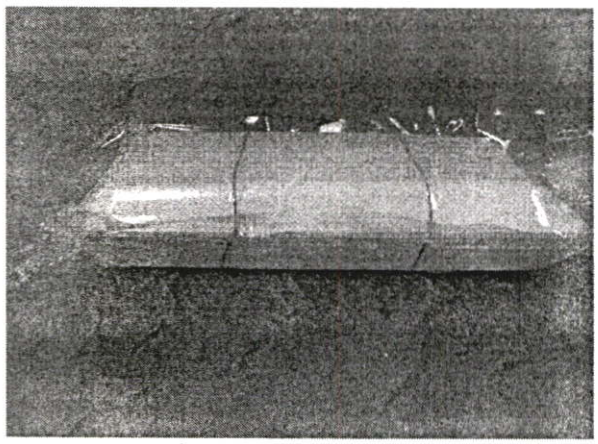
$$SS_b = [\sum_{j=1}^{b} \frac{(b_j)^2}{ar}] - C.F.$$

$$SS_{a*b} = [\sum_{i=1}^{a} \sum_{j=1}^{b} \frac{(ab_{ij})^2}{r}] - C.F. - SS_a - SS_b$$

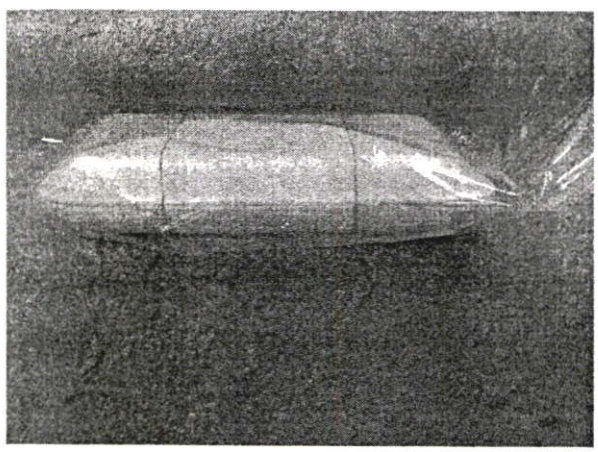
$$SS_E = \sum_{i=1}^{a} (SS_e)_i = \text{ผลรวมของ } SS_e \text{ ของทุกปริมาณรังสี}$$

ภาคผนวก ง.

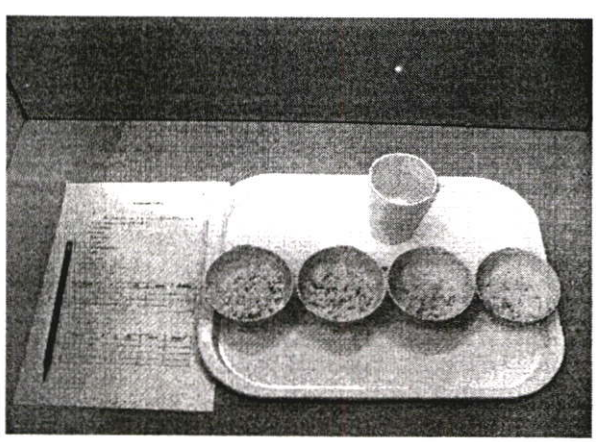
รูปภาพประกอบการทดลอง



รูปที่ 1 การบรรจุแบบสุญญากาศของข้าวกล้องอะไมโลสต่ำ ข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียว



รูปที่ 2 การบรรจุแบบมีอากาศของข้าวอะไมโลสสูงและข้าวเหนียว



รูปที่ 3 การจัดตัวอย่างข้าวเพื่อทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย สุรศักดิ์ สัจจบุตร

วัน เดือน ปีเกิด 31 มกราคม 2515

ประวัติการศึกษา ปีการศึกษา 2540 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร
มหาวิทยาลัยรามคำแหง กรุงเทพมหานคร

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2542 บริษัท เอสทีซี ฟู้ดแพค จำกัด
ตำแหน่ง หัวหน้าฝ่ายผลิต จ.สมุทรปราการ

พ.ศ.2542-ปัจจุบัน รับราชการตำแหน่งนักชีววิทยารังสี 5
สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กรุงเทพมหานคร

ผลงานวิจัย เป็นผู้ร่วมวิจัยในโครงการวิจัยดังนี้

1. ผลของรังสีแกมมาต่อคุณภาพปูอัด
2. การปรับปรุงคุณภาพทางสุขอนามัยและยืดอายุการเก็บรักษาหมูยอด้วยรังสีแกมมา
3. การปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของปลาร้าด้วยรังสีแกมมา
4. การปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของปูเค็มด้วยรังสีแกมมา
5. การศึกษาผลของรังสีต่อคุณภาพทุเรียนเพื่อการส่งออก
6. การปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของกุ้งจ่อมด้วยรังสีแกมมา

งานวิจัยที่กำลังดำเนินการ

1. การทดสอบการวางตลาดเครื่องเทศและสมุนไพรฉายรังสี
2. การปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์ของปลาจ่อมด้วยรังสีแกมมา
3. การยืดอายุการเก็บรักษาเห็ดสดร่วมด้วยรังสีแกมมา
4. การทดสอบสารสำคัญในสมุนไพรฉายรังสี