บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ข้าวเกรียบปลา (Fish Cracker)

ข้าวเกรียบปลา (Fish Cracker) หมายถึง อาหารว่างชนิดหนึ่งที่บริโภคอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้ ได้แก่ ยะลา ปัตตานี และนราธิวาส ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลามีส่วนผสมของแป้งและปลาเป็นหลัก โดยสัดส่วนของปลาที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 50-70 ของส่วนผสมทั้งหมด ปลาที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบปลาสดจะนิยมใช้ปลาทะเลที่หาได้จากการทำประมงในพื้นที่ เช่น ปลาหลังเขียว ปลาทูแขก ปลาทูลัง และปลาโอ เป็นต้น บดผสมให้เข้ากับเครื่องปรุงรส นวดให้เข้ากันจนเป็นก้อนโด (dough) นึ่งหรือต้มให้สุก พักก้อนโดที่สุกให้เย็น หั่นเป็นแผ่นบางๆ นำไปทำให้แห้งด้วยแสงแดดหรือวิธีอื่นที่เหมาะสมก่อนนำไปทอดหรืออบจนแผ่นข้าวเกรียบมีลักษณะที่พองตัวเพื่อรับประทาน สำหรับข้าวเกรียบปลาสดในพื้นที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ “กรือโป๊ะ” ข้าวเกรียบปลาที่ใช้เรียกในประเทศไทยคือ “Keropok” ในประเทศมาเลเซียรู้จักกันในชื่อ “Keropok lekor” ส่วน “Krupuk” หรือ “Kerupok” ใช้เรียกในประเทศอินโดนีเซียและ “Banh phong tom” ในประเทศเวียดนาม (Tongdang, 2011)

2.1.1 ส่วนผสมหลักของข้าวเกรียบปลา

2.1.1.1 เนื้อปลา

ปลาที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบปลาสด นิยมใช้ปลาชนิดเดียวกันกับปลาที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบปลากึ่งสำเร็จรูป (ข้าวเกรียบแห้ง) และเป็นปลาที่ได้จากการทำประมงในพื้นที่ เช่น ปลาหลังเขียว ปลาทูแขก ปลาทูลัง และปลาโอ เป็นต้น เนื้อปลาเป็นแหล่งโปรตีนและทำให้เกิดกลิ่นรสเฉพาะตัวของข้าวเกรียบ ในเนื้อปลาจะมีเส้นใยโปรตีนเป็นส่วนประกอบที่ช่วยให้คุณภาพของข้าวเกรียบดีขึ้น เช่น ไมโอซิน ซึ่งเป็นโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการหดตัวของกล้ามเนื้อ เป็นโปรตีนที่มีสายโซ่ยาวเป็นตัวอุ้มน้ำและทำให้เกิดร่างแหเล็กๆ จำนวนมาก ร่างแหดังกล่าวทำให้เกิดความเหนียวขึ้นในเนื้อปลา (Cheow and Yu, 1997) จากการสืบค้นข้อมูล พบว่า การศึกษาถึงชนิดของปลา หรือปริมาณเนื้อปลาต่อคุณภาพของข้าวเกรียบปลาสด (เจลข้าวเกรียบ) ยังมีน้อย ส่วนใหญ่มุ่งเน้นศึกษาถึงผลของเนื้อปลาต่อคุณภาพของข้าวเกรียบทอดเป็นหลัก ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาในข้าวเกรียบทอด เช่น

King (2002) ผลิตข้าวเกรียบจากปลาตาโต (*Auritus Brachydeuterus*) โดยใช้อัตราส่วนของปลาและแป้งมันสำปะหลังต่างกัน 3 ระดับ คือ 40:60, 50:50 และ 60:40 ในการผลิต

Prince of Songkla University Pattani Campus

ข้าวเกรียบปลา พบว่าปริมาณองค์ประกอบได้แก่ โปรตีน ไขมัน และเถ้า ของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของปลาที่เพิ่มขึ้น เมื่อประเมินทางประสาทสัมผัส พบว่า สูตรที่ได้รับการยอมรับสำหรับการผลิตข้าวเกรียบ คือ ใช้ปลาและแป้งมันสำปะหลังในอัตราส่วน 50:50 และ 60:40 เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางกายภาพของข้าวเกรียบพบว่าการพองตัวของข้าวเกรียบปลาอาจสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการเกิดเจลของโปรตีนไมโอไฟบริล ซึ่งปริมาณเนื้อปลาที่เพิ่มขึ้นและความสามารถในการเกิดเจลที่ดีจะส่งเสริมให้ข้าวเกรียบพองตัวมาก

Nurul *et al.* (2009) รายงานว่าการผลิตข้าวเกรียบปลาด้วยอัตราส่วนของปลาและแป้งมันสำปะหลังที่แตกต่างกันส่งผลต่อทั้งปริมาณองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของข้าวเกรียบปลา ปริมาณโปรตีนและไขมันเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับปริมาณเนื้อปลาที่เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามพบว่าการขยายตัวเชิงเส้น การดูดซับน้ำมันและค่าความสว่างของข้าวเกรียบปลาลดลงเมื่อปริมาณเนื้อปลาเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งของข้าวเกรียบเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณเนื้อปลาในสูตร

2.1.1.2 แป้ง

แป้งที่ใช้ในการผลิตข้าวเกรียบปลา มีหลายชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวจ้าว แป้งสาคู เป็นต้น แต่แป้งที่นิยมใช้มากคือ แป้งมันสำปะหลังผสมแป้งสาคูเล็กน้อย เพื่อให้ได้ข้าวเกรียบที่มีความพองตัว กรอบได้นาน จากการศึกษาของ Tongdang *et al.* (2008) พบว่า การเติมแป้งสาคูผสมแป้งมันสำปะหลังปริมาณร้อยละ 6, 12, 18 และ 24 ส่งผลให้ข้าวเกรียบปลาสำเร็จรูป (ข้าวเกรียบปลาที่ทอด) มีอัตราการพองตัวลดลงตามปริมาณแป้งสาคูที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเติมแป้งสาคูอาจไปเพิ่มค่าความแข็งแรงของเจลข้าวเกรียบได้ เนื่องจากแป้งสาคูมีความสามารถในการคืนตัว (Retrogradation) สูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง

Cheow *et al.* (2002) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งชนิดต่างๆ กับการพองตัวของข้าวเกรียบปลาที่ทอด โดยพบว่าแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีค่าการขยายตัวเชิงเส้น (Linear Expansion) สูงกว่าแป้งสาลี จะมีค่ากำลังการพองตัว (Swelling Power) ความสามารถในการละลาย (Solubility) และค่า Amylose Leaching สูงกว่า เนื่องจากแป้งสาลีมีปริมาณโปรตีนสูงกว่า แต่มีขนาดอนุภาคของแป้งเล็กกว่าแป้งสาคูและแป้งมันสำปะหลัง เมื่อพิจารณาโครงสร้างทางจุลภาคและเนื้อสัมผัสของเจลข้าวเกรียบปลา โดยพบว่าค่าแรงเจาะทะลุ (Penetration Force) ของเจลข้าวเกรียบปลามีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของเม็ดแป้งที่บวมพอง (กว้างและยาว) สูงสุด จะมีค่าความแข็งแรงของเจลสูงสุด รองลงมาคือแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลี ตามลำดับ

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.1.1.3 เครื่องปรุงรส

การเติมเครื่องปรุงรส เช่น เกลือ พริกไทย น้ำตาล กระเทียม และผงชูรส เพื่อเพิ่มกลิ่นรสที่ดีของข้าวเกรียบ การเติมส่วนผสมเหล่านี้ลงไปในแป้งจะสามารถไปแย่งจับกับน้ำ ทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งสูงขึ้น

Cheow and Yu (1997) ศึกษาผลของเกลือ น้ำตาล และโมโนโซเดียมกลูตาเมตต่อการเกิดเจลของข้าวเกรียบ พบว่าเกลือมีผลต่อการเกิดเจลมากกว่าน้ำตาลและโมโนโซเดียมกลูตาเมต เนื่องจากเกลือโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงไป (ร้อยละ 2) จะไปอยู่บริเวณรอบๆ ผลึกของอนุภาคแป้ง ส่งผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่งสูงขึ้น 4-5 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำตาล (ร้อยละ 1) และโมโนโซเดียมกลูตาเมต (ร้อยละ 0.4) ที่เติมลงไปมีผลน้อยกว่าเนื่องจากมีการเติมในสูตรเดิมเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม น้ำตาลมีผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งได้ หากมีการเติมในปริมาณมาก เพราะน้ำตาลซูโครสจะเกิดอันตรกิริยากับแป้งในส่วนของ Amorphous region เกิดเป็นสะพานเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ของแป้ง ส่งผลให้เกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งช้าลง

นอกจากนี้ Cheow and Yu (1999) ได้ศึกษาผลของเกลือ น้ำตาล และโมโนโซเดียมกลูตาเมตต่อคุณสมบัติด้านความหนืดและความยืดหยุ่นของเจลข้าวเกรียบ พบว่าเมื่อเติมเกลือร้อยละ 2 และเพิ่มปริมาณปลา จะมีผลให้ค่า Storage modulus (G') เพิ่มขึ้น และค่า Tangent (tan § = G"/G') ลดลง บ่งชี้ถึงความสามารถในการเกิดโครงร่างตาข่ายและความสามารถในการเชื่อมประสานที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกลือมีผลอย่างมากในการเกิดโครงร่างตาข่ายของโปรตีนกล้ามเนื้อปลา ภายในโครงร่างตาข่ายของปลาและแป้ง (Fish-starch network)

2.1.2 กระบวนการผลิตข้าวเกรียบปลาแบบสด

"ข้าวเกรียบปลาแบบสด" หรือ "กรือโป๊ะ" มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ปลาและแป้ง ขั้นตอนการผลิตข้าวเกรียบปลาสดเริ่มจากนำแป้งมาผสมกับปลาที่ผ่านการบด หรือบดพร้อมกับส่วนผสมอื่น เช่น เกลือ น้ำตาลทราย และโมโนโซเดียมกลูตาเมต และอาจจะมีการเติมสมุนไพร เช่น พริกไทยดำ และกระเทียมลงไปด้วย (Cheow and Yu, 1997) จากนั้นคลุกเคล้าให้เข้ากัน เมื่อได้ส่วนผสมที่เนื้อเนียนละเอียดที่เรียกว่า โด (Dough) แล้วก็นำมาแบ่งเป็นก้อนๆ ขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์ กลางประมาณ 5 เซนติเมตร ความยาว 25 เซนติเมตร แล้วนำลงไปต้มในน้ำเดือดหรือนึ่งด้วยไอน้ำเพื่อให้โดข้าวเกรียบสุก เกิดการเจลาติไนซ์ (Gelatinized) และเกิดเป็นเจลข้าวเกรียบ (Kyaw *et al*., 2001) ข้าวเกรียบปลาแบบสดมีขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตข้าวเกรียบปลาแบบสด

Prince of Songkla University Pattani Campus

ในกระบวนการผลิต ส่วนประกอบระหว่างแป้งและปลาโดสามารถทำสุกด้วยวิธีการให้ความชื้น (Hydrothermal) โดยวิธีการต้มหรือนึ่ง ซึ่งวิธีการต้มเป็นวิธีการพื้นฐานที่จะช่วยให้เกิดแป้งเจลาติไนซ์ได้สมบูรณ์ วิธีนี้ช่วยลดระยะเวลาในการทำสุก การเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งจะสมบูรณ์หรือไม่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและระยะเวลานึ่ง จากนั้นทำให้ตัวเย็นตัวลงที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการนึ่ง วิธีการนึ่งใช้อุณหภูมิของไอน้ำ 100 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศเป็นเวลาระยะหนึ่ง จากนั้นทำให้ตัวเย็นลงที่อุณหภูมิห้องหรือนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการเซตตัว (การคืน ; Retrogradation) ของแป้ง ส่วนการผลิตข้าวเกรียบแบบแห้ จะนำไปแท่งข้าวเกรียบปลาสดหั่นเป็นแผ่นบางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปตากแดดหรืออบด้วยตู้อบลมร้อนจนมีความชื้นอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9-13 (Huda *et al.*, 2010)

Kyaw *et al.* (2001) ได้ศึกษาผลการทำสุกโดยวิธีการใช้ความดันต่อโครงสร้างและการพองตัวของข้าวเกรียบปลา ที่ผลิตจากแป้งสาลีและแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาลักษณะทางสัญฐานวิทยาของอนุภาคแบ๊งในเจลข้าวเกรียบที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ (ที่ความดันบรรยากาศ/100 องศาเซลเซียส, 5 psi /108 องศาเซลเซียส, 10 psi/115 องศาเซลเซียส และ 15 psi/121 องศาเซลเซียส) พบว่าค่าการขยายตัวเชิงเส้นของข้าวเกรียบปลาที่ทำมาจากแป้งมันสาสีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่ค่าการขยายตัวเชิงเส้นของข้าวเกรียบปลาที่ทำมาจากแป้งมันสำปะหลังจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราการพองตัวจะมีความสัมพันธ์กับการประเมินทางทางประสาทสัมผัส

ของผู้บริโภคต่อตัวผลิตภัณฑ์ เมื่อพิจารณาเจลข้าวเกรียบปลา พบว่าเจลข้าวเกรียบจากแป้งสาลีมีค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการนึ่งเพิ่มขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้เม็ดแป้งบวมพองก็มากขึ้น ในขณะที่เจลข้าวเกรียบจากแป้งมันสำปะหลังมีความค่าแข็งแรงลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการนึ่งสูงขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้น

2.1.3 การเสื่อมเสียของข้าวเกรียบปลาสดแบบสด

ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีส่วยผสมของเนื้อปลาและแป้งเป็นหลัก ปริมาณของปริมาณของเนื้อที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 50 ของส่วนผสมทั้งหมด นับว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดอุดมไปด้วยสารอาหาร อีกทั้งผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดมีปริมาณความชื้นและค่า Water activity ที่สูงถึง 0.9 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบสดแบบสดมีอายุการเก็บรักษาและเสื่อมเสียได้ง่าย สาเหตุหลักที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดมีการเสื่อมเสีย คือเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะทั้งด้านสี กลิ่น และรสที่ไม่พึงประสงค์ ผลิตภัณฑ์จึงไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ตัวอย่างการศึกษาเกี่ยวกับการเสื่อมทางจุลินทรีย์ของผลิตภัณฑ์ที่คล้ายคลึงกับข้าวเกรียบปลาแบบสด เช่น

Dias *et al.* (2013) ศึกษาลักษณะการเสื่อมเสียของไส้กรอกหมูสดจากจุลินทรีย์และคัดแยกชนิดของจุลินทรีย์ด้วยวิธี Polymerase Chain Reaction –Denaturing Gradient Gel Electrophhoresis (PCR-DGGE) โดยใช้ตัวอย่างไส้กรอกหมูสดจากโรงงาน 12 โรงงานเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 80 ในถุงพลาสติกที่ฆ่าเชื้อ วิเคราะห์ทุกวันที่ 0, 14, 28 และ 42 วัน พบว่าจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียของไส้กรอกหมูสดเป็นกลุ่ม Mesophilic bacteria และ Lactic lactic acid bacteria โดยจะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาการเก็บรักษา

Sachidra *et al* (2005) ศึกษาปริมาณจุลินทรีย์ในไส้กรอกควายระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส พบว่าระหว่างกระบวนการผลิตมีจำนวน Total plate count (TPC) 5.41± 0.25 log CFU/g, Coliforms 23.2 MPN/ g, *Staphylococcus aureus* 1.57±0.11 log_{10}CFU/g, ยีนส์และรา 2.29±0.07 log_{10}CFU/g และ Lactic acid bacteria (LAB) 0.60±0.20 log_{10}/g CHU/g ในไส้กรอกสุกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 45 นาที ปริมาณจุลินทรีย์ จะลดลง Total plate count (TPC) 3.75±0.31 log_{10}CFU/g, Coliforms 0.2 MPN/g, ยีสต์และรา 0.72±0.07 log_{10}CFU/g และ Lactic acid becteria (LAB) 0.07±0.01 log_{10}CHU/g และไม่ตรวจพบ S. *aureus*, *Clostridium perfringens* และ *Bacillus cereus* เมื่อนำไส้กรอกควายสุกไปเก็บรักษาเป็นเวลา 31 วัน ภายใต้บรรจุภัณฑ์ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 90 และบรรจุภัณฑ์สุญญากาศที่อุณหภูมิ 4±1 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการเสื่อมเสียภายใต้บรรจุภัณฑ์

สุญญากาศเกิดจาก Lactic acid becteria ส่วนในไส้กรอกควายที่ภายใต้บรรจุภัณฑ์ที่มีคาร์บอนไดออกไซด์การเสื่อมเสียเกิดจากจุลินทรีย์กลุ่ม Microflora เป็นหลัก

Gungor *et al*. (2010) ศึกษาการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ระหว่างสายกระบวนการผลิตไส้กรอก Frankfurter ระหว่างสายกระบวนการผลิตจุลินทรีย์ที่ตรวจพบได้แก่ Aerobic mesophilic bacteria, *Staphylococcus aureus*, *Escherichai Coli* และยีสต์และรา เมื่อนำไส้กรอก Frankfurter ไปผ่านกระบวนการพาสเจอไรซ์ พบว่าปริมาณ Aerobic mesophilic bacteria, *Staphylococcus aureus* ลดลงหลังการให้ความร้อน และไม่ตรวจพบเชื้อ *Escherichai Coli* และยีสต์และรา ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้เป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้ไส้กรอกเสื่อมเสีย และยังเป็นตัวบ่งชี้ถึงกระบวนการผลิตที่ไม่ถูกสุขลักษณะ

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดแบบสด

2.1.4.1 สารอาหาร

จุลินทรีย์ต้องการสารอาหารที่เป็นแหล่งของคาร์บอน ไนโตรเจน วิตามิน รวมทั้งแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบมีปริมาณของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง ซึ่งคาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งของคาร์บอนที่จุลินทรีย์จะนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน ส่วนโปรตีนจะเป็นแหล่งของไนโตรเจน ซึ่งนำมาใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน จึงถือได้ว่าผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดเป็นแหล่งของสารอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์

Rangsit University Pathumthani Campus

2.1.4.2 น้ำหรือความชื้นในอาหาร

น้ำหรือความชื้นในอาหาร เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ค่า Water activity เป็นค่าที่แสดงถึงน้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดมีค่า Water activity ประมาณ 0.9 ซึ่งจัดได้ว่าเป็นอาหารที่มีค่า Water activity สูง จึงทำให้ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดเน่าเสียได้ง่าย ค่า Water activity ของอาหารเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ค่า Water activity ต่ำสุดที่จุลินทรีย์แต่ละชนิดต้องการในการเจริญเติบโตมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนั้นการปรับค่า Water activity ของข้าวเกรียบปลาสดแบบสดให้ต่ำกว่าค่า Water activity ต่ำสุดที่เชื้อเจริญได้ จะสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ออกไปได้

ตารางที่ 2.1 ค่า Water activity ต่ำสุดสำหรับการการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร

กลุ่มจุลินทรีย์	Water activity
แบคทีเรียที่ทำให้อาหารเน่าเสีย	0.90
ยีสต์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย	0.88
ราแบคทีเรียที่ทำให้อาหารเน่าเสีย	0.80

ที่มา : ดัดแปลงจาก สุมัณฑา (2545)

2.1.4.3 อุณหภูมิ

ในการขนส่งและวางจำหน่ายข้าวเกรียบปลาสดแบบสด ผู้ประกอบการไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ จึงเป็นสาเหตุให้เชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic bacteria) เจริญเติบโตได้ดี เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสียและเกิดโรคอาหารเป็นพิษ ซึ่งสามารถเจริญได้ดีที่อุณหภูมิ 30-45 องศาเซลเซียส

2.1.4.4 ปริมาณอากาศ

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดที่ขนส่งและวางจำหน่าย มีการบรรจุแบบธรรมดา (มีอากาศอยู่ภายในถุง) ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนและทำให้อาหารเน่าเสียเจริญได้ดี ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่ม *Pseudomonas* เป็นต้น สำหรับเชื้อราที่ต้องการอากาศในการเจริญเติบโตจะทำให้ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาสดแบบสดเกิดการเน่าเสียบริเวณผิวหน้าของผลิตภัณฑ์

2.1.4.5 ความเป็นกรด-ด่างของอาหาร

ผลิตภัณฑ์ข้าวเกรียบปลาแบบสดมีความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 6.9-7.2 จึงเหมาะต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย จุลินทรีย์ต่างชนิดกันจะสามารถเจริญในอาหารที่มีช่วงความเป็นกรดด่างต่างกัน เช่น ราเจริญได้ดีในช่วง 3.5-4.0 ยีสต์เจริญได้ดีในช่วง 4.5-6.0 ส่วนเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสียเจริญได้ดีในช่วง 6.0-8.0 เป็นต้น ความเป็นกรดด่างของอาหารจะมีผลต่อการเจริญและชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ รวมถึงลักษณะการเน่าเสียด้วย

2.2 ระบบวัดรังสีแกมมาด้วยหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

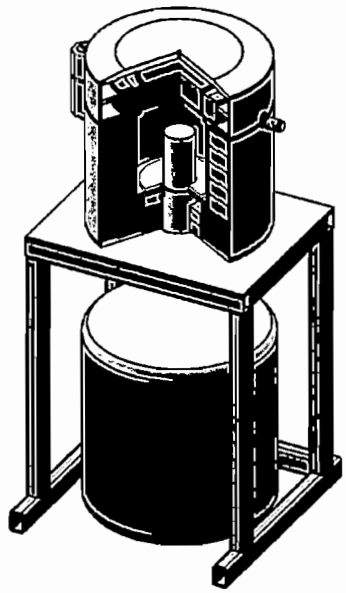
ระบบวัดรังสีแกมมาในงานวิจัยนี้ใช้ระบบวัดรังสีแกมมาแบบสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ที่มีโครงสร้างชนิดโคแอคเชียล (Coaxial) หัววัดแบบนี้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก และมีช่องโหว่ตรงกลาง หัววัดชนิดโคแอคเชียลเหมาะสำหรับใช้วัดรังสีในบริเวณที่มีแหล่งกำเนิดรังสีจากสภาวะแวดล้อมในปริมาณมาก ทำขึ้นจากผลึกเจอร์มาเนียม

Prince of Songkla University Pattani Campus

รูปทรงกระบอกที่ผิวด้านนอกจะแพร่ด้วยลิเทียม ส่วนด้านในปลูกไอออนของโบรอนเรียกหัววัดรังสีชนิดพี (P type) หรือเป็นผลึกเจอร์มาเนียมรูปทรงกระบอกซึ่งแพร่ด้วยลิเทียมไว้ที่ผิวด้านใน ส่วนด้านนอกปลูกไอออนของโบรอนเรียกว่า หัววัดชนิดเอ็น (N type) โครงสร้างอะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูงต้องการอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากหัววัดเจอร์มาเนียมมีช่องว่าง (Energy gap) แคบประมาณ 0.7 อิเล็กตรอนโวลต์ การทำงานของหัววัดเจอร์มาเนียมทุกชนิดไม่สามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิห้อง เพราะอุณหภูมิห้องจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้ช่องว่างพลังงานสูงทำให้เกิดกระแสรั่วไหล (Leakage current)

ภาพที่ 2.2 หัววัดสารกึ่งตัวนำชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง

ดังนั้น การดำเนินการวัดรังสีด้วยหัววัดเจอร์มาเนียมต้องทำให้อุณหภูมิของหัววัดต่ำลงเพื่อลดกระแสรั่วไหลดังกล่าว ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ส่งผลให้ความสามารถในการแยกพลังงาน (Energy Resolution) มีค่าน้อยลง เพื่อที่จะรักษาผลึกหัววัดจึงต้องแช่ไว้ในไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โดยใช้ Dewar ซึ่งเป็นฉนวน หัววัดจะบรรจุในอุปกรณ์หล่อเย็นซึ่งเป็นสุญญากาศ เพื่อป้องกันอุณหภูมิจากอากาศที่แวดล้อมถ่ายเทเข้าไป หัววัดจะติดตั้งด้านบน Dewar ซึ่งบรรจุไนโตรเจนเหลว หลักการทำงานโดยย่อของหัววัดแบบเจอร์มาเนียม คือ เมื่อรังสีแกมมาเข้าไปในผลึกหัววัด จะส่งผลให้เกิดไอออนที่มีประจุบวกและประจุลบ ได้แก่อิเล็กตรอนและโฮล์ที่มีจำนวนเท่า ๆ กัน และเมื่อนำขั้วไฟฟ้าสองขั้วมาต่อเข้ากับผลึกคนละด้านจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่าน ทำให้ผลึกนั้นมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้านั้นก็จะถูกดูดไปยังขั้วไฟฟ้า ไอออนที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิภาคกับพลังงานที่สูญเสียไปในผลึก และเมื่อต่อหัววัดแบบเจอร์มาเนียมนี้เข้ากับระบบขยายสัญญาณและ MCA ดังภาพที่ 2.3 จะสามารถตรวจวัดและวิเคราะห์ปริมาณกัมมันตรังสีได้ ข้อมูลที่ตรวจวัดออกมาจะอยู่ในรูปกราฟที่เขียนขึ้นระหว่างจำนวนช่องของ MCA และจำนวนช่องนับที่นับได้จากหัววัดในแต่ละช่องของ MCA เรียกว่า สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา



ภาพที่ 2.3 หัววัดรังสีชนิดเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง (High-Purity Germanium: HPGe) (วิชชุดา, 2553)

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.3 การฉายรังสีอาหาร

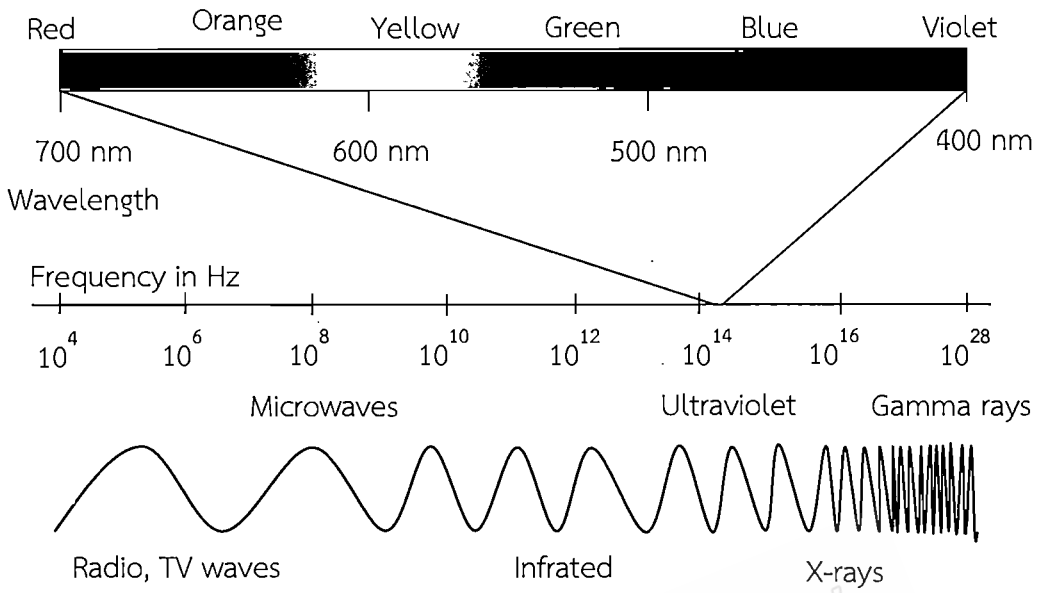
การฉายรังสีอาหารเป็นการถนอมรักษาอาหารวิธีหนึ่ง โดยการใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและฉายไปยังอาหารทั้งที่อยู่ในภาชนะบรรจุหรือไม่ผ่านการบรรจุและใช้ปริมาณของรังสีไอออไนส์ (Ionizing Radiation) ที่เหมาะสมและในระยะเวลาจำกัด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ (IAEA, 1999) การฉายรังสีอาหารเป็นที่ถกเถียงกันมาก โดยเฉพาะในเรื่องของความปลอดภัย แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการถนอมอาหารโดยการฉายรังสีนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก การฉายรังสีอาหารจัดเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนหรือที่เรียกว่า “Cold process” ซึ่งมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องมานานแล้ว โดยทั่วไปการฉายรังสีอาหารมีวัตถุประสงค์ในการยืดอายุการเก็บรักษา เช่นในพวกพืชหัว (root crops) ช่วยทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับเครื่องเทศ ผลไม้และธัญพืช ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร ช่วยชะลอการสุกของผลไม้ ช่วยปรับปรุงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในอาหารบางชนิด รวมทั้งช่วยทำลายหรือลดจำนวนจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคซึ่งปนเปื้อนมากับอาหาร ในด้านมาตรการเกี่ยวกับความปลอดภัยในการบริโภคอาหารฉายรังสีนั้น ปี ค.ศ. 1983 The Joint Food and Agriculture Organization/ World Health Organization Codex Alimentarius Commission ได้รับรองอาหารฉายรังสีว่ามีความปลอดภัยและเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการ

ถนอมอาหาร และได้ตั้งข้อกำหนด Codex General Standard ของอาหารฉายรังสีขึ้นเพื่อเป็นการรับรองความปลอดภัยของอาหารที่ผ่านกระบวนการนี้

2.3.1 แหล่งของรังสี

รังสี (Radiation) หมายถึง พลังงานที่แผ่กระจายจากต้นกำเนิด ออกไปในอากาศหรือตัวกลางใดๆ ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ความร้อน รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ฯลฯ และรวมไปถึงกระแสอนุภาคที่มีความเร็วสูงด้วย เช่น รังสีแอลฟา รังสีบีตาและรังสีนิวตรอน การจำแนกรังสีตามคุณสมบัติทางกายภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Non–Ionizing Radiation) คือ รังสีที่มีความยาวคลื่นสูง มีความถี่ช่วงคลื่นต่ำ ให้พลังงานต่ำ ได้แก่ คลื่นวิทยุ ทั้งระบบคลื่นยาวและคลื่นสั้นคลื่นที่พลังงานต่ำ ได้แก่ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ความร้อน แสง เสียง คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ และอินฟราเรด ระดับความถี่ของช่วงคลื่นของไมโครเวฟและอินฟราเรดสูงพอที่จะก่อให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้นได้กับวัสดุที่สามารถดูดซับคลื่นนั้นไว้ได้และกลุ่มรังสีที่ก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือรังสีพลังงานสูง (Ionizing radiation หรือ high energy radiation) เป็นช่วงคลื่นที่มีความถี่สูงมากและให้พลังงานสูงมาก ซึ่งมีช่วงความถี่ของช่วงคลื่นสูงที่สุดคือ 1,019–1,022 เฮิรต์ จนถึงขั้นทำให้โมเลกุลของสารประกอบแตกตัวเป็นไอออนและอนุมูลอิสระขึ้นได้ โดยการสลายพันธะทางเคมี จึงส่งผลให้สามารถนำมาใช้ในกระบวนการถนอมและแปรรูปอาหารได้รังสีที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ประกอบด้วย รังสีเอกซ์ (x-rays) รังสีแกมมา (gamma rays) รังสีแคโทด (cathode rays) รังสีเบตา (beta rays) โปรตอน (proton) นิวตรอน (neutron) และอนุภาคแอลฟา (alpha particles)

JOHN F.KENNEDY LIBRARY
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
PATTANI THAILAND



ภาพที่ 2.4 สเปรกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

2.3.1.1 Radioisotope source

แหล่งไอโซโทปกัมมันตรังสีให้รังสีแกมมาซึ่งเกิดจากการสลายตัวของอะตอมในนิวเคลียสของสารกัมมันตรังสี (radioactive nuclides) ที่ใช้มากในการถนอมอาหารมี 2 ชนิด ได้แก่ รังสีแกมมา จาก Cobalt-60 และ Cesium-137 ระดับพลังงานที่ใช้ในอาหารต่ำมากไม่มีโอกาสที่จะเกิดสารกัมมันตรังสี

1) โคบอลต์ –60 (Cobalt -60 , ^{60}Co) ผลิตขึ้นมาจากธาตุโคบอลต์ตามธรรมชาติที่มีความเสถียรคือ ^{59}Co โดยการระดมยิงด้วยอนุภาคนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู (nuclear reactor) เป็นเวลา 1 ปี ถึง 1 ปีครึ่ง แหล่งสำคัญที่ทำการผลิต คือ ประเทศแคนาดา (AECL = Atomic Energy of Canada Ltd.) นำมาอัดไว้ในท่อเหล็กปลอดสนิมรูปทรงกระบอกขนาดเล็กเท่าปากกา มีสมบัติไม่ละลายน้ำ ซึ่งเป็นผลดีที่ไม่ก่อปัญหาการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม และเก็บรักษาไว้ได้ในน้ำ เพื่อความปลอดภัยในขณะขนส่งจะบรรจุในแท่งตะกั่วที่มีความหนาเพียงพอในการป้องกันรังสีได้ การซื้อขายโคบอลต์ –60 นี้จะคิดตามพลังงานของแต่ละแท่ง โคบอลต์ -60 ให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 1.17–1.33 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีระยะครึ่งชีวิต (half–life) 5.27 ปี โดยพลังงานรังสีจะลดลงอัตรา 12.5% ต่อปี จึงจำเป็นต้องหามาเพิ่มเติมในแต่ละปี เพื่อรักษาให้แหล่งของรังสีแกมมามีพลังงานใกล้เคียงกับระยะเริ่มต้นในการติดตั้ง เมื่อโคบอลต์ –60 สิ้นสุดการสลายตัวจะเปลี่ยนไปเป็นนิกเกิล (^{60}Ni)

จ
1595
2561

2) ซีเซียม–137 (Cesium – 137, ^{137}Cs) เป็นแหล่งรังสีแกมมาที่ได้จากผลผลิตจากเตาปฏิกรณ์ปรมาณูที่แยกออกมาแล้วแปรรูปใหม่โดยกระบวนการเคมี ซีเซียม–137 ให้รังสีแกมมาที่มีพลังงาน 0.66 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีระยะครึ่งชีวิต 30.2 ปี สลายตัวตลอดเวลาจึงทำให้ความแรงรังสีลดลงในอัตรา 2.3 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ซีเซียม –137 จะให้พลังงานแพร่ออกมาได้เพียง 70 เปอร์เซ็นต์ เพราะท่อบรรจุมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของแท่งโคบอลต์ –60 ซึ่งแพร่รังสีแกมมาออกมาได้ 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อซีเซียม –137 สลายตัวสิ้นสุดลงจะเปลี่ยนเป็นแบเรียม (Ba) ที่ไม่มีสมบัติเป็นสารกัมมันตรังสีอีก

2.3.1.2 Machine source และ Electron beam acceleration

เครื่องผลิตรังสีเอกซ์ (X–ray machine) เนื่องจากรังสีเอกซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้พลังงานสูงรองจากรังสีแกมมา โดยมีพลังงาน 103 – 105 อิเล็กตรอนโวลต์ ผลิตได้โดยใช้เครื่องมือซึ่งประกอบด้วยท่อรังสีเอกซ์ เป็นหลอดแก้วสุญญากาศ ภายในมีแท่งโลหะที่ทำหน้าที่เป็นแคโทด (cathode) และแอโนด (anode) ที่ปลายแอโนดจะเชื่อมติดกับแผ่นโลหะซึ่งมักเป็นทังสเตน (tungsten) เพื่อทำหน้าที่เป็นเป้าให้กระแสของกลุ่มอิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงที่เกิดจากการให้ความร้อนที่แคโทดด้วยกระแสไฟฟ้ามากระทบจะเกิดเป็นรังสีเอกซ์แผ่กระจายออกมาเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชักนำให้อาหารที่ทำการฉายรังสีด้วยรังสีเอกซ์กลายเป็นสารกัมมันตรังสีจึงมีข้อกำหนดให้เครื่องนี้มีพลังงานต่ำกว่า 5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ มีรายงานว่าเครื่องรังสีเอกซ์ไม่เคยมีการฉายรังสีอาหารในเชิงพาณิชย์ แต่มีใช้บ้าง เพื่อศึกษาทดลองในห้องปฏิบัติการ

เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน (electron accelerator) เมื่ออนุภาคอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงในระดับใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของคลื่นแสง จะมีผลให้เกิดการไอออนไนซ์ได้ ชนิดอนุภาคที่ใช้เพื่อการฉายรังสีอาหาร คือ อนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถผลิตขึ้นมาได้ด้วยเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง (high voltage generator) มีการออกแบบไว้ 2 แบบ คือ การใช้ระบบกระแสไฟฟ้าตรงและการใช้ระบบคลื่นวิทยุ หรือคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งอยู่ในแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อนุภาคอิเล็กตรอนจะถูกผลิตขึ้นด้วยการให้ความร้อนกับแท่งโลหะที่เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งอยู่ทางปลายด้านหนึ่งของท่อสุญญากาศภายในบรรจุด้วยก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูโอไรด์ (sulfurhexafluoride – SF_6) ท่อดังกล่าวจะทำหน้าที่เร่งอนุภาคให้มีความเร็วสูง โดยอาศัยความต่างศักย์ ของปลายทั้งสองของท่อ ถ้ายิ่งสูง กลุ่มอนุภาคอิเล็กตรอน (electron beam) จะเคลื่อนที่เร็วขึ้นและให้พลังงานสูงขึ้นในการแทรกซึม (penetration) เข้าไปในวัตถุที่นำมาฉายรังสี

ในการฉายรังสีอาหารนั้น หัวใจของโรงงานฉายรังสีอาหารคือแหล่งของรังสี โดยทั่วไปโรงงานฉายรังสีอาหารจะมีผนังคอนกรีตที่หนากว่า 1.7 เมตร โดยรอบเพื่อป้องกันการรั่วไหล ส่วนภาชนะที่ใช้เก็บสารกัมมันตรังสีจะเป็นแท่งโลหะแสตนเลสและเก็บไว้ในอ่างน้ำที่มีความลึกประมาณ 5–6 เมตร ในขณะที่ไม่ได้ใช้งาน และในส่วนของทางเข้าและออกของผลิตภัณฑ์ที่นำไปฉายรังสีอาหารนั้นจะมีลักษณะคล้ายเขาวงกต ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยจากการรั่วไหลของรังสีให้แก่ผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง

2.3.2 ระดับการฉายรังสี

การฉายรังสีอาหาร แบ่งได้เป็น 3 ระดับตามความแรงรังสีที่ใช้ คือ

2.3.2.1 การฉายรังสีในปริมาณรังสีระดับต่ำไม่เกิน 1 กิโลเกรย์

มีวัตถุประสงค์เพื่อไปขัดขวางปฏิกิริยาทางชีวเคมีและการทำงานของฮอร์โมนต่างๆ ในเนื้อเยื่อและสัตว์ขนาดเล็ก เช่น แมลงและพยาธิบางชนิดจึงนิยมใช้กับพืชสดเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาพืชผลสด ในช่วงหลังการเก็บเกี่ยว เช่น ป้องกันการงอกของพืชที่มีลำต้นใต้ดิน เช่น มันฝรั่ง กระเทียม ชะลอการสุกและการงอมของผักผลไม้บางชนิด เช่น กล้วย มะม่วง เห็ด ป้องกันการทำลายของแมลงในผลิตผลทางการเกษตร เช่น ข้าวสาลี ข้าวเจ้า ผลอินทผาลัม ปลากรอบ และป้องกันการระบาดของพยาธิตัวจี๊ดในเนื้อหมู เป็นต้น

2.3.2.2 การฉายรังสีในระดับปานกลางคือ 1–10 กิโลเกรย์

มีผลขัดขวางการแบ่งเซลล์ โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวกับดีเอ็นเอ (DNA) ซึ่งมีผลทำให้เกิดการทำลายเซลล์จุลินทรีย์ในอาหารได้เช่นเดียวกับการใช้ความร้อนดังนั้นจึงนิยมการฉายรังสีในระดับนี้เพื่อลดการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์ทั้งที่เป็นพิษและไม่เป็นพิษเพื่อให้อาหารปลอดภัยแก่ผู้บริโภคและยืดอายุการเก็บรักษาจากการเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ เช่น

1) ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับพืชผักผลไม้เพื่อให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น สตรอว์เบอร์รี เป็นต้น

2) ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคในอาหารเช่นเนื้อสัตว์ปีกไข่ อาหารทะเลทั้งในรูปสดและแช่แข็ง

3) ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์โดยการแช่เย็น เช่น เนื้อไก่

4) ลดการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในเครื่องเทศและผักแห้ง เช่น พริกไทย

2.3.2.3 การใช้ปริมาณรังสีระดับสูงกว่า 10 กิโลเกรย์

มีวัตถุเพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาให้หมดจนอาหารนั้นอยู่ในระดับปลอดเชื้อทางการค้าแต่โดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้กับอาหารแต่จะใช้กับพวกเวชภัณฑ์และภาชนะบรรจุรวมถึงส่วนประกอบอาหารที่ไม่นำมาบริโภคโดยตรงเช่นอาหารสำหรับผู้ป่วย

1) Radicidation เป็นการฉายรังสีในระดับที่สามารถลดปริมาณของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์และพวกที่ก่อให้เกิดโรคจนไม่สามารถตรวจพบได้ เมื่อใช้วิธีการทางจุลชีววิทยาและยังหมายความถึงการทำลายปรสิต วิธีนี้ใช้ปริมาณรังสีต่ำ (0.1 - 8 กิโลเกรย์) ในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและจุลินทรีย์อื่น ยกเว้น ไวรัส และยังทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคชนิดไม่สร้างสปอร์ (ประมาณ 2-8 กิโลเกรย์) และวิธีนี้อาจเรียกว่า Irradiation pasteurization โดยเฉพาะเมื่อต้องการเน้นในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

2) Radurization เป็นการฉายรังสีในระดับที่เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพของอาหารโดยทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร และใช้รังสีขนาด 0.4-10 กิโลเกรย์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์วิธีนี้เรียกได้ว่าเป็น Irradiation pasteurization วิธีหนึ่ง

3) Radappertization เป็นการถนอมอาหารโดยการใช้รังสีปริมาณสูงเพียงพอที่จะลดจำนวนและ/หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ (ยกเว้นไวรัส) ให้น้อยลงซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยวิธีเฉพาะทางจุลินทรีย์ได้วิธีการนี้จะทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียหรือทำลายสารพิษให้หมดไปและไม่ทำให้เกิดการบ่นเปื้อนซ้ำซ้อนโดยใช้รังสีขนาด 10-15 กิโลเกรย์ ในการทำให้ปลอดเชื้อวิธีนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Irradiation sterilization หรือ Commercial sterility (ความหมายเดียวกันกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาในสภาวะปกติได้

คณะกรรมการผู้เชี่ยวชาญร่วมเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี (The Joint Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Foods) จากองค์การอนามัยโลก (WHO) องค์การอาหารและการเกษตร (FAO) และ International Atomic Energy Agency (IAEA) ได้ประกาศรับรองความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี ในปี ค.ศ. 1970 และ ในปี ค.ศ.1980 ได้สรุปว่าการฉายรังสีอาหารโดยใช้ปริมาณรังสีโดยเฉลี่ย 10 กิโลเกรย์ จะไม่มีผลทำให้เกิดอันตรายจากสารพิษที่อาจถูกสร้างขึ้น และไม่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการรวมทั้งปราศจากอันตรายที่อาจเกิดเนื่องจากจุลินทรีย์โดยแท้จริงแล้วปริมาณรังสีขนาด 10 กิโลเกรย์ อาจไม่ใช่เป็นปริมาณที่สูงสุดที่จะเป็นหลักประกันความปลอดภัยต่อการบริโภคอาหารฉายรังสี และได้มีการทดสอบความปลอดภัยของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณดังกล่าวหลายครั้ง (Loaharanu, 1995) แต่เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่ามีความปลอดภัยในส่วนของการศึกษาการใช้รังสีปริมาณสูงในการยืดอายุการเก็บ

รักษาอาหารในประเทศสหรัฐอเมริกามีรายงานว่าการใช้ปริมาณรังสีที่สูงถึง 58 กิโลเกรย์ จะไม่มีผลต่อคุณภาพของอาหารปริมาณของรังสีที่แนะนำใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ

ตารางที่ 2.2 ปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ

กระบวนการ	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)
ยับยั้งการงอก	0.05 - 0.15
ชะลอการสุกของผลไม้ชนิดต่างๆ	0.20 - 0.50
ทำลายแมลง	0.20 - 1.00
ทำลายปรสิต	0.03 - 6.00
ยืดอายุการเก็บรักษาโดยการลดปริมาณจุลินทรีย์	0.50 - 5.00
ทำลายเชื้อโรคที่สร้างสปอร์	3.00 - 10.00
สเตอริไลเซชัน	ไม่เกิน 50.00

ที่มา : Hackwood (1991)

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.3.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการฉายรังสีอาหาร

กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการฉายรังสีอาหารเมื่อฉายรังสีไปยังอาหารจะเกิดพลังงานอนุภาคแตกตัวเป็นอะตอมจำนวนมากและอิเล็กตรอนที่แตกตัวจากอะตอมอาจไปทำให้อะตอมอื่นแตกตัวไปจึงทำให้มีผลต่อสารชีวภาพ

2.3.3.1 การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารหรือวัตถุ

การฉายรังสีอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโดยตรงซึ่งพลังงานจากรังสีจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมี โดยอาจทำให้โมเลกุลนั้นอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) และการเปลี่ยนแปลงทางอ้อมซึ่งเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำเนื่องมาจากรังสี (Radiolytic products) ไปทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารอื่นๆ ภายในอาหาร ซึ่งในอาหารส่วนใหญ่มีความชื้นสูงเมื่อได้รับรังสีอิออไนส์จะทำให้น้ำแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลและเกิดการแตกของพันธะและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะกลับมารวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจน (Hydrogen) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) อนุมูลไฮโดรเจน (Hydrogen radicals , H°) อนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical, OH°) และอนุมูลไฮโดรเพอร์ออกซิล (Hydroperoxyl radicals, HO_2°) การแตกตัวเป็นอิออนของน้ำ แสดงดังภาพที่ 2.13(a) และการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระแสดงดังภาพที่

2.5 (b) เมื่อเกิด H_2O+ (Water cation radical) จากการแตกตัวเป็นอิออนของน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยโปรตอนให้กับโมเลกุลของน้ำได้อีกดังสมการ

$$H_2O+ + H_2O \longrightarrow H_3O+ + OH^{\circ}$$

และจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ได้ H_3O^+ (Solvated/hydrated proton, hydronium ion) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระต่อไป ซึ่งจะเห็นว่าผลของปฏิกิริยาในภาพ 2.5(b) จะเกิดสารที่เสถียรขึ้น 2 ชนิดคือ H_2O_2 และ H_2 แต่ก็ยังเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้อีก ทำให้มีปริมาณของสารทั้งสองชนิดเกิดขึ้นต่ำแม้ว่าจะฉายรังสีในปริมาณสูง จึงทำให้สามารถใช้บ่อน้ำเป็นเกราะกำบังรังสีแกมมาได้ (สายสนม, 2540)

H_2O	$\longrightarrow$	$H_2O^+ + e-$	
$e- + H_2O$	$\longrightarrow$	H_2O-	
H_2O^+	$\longrightarrow$	$H^+ + OH^{\circ}$	
H_2O-	$\longrightarrow$	$H^{\circ} + OH-$	a)
$H^{\circ} + OH^{\circ}$	$\longrightarrow$	H_2O	
$e- + OH^{\circ}$	$\longrightarrow$	$OH-$	
$e- + H_3O$	$\longrightarrow$	$H_2O + H^{\circ}$	
$OH^{\circ} + OH^{\circ}$	$\longrightarrow$	H_2O_2	
$H^{\circ} + H^{\circ}$	$\longrightarrow$	H_2	
$H_2O_2 + e-$	$\longrightarrow$	$OH + OH-$	
$H_2 + OH^{\circ}$	$\longrightarrow$	$H_2O + H^{\circ}$	b)

Prince of Songkla University Pattani Campus

ภาพที่ 2.5 a) การแตกตัวเป็นอิออนของน้ำ b) การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ
ที่มา : สายสนม (2540)

การฉายรังสีอาหารอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอาหารได้ ซึ่งโดยหลักการแล้วจะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดและสามารถรักษาคุณภาพ รวมทั้งหลีกเลี่ยงการเกิดกลิ่นรสและรสชาติผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น รังสีจะทำปฏิกิริยากับวัตถุหรืออาหารที่นำมาฉายรังสีโดยการถ่ายทอดพลังงานไปยังอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) ถ้าพลังงานที่ถูกถ่ายทอดสูงมากพอ อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจะสามารถออกมาจากโมเลกุลและกลายเป็นไอออนที่มีประจุบวก (Positive ion) ได้ การฉายรังสีทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในแต่ละครั้งเมื่อเกิดการกระตุ้น 2 ครั้ง แต่เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนจะเกิดขึ้นประมาณ 1,000 ครั้ง ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นได้ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีต่อสิ่งมีชีวิตจึงอาจกล่าวได้ว่ามีสาเหตุล้วนมาจากการแตกตัวเป็นอิออนของโมเลกุล (Moseley, 1989)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อชนิดและขนาดของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอาหารเนื่องจากรังสีได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนของอาหาร ซึ่งมีมากมายหลายชนิด การฉายรังสีทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน องค์ประกอบของไขมัน และสารโปรออกซิแดนท์ (Pro-oxidants) นอกจากนั้นรังสียังทำให้โมเลกุลโปรตีนบางส่วนเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ ความซับซ้อนของโมเลกุลของโปรตีน รวมทั้ง องค์ประกอบอื่น ๆ ทำให้มีบริเวณที่สามารถทำปฏิกิริยากับรังสีและทำให้เกิดสารที่ไม่ต้องการขึ้นได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย

การฉายรังสีให้กับน้ำทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (Hydroxy radicals, Hydrated electrons) และสารชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้เกิดอนุมูลโปรตีนอิสระ (Protein free radicals) และจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับโมเลกุลอื่น ๆ ในอาหาร อนุมูลอิสระจะไม่เสถียรในอาหารยกเว้นในบางสภาวะ ในการฉายรังสีเนื้อสัตว์และเนื้อไก่นั้นพบว่า รังสีทำให้เกิดสารระเหยหลายชนิด แต่รังสีไม่มีผลต่อกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในเนื้อสัตว์ ในส่วนของเอนไซม์พบว่ารังสีสามารถยับยั้งปฏิกิริยาเนื่องมาจากเอนไซม์ได้ในสภาวะที่เป็นสารละลายเจือจาง แต่เอนไซม์ในอาหารนั้นค่อนข้างทนต่อการฉายรังสี การยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ในอาหารจะต้องใช้ปริมาณรังสีประมาณ 5-10 เท่าของปริมาณที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ (Frazier and Westhoff, 1988) ซึ่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ภายในเซลล์อาจดำเนินต่อหลังจากการทำลายจุลินทรีย์ ถ้าไม่ทำการลวก (blanching) เพื่อทำลายเอนไซม์ในอาหารก่อนการฉายรังสี

การฉายรังสีน้ำตาลในสภาวะบริสุทธิ์ ทำให้เกิดการสลายตัว (Degradation) อย่างเห็นได้ชัดเจน รวมทั้งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากแตกตัวจากรังสี การฉายรังสีแก่น้ำตาลที่อยู่ในสถานะของแข็งนั้นพบว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ในน้ำตาลจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ผลของน้ำดังกล่าวจะแตกต่างจากผลการฉายรังสีแก่น้ำตาลที่อยู่ในรูปของสารละลาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากอาหารหลายชนิดที่มีปริมาณน้ำตาลสูงมักจะมีองค์ประกอบของน้ำในปริมาณสูง ดังนั้นน้ำตาลในอาหารเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการฉายรังสี

ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณอนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระ (Carbohydrate free radicals) เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น ถ้าอาหารมีปริมาณความชื้นต่ำ อนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสตาร์ช เมื่อใช้รังสีปริมาณที่สูงขึ้น เป็นผลให้ความหนืดลดลงและความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชเพิ่มขึ้น รวมทั้งความเป็นกรดของสารละลายสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Subularse et al., 1991)

การฉายรังสีจะไม่มีผลต่อกรดไขมัน ยกเว้นกรดปาล์มิติก (Palmitic acid) ในซากไก่ที่นำฉายรังสีแกมมาขนาดประมาณ 2.0 kGy ภายใต้สภาวะที่ใช้ทางการค้า ซึ่งพบว่ากรดนี้จะมีปริมาณลดลงและกรดโอเลอิก (Ocleic acid) จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Katta et al, 1991)

การฉายรังสีมันฝรั่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความเข้มข้นของสารฟีนอลเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นของไขมันและฟอสโฟลิปิดลดลง (Mondy and Gosselin, 1989) และนอกจากรังสีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยตรงแล้ว อาจทำให้โครงสร้างของโปรตีนในระดับทุติยภูมิ (Secondary) และตติยภูมิ (Tertiary structure) เกิดการเปลี่ยนแปลงและอาจกระตุ้นให้เอนไซม์ทำงาน เป็นผลให้ลักษณะทางสรีรวิทยาเปลี่ยนแปลงไปจนสังเกตได้ โดยเนื้อสัมผัสอาจอ่อนนุ่มลง มีความหนืดลดลงและค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) อาจเพิ่มขึ้น

2.3.4 การเปลี่ยนแปลงทางคุณค่าโภชนาการ

มีรายงานการศึกษาผลของการฉายรังสีต่อการสลายตัวของวิตามินหลายชนิดในอาหาร แต่พบว่ามีการศึกษาน้อยมากเกี่ยวกับสารที่เกิดขึ้นหลังจากการฉายรังสีวิตามินเหล่านั้น โดยมีรายงานว่าวิตามินอีซึ่งเป็นวิตามินที่ละลายในไขมัน จะมีความทนต่อการฉายรังสีต่ำที่สุด และวิตามินบีหนึ่ง (B_1) เป็นวิตามินที่ทนต่อการฉายรังสีต่ำที่สุดในบรรดาวิตามินที่ละลายน้ำทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงของวิตามินจะแตกต่างกันเมื่อผ่านการให้ความร้อนและการฉายรังสี แต่วิตามินที่ทนต่อการฉายรังสีได้น้อย จะสลายตัวได้ง่ายจากแสง ออกซิเจนหรือความร้อน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังจากผ่านการฉายรังสีแต่องค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีปริมาณน้อยอาจทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว ไธอามิน (Thiamine) วิตามินซี (Ascorbic acid) รวมทั้งวิตามินเอและอี เป็นวิตามินที่สลายตัวได้ง่ายที่สุดจากการฉายรังสี Jenkins *et al.* (1989) รายงานผลของการใช้รังสีปริมาณต่ำต่อปริมาณไธอามินในเนื้อสุกรบดที่บรรจุแบบสุญญากาศ โดยใช้ปริมาณรังสี 0.57, 1.91, 3.76, 5.52 และ 7.25 kGy เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี พบว่ามีปริมาณไธอามินลดลง 7.7, 23.5, 38.1, 49.8 และ 57.6% ตามลำดับ ในส่วนของอาหารที่เป็นแหล่งของวิตามินซี เช่น ผลไม้และผักจะสูญเสียวิตามินซีเพียงประมาณ 0-20% หลังการฉายรังสี (Skala *et al.* 1987)

2.3.4.1 การเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์

จากกรณีการเกิดโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่มีในอาหารมีเพิ่มมากขึ้นในประเทศต่างๆ ทั่วโลก ทำให้มีการศึกษาการฉายรังสีอาหารซึ่งสามารถทำลายเชื้อโรคเพิ่มมากขึ้น (Monk et al., 1995) โดยส่วนใหญ่จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุนั้นไม่ทนต่อการฉายรังสีหรืออาจทนได้ไม่เกินกว่า 10 kGy อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ที่ทนต่อการฉายรังสีปริมาณสูงจะลดปริมาณลง ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่อาจจะทนต่อปัจจัยอื่นๆ ได้น้อยลง เช่น ความร้อน การเปลี่ยนแปลงค่า pH ความเข้มข้นของเกลือและยาปฏิชีวนะ เป็นต้น ดังนั้นการถนอมรักษาอาหารโดยการฉายรังสีจะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นถ้าใช้วิธีการถนอมอาหารอื่น ๆ ร่วมด้วยในการทำลายหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

การฉายรังสีมีผลในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งโดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่โครโมโซม (Chromosome) ซึ่งมี DNA ที่มีลักษณะโมเลกุลวงแหวนประกอบด้วยคู่เบส (base pairs) หลายล้านคู่ จากการศึกษาพบว่ารังสีทำให้ DNA เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลาย อย่างไรก็ตามรังสียังมีผลต่อโมเลกุลอื่น ๆ ที่ไม่ทนต่อรังสี (เช่น ในเมมเบรน) ซึ่งอาจเป็นผลให้จุลินทรีย์ถูกทำลายได้เช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากการฉายรังสีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในตัวจุลินทรีย์ ระยะการเจริญ ปริมาณของรังสี รวมทั้งความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง การทนต่อรังสีของจุลินทรีย์จะแตกต่างไปตามสปีชีส์ (Species) หรือสายพันธุ์ (Strain) Adam และ Moss (1995) รายงานว่า แบคทีเรียชนิดแกรมลบ รวมทั้งพวกที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย พวกที่อยู่ภายในช่องทางเดินอาหารและแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค จะทนต่อการฉายรังสีน้อยกว่าแบคทีเรียแกรมบวก การทนต่อการฉายรังสีสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

แกรมลบ < แกรมบวก ≈ เชื้อรา < สปอร์ ≈ ยีสต์ < ไวรัส

ในส่วนของสปอร์แบคทีเรียจะทนต่อรังสีมากกว่าเซลล์ปกติ (Vegetative cells) ประมาณ 5-15 เท่าและโดยทั่วไปการทนต่อการฉายรังสีของเชื้อราจะใกล้เคียงกับเซลล์แบคทีเรียปกติ ส่วนยีสต์จะทนมากกว่าเชื้อราและแบคทีเรีย และไวรัสจะทนต่อการฉายรังสีมากที่สุดซึ่งรังสีปริมาณที่ใช้ทำลายแบคทีเรียจะไม่สามารถทำลายไวรัสได้ (Ingram and Roberts,1980) ประสิทธิภาพของรังสีในการทำลายแบคทีเรียจะขึ้นกับชนิดและสปีชีส์ของแบคทีเรียปริมาณเริ่มต้นของเซลล์ (หรือของสปอร์) สภาวะของเชื้อ สภาวะแวดล้อมของแบคทีเรีย เช่น ค่า pH อุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ปริมาณของออกซิเจนและสภาวะทางกายภาพ (Physical state) ของอาหารขณะฉายรังสี (Jay, 1986 ; Monk et al., 1995) Monk และคณะ (1995) และ Radomyski et al. (1994) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารเมื่อผ่านการฉายรังสี และรายงานค่า D (D-Values) ของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับอาหาร ซึ่งค่า D หมายถึงปริมาณของรังสีที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ให้ลดลงไป 90% (หรือลดลงไป 1 log cycle) สำหรับแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคส่วนใหญ่มีค่า D ต่ำกว่า 1 kGy และแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 kGy ค่าปริมาณของรังสีที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์บางชนิด แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของรังสีที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์บางชนิดเมื่อผ่านการให้รังสี

จุลินทรีย์	(kGy)
Aeromonas hydrophila	0.04 – 3.40
Bacillus cereus (vegetative cells)	0.02 – 0.58
B. cereus (spores)	1.25 – 4.00
Campylobacter jejuni	0.08 – 0.32
Clostridium botulinum (vegetative cells)	0.41 – 3.20
C. perfringens (spores)	0.29 – 0.85
Escherichia coli	0.23 – 0.45
E. coli O157 : H 7	0.24 – 0.47
Listeria monocytogenes	0.25 – 0.77
Salmonella	0.37 – 0.80
Staphylococcus aureus	0.26 – 0.45
Yersinia enterocolitica	0.04 – 0.39
Vibrio	0.08 – 0.44
Clostridium sporogenes	2.30 – 10.90
Micrococcus radiodurans	12.70 – 14.10
Moraxella phenylpyruvica	0.63 – 0.88
Pseudomonas putida	0.08 – 0.11
Sporolactobacillus inulinus (spores)	2.10 – 2.58
S. inulinus (vegetative cells)	0.35 – 0.53
Streptococcus faecalis	0.65 – 0.70
Viruses	2.02 – 8.10

ที่มา : Barbosa-Canovas et al. (1998)

Prince of Songkla University Pattani Campus

แบคทีเรียแกรมลบที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมเสียในเนื้อสัตว์แช่เย็นจะไม่ทนต่อการฉายรังสีและโดยปกติแบคทีเรียแกรมบวกเช่น *Lactobacilli* และ *Lactococci* จะทนต่อรังสีแกมมามากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ การทนต่อรังสีอาจเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่มีอยู่อาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่ำ ดังนั้นการใช้รังสีปริมาณต่ำอาจจะทำลายแบคทีเรียแกรมลบแต่จะไม่ทำลายแบคทีเรียแลกติกที่ใช้ในการผลิตไส้กรอกหมัก ทั้งนี้ความ

ปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์จากอันตรายเนื่องมาจากจุลินทรีย์จะได้รับการยอมรับมากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการฉายรังสี

Loaharanu (1995) รายงานว่าอาหารทะเลที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาจะสามารถนำมาบริโภคได้อย่างปลอดภัยจากเชื้อ *Vibrio* spp. โดยเฉพาะ *V. cholera, V. parahaemolyticus* และ *V. vulnificus* ในส่วนของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์และสัตว์ปีกซึ่งมีเชื้อ *Salmonella* เป็นแบคทีเรียแกรมลบและทนต่อการฉายรังสีมากที่สุดชนิดหนึ่งพบว่าปริมาณรังสีที่ใช้ในการทำลายเชื้อชนิดนี้จะสามารถทำลายแบคทีเรียก่อโรคอื่นๆชนิดแกรมลบได้ด้วย (Radomyski et al., 1994) ในผลิตภัณฑ์ไข่ที่ทำแห้งจะสามารถลดปริมาณเชื้อ *Salmonella* ลงได้ 4 – 5 log cycle เมื่อใช้รังสีปริมาณ 3 kGy ในสภาวะที่มีอากาศและปริมาณ 5 kGy ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการฉายรังสีพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ Lamuka และคณะ (1992) ศึกษาการใช้รังสีแกมมาปริมาณ 2.5 kGy กับซากไก่พบว่าสามารถชะลอการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้เป็นผลให้อายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้น และการฉายรังสียังช่วยลดปริมาณเริ่มต้นของเชื้อ *Yersinia* และ *Campylobacter* ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าผลิตภัณฑ์สัตว์ปีกที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีตลอดระยะเวลาการเก็บ 18 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การใช้รังสีในการลดปริมาณหรือทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคพวกไซโครโทป (psychrotrophicpathogens) ที่ปนเปื้อนในอาหารแช่เย็นหรือแม้แต่ที่ 0 องศาเซลเซียส เช่น *Yersinia enterocolitica Aeromonas hydrophila* และ *Listeria monocytogenes* โดยใช้ร่วมกับเทคนิคเฮอร์เดิล (hurdles) อื่น ๆ สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้และมีผลเล็กน้อยต่อคุณภาพของอาหาร (Radomyski et al., 1994) โดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียจะทนต่อรังสีไอออไนส์มากขึ้น ถ้าอยู่ในสภาวะแช่เยือกแข็ง (frozen state) หรือในสภาวะแห้ง (dehydrate) โดยสภาวะทั้งสองนั้นพบว่าผลทางอ้อมจากการแตกตัวของน้ำ เนื่องมาจากรังสีจะลดลงอย่างมาก ถ้านำอาหารไปฉายรังสีที่อุณหภูมิต่ำมากเพื่อที่จะลด ผลกระทบที่อาจทำให้เกิดลักษณะกลิ่นรสผิดปกติเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของไขมัน แต่จากจุดประสงค์ที่แท้จริงในการฉายรังสี ซึ่งกระทำเพื่อทำลายหรือยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ปนเปื้อน ดังนั้นปริมาณรังสีที่ใช้จะต้องสูงมากพอที่จะทำลายจุลินทรีย์ดังกล่าว ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยก่อนเป็นอันดับแรก (Moseley, 1989) ในส่วนเชื้อรานั้น Monk และคณะ (1995) รายงานว่าการฉายรังสีจะช่วยลดปริมาณเชื้อราในอาหาร แต่มีรายงานที่ยังไม่สรุปชัดเจนเกี่ยวกับผลจากการฉายรังสีที่ทำให้เชื้อราบางส่วนถูกทำลายแต่ในเชื้อราที่รอดชีวิตนั้นสามารถผลิตสารพิษขึ้นได้ภายหลัง ซึ่งการฉายรังสีอาจไปกระตุ้นหรือไม่มีผล หรือมีผลในการลดปริมาณสารพิษลง และการทำลายเชื้อจุลินทรีย์คู่แข่งชนิดอื่นจะทำให้เชื้อราสามารถผลิตสารพิษได้ในปริมาณมากกว่าในขณะที่มีเชื้ออื่นปะปนอยู่ในช่วงที่ยังไม่ฉายรังสี การรอดชีวิตของราหลังจากการฉายรังสีอาจทำให้เชื้อราเจริญได้รวดเร็วกว่าในอาหารที่มีเชื้อราคู่แข่งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย จากกระบวนการฉายรังสีทำให้เกิดความวิตกกังวลว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจะก่อให้เกิดอันตราย หรือมี

คุณสมบัติต้านหรือทนต่อการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคณะทำงานเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีระหว่างประเทศ มิได้นิ่งนอนใจหรือมองข้ามปัญหาเหล่านี้และมี รายงานจากองค์การอนามัยโลก (WHO, 1994) โดย International Advisory Group รายงานว่า ไม่พบหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีอาหารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งจะทำให้เพิ่มระดับความรุนแรงในการก่อให้เกิดโรคหรือมีความต้านทานต่อการฉายรังสีเพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นยังรายงานโดยอาศัยสมมุติฐานในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (Worst – case assumption) ที่จะเกิดขึ้นในการฉายรังสีอาหารซึ่งได้แก่การก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีนั้น พบว่าสารดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยกว่าระดับปริมาณทั่วไปที่พบในอาหารตามธรรมชาติและการฉายรังสีทางการค้าจะไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีในอาหารขึ้นได้ ในปี ค.ศ. 1993 American Medical Association Council on Scientific Affairs ยืนยันว่าการฉายรังสีอาหารเป็นวิธีการที่ปลอดภัยและให้ผลดีในการเพิ่มความปลอดภัยของอาหารตามกฎหมายของประเทศ การศึกษาเกี่ยวกับอาหารฉายรังสีในเรื่องของความปลอดภัยทั้งทางด้านจุลินทรีย์ คุณค่าทางโภชนาการ การกลายพันธุ์เนื่องจากผลของรังสีและความเป็นพิษของอาหารฉายรังสีพบว่ามีรายงานการศึกษามากมายและอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้นั้นช่วยประกันความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีได้ในระดับหนึ่ง

Prince of Songkla University Pattani Campus

2.3.5 การประยุกต์ใช้รังสีทางการค้า

ในปัจจุบันทั่วโลกมีโรงงานผลิตอาหารฉายรังสีทางการค้าประมาณ 30 โรงงาน ทั้งที่เป็นโรงงานนำร่องและโรงงานที่ผลิตทางการค้าซึ่งอยู่ใน 35 ประเทศ (Barbosa-Canovas et al.,1998) และมีจำนวนของโรงงานฉายรังสีทางการค้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การฉายรังสีอาหารมีศักยภาพสูงในการทำลายแมลง ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เสื่อมเสีย ชะลอการสุกและเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางสรีรวิทยาของพืชซึ่งทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อประเทศที่กำลังพัฒนา (Loaharanu, 1995) การใช้รังสีปริมาณต่ำ 0.05 - 0.15 กิโลเกรย์ มีผลในการยับยั้งการงอกของพืชหัวและพวกลำต้นใต้ดิน เช่น มันฝรั่ง หอมใหญ่และกระเทียม เป็นต้น โดยการยับยั้งการงอกของพืชดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากรังสีได้เข้าทำลาย DNA ในเซลล์ที่อยู่ในระยะพักตัว บริเวณปลายยอดทำให้การแบ่งเซลล์หยุดชะงักลง ปริมาณรังสี 0.15 - 0.50 กิโลเกรย์ มีประสิทธิภาพในการทำลายแมลงในธัญพืชและผลิตภัณฑ์รวมทั้งผักผลไม้สดและผลิตภัณฑ์อบแห้ง แมลงจะตายถ้าได้รับรังสีค่อนข้างต่ำปริมาณ 0.01-1.00 กิโลเกรย์ โดยรังสีไม่ก่อให้เกิดผลเสียในอาหารดังกล่าว นอกจากนั้น รังสียังใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง พืชตระกูลถั่ว แป้งข้าวโพด กาแฟ โกโก้ ถั่วเหลือง รวมทั้งผลิตภัณฑ์ทำแห้งอื่นๆ เช่นปลาแห้ง ผลไม้ทำแห้ง ถั่วและยาสูบ เป็นต้น ซึ่งปริมาณรังสีที่จะใช้ในการทำลายแมลงขึ้นอยู่กับชนิดของแมลง การฉายรังสีไม่สามารถป้องกันการย้อนกลับเข้าทำลายของแมลง ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จะต้องใช้วิธีการหรือภาชนะบรรจุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันเหตุการณ์

ดังกล่าวการประยุกต์ใช้รังสีที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือการทำลายแมลงที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียในผลไม้สดในเขตร้อน เช่น มะละกอ มะม่วงและพืชตระกูลส้ม ซึ่งถูกทำลายโดยแมลงวันผลไม้ (Fruit files) และแมลงอื่น ๆ ซึ่งประเทศที่นำเข้าผลไม้เหล่านี้มีมาตรการที่เข้มงวดในการควบคุมไม่ให้แมลงเหล่านี้เล็ดลอดเข้าประเทศ การใช้สารเคมี Ethylene dibromide (EDB) รมผลไม้เป็นวิธีการที่มักใช้เพื่อทำลายแมลงดังกล่าว แต่การใช้สารนี้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถก่อมะเร็งและยังตกค้างในผลไม้ จึงมีการห้ามใช้ในหลายประเทศ ในรัฐฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้รังสีปริมาณ 0.15 กิโลเกรย์ เพื่อทำลายแมลงที่ทำให้มะละกอเสื่อมเสียได้ ปริมาณรังสี 0.5 – 1.00 กิโลเกรย์ จะชะลอระยะบริบูรณ์ของผักและผลไม้สด เช่น กล้วย มะม่วง ส้ม มะละกอ และเห็ด การยืดอายุการเก็บรักษาสตรอเบอรี่หรือผลไม้อื่น ๆ รวมทั้งเนื้อปลาและเนื้อสัตว์ สามารถทำได้โดยการฉายรังสีขนาด 1.5 – 3.0 กิโลเกรย์ ซึ่งเพียงพอต่อการทำลายจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ ได้แก่แบคทีเรียและเชื้อราที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย การฉายรังสีให้ผลไม้สดจะสามารถกระทำได้โดยใช้ปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า 3 กิโลเกรย์ เนื่องจากรังสีปริมาณที่สูงกว่าระดับนี้จะทำให้ผลไม้อ่อนนุ่มลงและสูญเสียคุณภาพ การใช้รังสีถนอมรักษาอาหารแช่เยือกแข็งทำโดยใช้รังสีขนาด 2-3 กิโลเกรย์ ร่วมกับการเก็บอาหารที่ 0 – 3 องศาเซลเซียส จะสามารถยืดอายุการเก็บได้นานขึ้น การใช้รังสีแกมมาขนาด 2 กิโลเกรย์ สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ในซากไก่ไปได้มากกว่าร้อยละ 90 โดยไม่มีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องเทศและเครื่องเทศผง ซึ่งปนเปื้อนจากสปอร์ของแบคทีเรียและเชื้อรา รังสีขนาด 10 กิโลเกรย์ สามารถทำลายเชื้อและสปอร์เหล่านี้ได้โดยไม่มีผลเสียต่อคุณภาพ

การประยุกต์ใช้รังสีในการถนอมอาหารเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการต่าง ๆ เช่น ช่วยในการเพิ่มอัตราการทำแห้งของผักเพื่อใช้ในซุปผง เพิ่มผลผลิตของน้ำผลไม้ เช่น น้ำองุ่นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพในการทำไวน์ เพิ่มอัตราการทำแห้งผลไม้เช่นลูกพรุน ลดเวลาในการทำถั่วอบแห้ง เพิ่มขนาดของขนมปังที่ทำจากแป้งในสูตรที่เติมน้ำตาลเล็กน้อย ลดปริมาณของข้าวบาร์เลย์ที่ต้องใช้ในการผลิตเบียร์โดยเพิ่มผลผลิตของมอลต์ เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบต้นทุนทางด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตอาหารฉายรังสีกับวิธีการทำอาหารบรรจุกระป๋อง การแช่เย็นหรือแช่แข็งอาหารพบว่าการฉายรังสีใช้พลังงานไม่แตกต่างกัน (Loaharanu, 1995)

2.3.6 กฎหมายเกี่ยวกับการฉายรังสีอาหาร

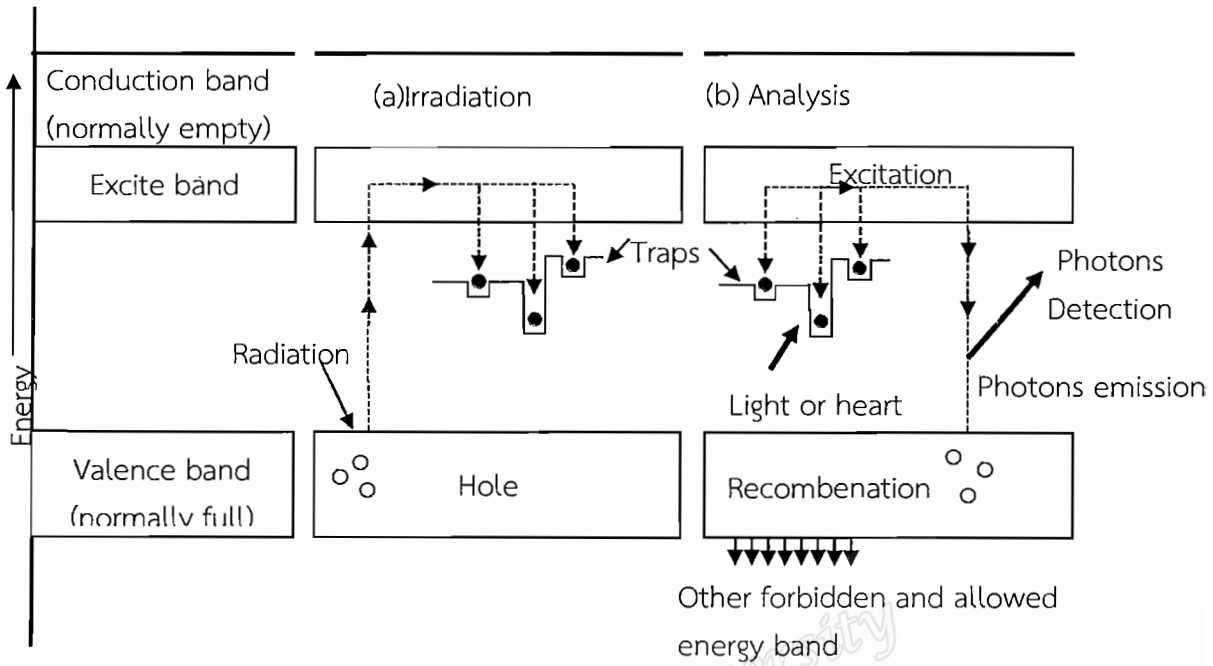
The Joint Expert Committee และ Codex Alimentarius ได้ออกมาตรฐาน "The Codex General Standard for Irradiated Foods" ในปี ค.ศ. 1983 ซึ่งใช้กันในหลายประเทศ ขณะเดียวกันบางประเทศใช้ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก โดยใช้ปริมาณรังสีในการถนอมรักษาอาหารสูงสุดไม่เกิด 10 กิโลเกรย์ และใช้เครื่องวัดปริมาณของรังสีที่เรียกว่า Dosimeter และในบางประเทศจะต้องระบุบนฉลากอาหารด้วยคำว่า "ฉายรังสีหรือถนอมรักษาโดยการฉายรังสี" (Irradiated, Treated

with Radiation, Radura, Protected by Ionization หรือ Treated by Irradiation) และมีเครื่องหมาย Radura ดังภาพที่ 2.6 โดยต้องระบุทั้ง 2 อย่างหรืออย่างใดอย่างหนึ่งโดยแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ

ภาพที่ 2.6 เครื่องหมาย Radura บนผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี

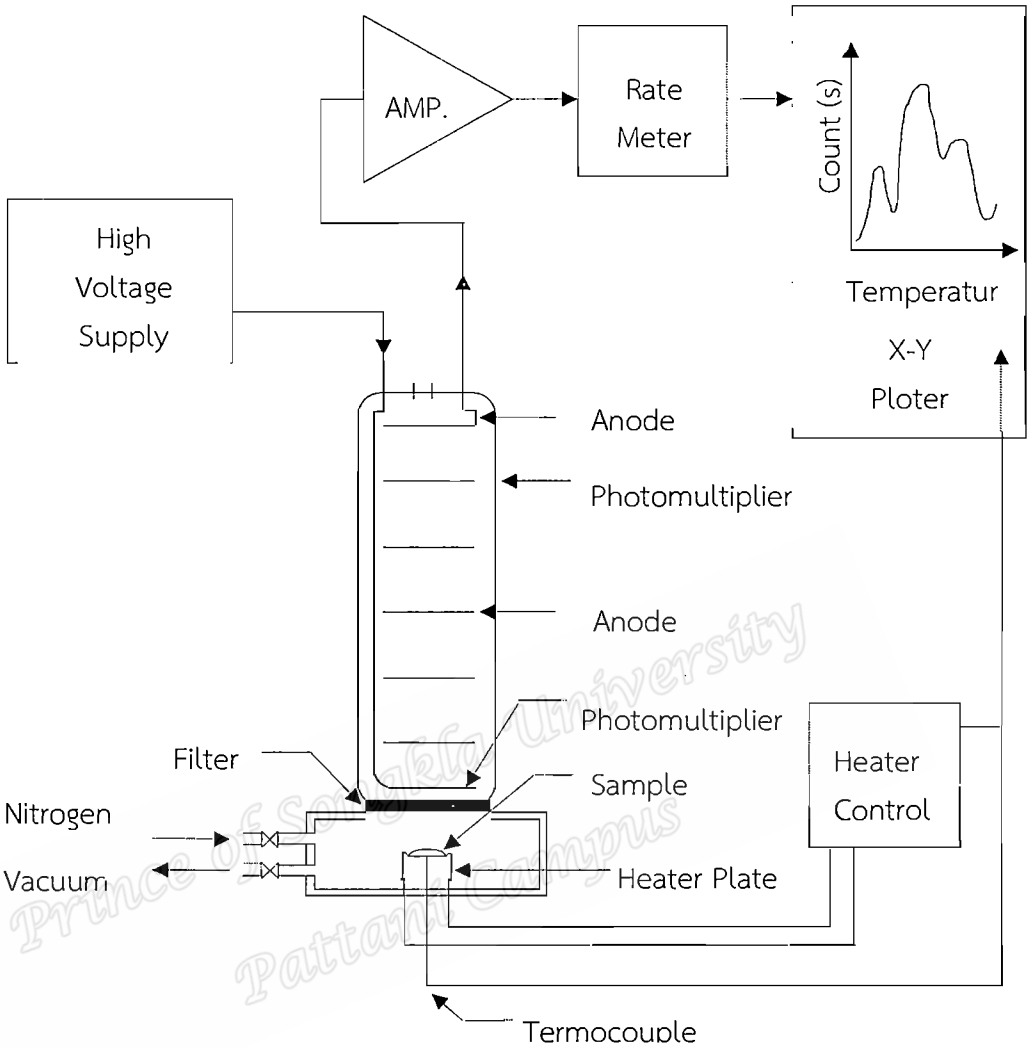
2.4 หลักการพื้นฐานของเทอร์โมลูมิเนสเซนส์

เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ความร้อนในการกระตุ้นให้เกิดการลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่วัตถุปลดปล่อยรังสีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น เมื่อผลึกอาบด้วยรังสีที่ก่อไอออนจนอิเล็กตรอนในผลึกมีพลังงานที่สูงกว่าระดับพลังงานในเวเลนซ์แบนด์ (Valence Band) อิเล็กตรอนจะแพร่ขึ้นไปอยู่ในชั้นคอนดักชันแบนด์ (Conduction Band) และถูกดักจับไว้ในหลุมกับดักอิเล็กตรอน โดยที่ปริมาณของอิเล็กตรอนในหลุมกับดักจะเป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ได้รับและเมื่อนำผลึกที่มีอิเล็กตรอนอยู่ในหลุมกับดักมากระตุ้นด้วยความร้อน ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในหลุมกับดักหลุดออกมาและกลับสู่ชั้นเวเลนซ์แบนด์โดยการปลดปล่อยรังสีในรูปแสงที่ตามองเห็น (Visible Light) ดังภาพที่ 2.7



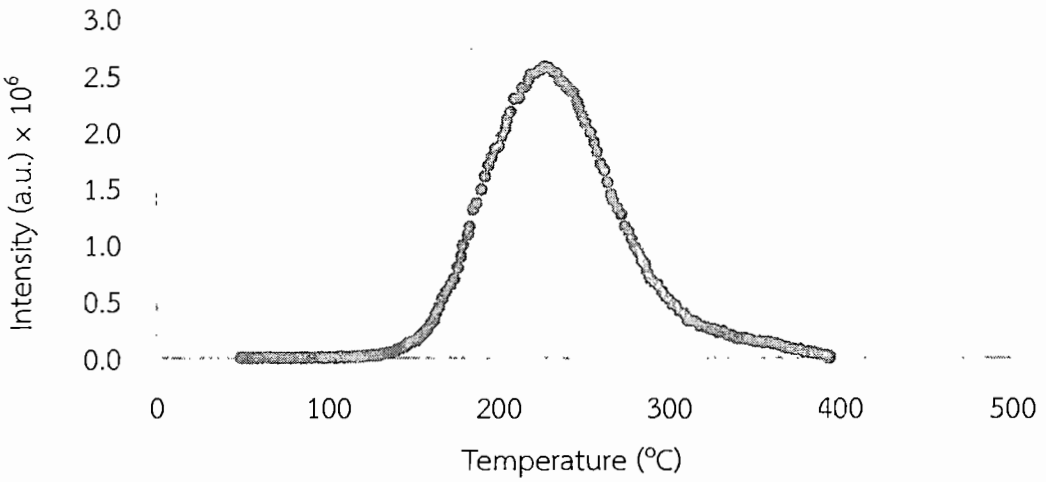
ภาพที่ 2.7 แสดงการเกิดลูมิเนสเซนซ์ของผลึก

Prince of Songkla University
Pattani Campus



ภาพที่ 2.8 หลักการทำงานของการเกิดสัญญาณการตอบสนองเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

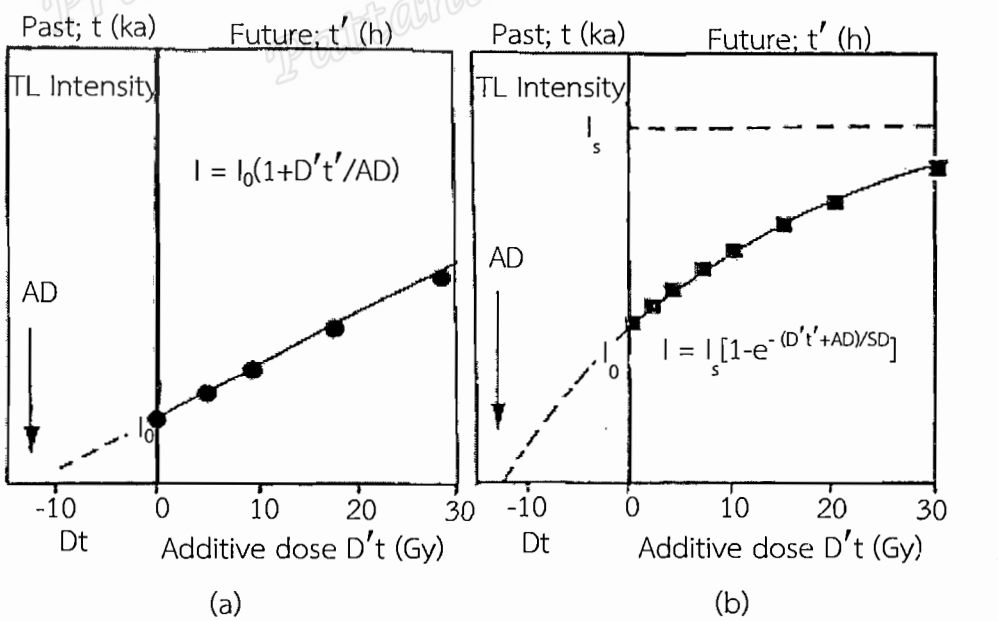
เมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์วัดปริมาณแสงที่ออกมา ณ อุณหภูมิต่างๆ นำค่าที่ได้เขียนกราฟระหว่างความเข้มกับอุณหภูมิจะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่า “Glow-Curve” ดังภาพที่ 2.9 โดยความสูงของจุดสูงสุด (Peak) หรือพื้นที่ใต้กราฟจะมีความสัมพันธ์เป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับ โดยจุดตัดแกน x ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.10 ได้จากการเขียนกราฟระหว่างความเข้มกับปริมาณรังสีที่ได้จากวิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลายๆ ชุด (Additive Dose) มีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและแบบอิ่มตัว กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับปริมาณรังสีมีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น (ภาพที่ 2.10a)



ภาพที่ 2.9 กราฟระหว่างความเข้มกับอุณหภูมิจะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่า "Glow-Curve"

ในกรณีที่หลุมกับดักอิเล็กตรอนลึกซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนในหลุมได้จำนวนมาก หรือบรรจุอิเล็กตรอนได้เป็นระยะเวลานาน กรณีที่เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับปริมาณรังสี แล้วมีแนวโน้มเป็นแบบอิ่มตัว (ภาพที่ 2.10b) ก็ต่อเมื่อหลุมกับดักอิเล็กตรอนตื้นซึ่งสามารถบรรจุอิเล็กตรอนเข้าไปในหลุมได้น้อย พอถึงจุดๆหนึ่งที่หลุมกับดักเต็ม แนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับปริมาณรังสีจะเกิดการอิ่มตัว

Prince of Songkla University Pattani Campus



ภาพที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับปริมาณรังสีที่ได้จากวิธี Additive (Ikeya, 1993)

โดยส่วนใหญ่แล้วการอาบรังสีเพิ่มเข้าไปในตัวอย่างจะใช้วิธีแบ่งย่อยตัวอย่างหลายๆ ชุด (Additive Dose) อาบรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-60 ในปริมาณโดสต่ำๆ แล้วเพิ่มปริมาณโดสขึ้นไปเรื่อยๆ ส่งผลให้ความเข้มแสงที่ปลดปล่อยออกมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นปฏิภาคกับปริมาณรังสีที่ได้รับ (Q) มีค่าเท่ากับผลคูณของปริมาณรังสีที่ได้จากวิธี Additive (D′) และเวลาการอาบรังสี (t′) ได้ว่า Q = D′t′ จากกราฟความสัมพันธ์ดังภาพที่ 2.10a

กำหนดให้ AD = Dt และเมื่อ Q = D′t′ จะได้

$$I = I_0\left(1+\frac{Q}{AD}\right) \tag{2.1}$$

เมื่อ I_0 และ I คือ ความเข้มสัญญาณก่อนและหลังการอาบรังสี
Q คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับจากวิธี Additive ที่เวลา t′
AD คือ ปริมาณรังสีสะสม (Accumulated Dose)

กรณีความเข้มกับอุณหภูมิมีแนวโน้มเป็นแบบอิ่มตัว (ภาพที่ 2.18b) จะได้

$$I = I_s(1-e^{-(D't'+AD)/SD}) \tag{2.2}$$

เมื่อ I_s คือ ความเข้มข้นที่อิ่มตัว
SD คือ ปริมาณการอาบรังสีที่อิ่มตัวและมีค่าเท่ากับการอาบรังสี D′

Prince of Songkla University Pattani Campus