

# บทที่ 7

## การฉายรังสีอาหาร (Food Irradiation)

### บทนำ

การฉายรังสีอาหารเป็นการถนอมรักษาอาหารวิธีหนึ่ง โดยการใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และฉายไปยังอาหารทั้งที่อยู่ในภาชนะบรรจุหรือไม่ผ่านการบรรจุและใช้ปริมาณของรังสีไอออไนซ์ (ionizing radiation) ที่เหมาะสมและในระยะเวลาจำกัด เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ (IAEA, 1999) การฉายรังสีอาหารเป็นหัวข้อที่มีการถกเถียงกันมาก โดยเฉพาะในเรื่องของความปลอดภัย แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับกระบวนการถนอมอาหารโดยการฉายรังสีนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก การฉายรังสีอาหารจัดเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อนหรือที่เรียกว่า cold process (Jones, 1992) 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 ได้รับรองอาหารฉายรังสีว่ามีความปลอดภัยและเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการถนอมอาหาร และได้ตั้งข้อกำหนด Codex General Standard ของอาหารฉายรังสีขึ้นเพื่อเป็นการรับรองความปลอดภัยของอาหารที่ผ่านกระบวนการนี้

### ประวัติการฉายรังสีอาหาร

จากการค้นพบรังสีเอ็กซ์ (X – rays) โดย W.K. Roentgen ในปี ค.ศ. 1895 และสารกัมมันตรังสี (radioactive substances) โดย H. Becquerel ในปีถัดมา ทำให้มีการเริ่มต้นการศึกษาผลกระทบ

ของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต ในการใช้รังสีในการถนอมอาหารครั้งแรก ได้มีการจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ.1905 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ส่วนในประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มใช้รังสีกับอาหารครั้งแรกในปี ค.ศ. 1920 โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำลายพยาธิ *Trichinella spiralis* ซึ่งมีปะปนอยู่ในเนื้อสุกร (Jones, 1992) และมีการศึกษาอย่างมากเกี่ยวกับผลของรังสีเอ็กซ์ต่ออาหารและองค์ประกอบ ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1920-1930 ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 ได้มีการฉายรังสีข้าวสาลีและแป้งสาลี เพื่อควบคุมแมลง และใช้ในการถนอมอาหารสำหรับนักบินอวกาศของประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 และในปี ค.ศ. 1987 ทางกลุ่มประเทศเศรษฐกิจยุโรป ยกเว้นสหราชอาณาจักรและเยอรมันตะวันตก ได้รับรองความปลอดภัยของอาหารบางชนิดที่ผ่านการฉายรังสี และในปัจจุบันนี้มีมากกว่า 40 ประเทศทั่วโลกที่ได้รับรองอาหารที่ผ่านการฉายรังสีอาหารซึ่งมีมากกว่า 100 รายการ ดังตารางที่ 7.1 ซึ่งในจำนวนนี้มี 25 ประเทศที่รับรองอาหารฉายรังสีที่ผลิตเพื่อการค้า การฉายรังสีในหลายประเทศส่วนใหญ่ มีวัตถุประสงค์ในการควบคุมและทำลายแบคทีเรียและเชื้อราในเครื่องเทศ นอกจากนี้ยังใช้ในการชะลอการงอกของมันฝรั่งและหัวหอม และการถนอมรักษา ธัญพืชและแป้ง ผลไม้สด รวมไปถึงเนื้อสัตว์จำพวกสัตว์ปีก เมล็ดพืช ปลา และเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ โดยมีรายงานว่าการใช้รังสีแกมมา สามารถคงคุณลักษณะที่ดีของอาหารและทำลายจุลินทรีย์ต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 7.1 ประเทศต่างๆ ที่มีการรับรองการบริโภคอาหารฉายรังสี

แอลจีเรีย	คิวบา	อิตาลี	โปแลนด์
อาร์เจนตินา	สาธารณรัฐเชค	ไอวอรีโคสต์	รัสเซีย
บังคลาเทศ	เดนมาร์ก	ญี่ปุ่น	แอฟริกาใต้
เบลเยียม	ฟินแลนด์	เกาหลี	สเปน
บราซิล	ฝรั่งเศส	เม็กซิโก	ซีเรีย
บัลแกเรีย	เยอรมัน	เนเธอร์แลนด์	ไทย
แคนาดา	ฮังการี	นิวซีแลนด์	ยูเครน
ชิลี	อินเดีย	นอร์เวย์	สหราชอาณาจักร
จีน	อิหร่าน	ปากีสถาน	สหรัฐอเมริกา
โครเอเชีย	อิสราเอล	ฟิลิปปินส์	อุรุกวัย
เวียดนาม	ยูโกสลาเวีย		

ที่มา : Barbosa-Canovas et al. (1998)

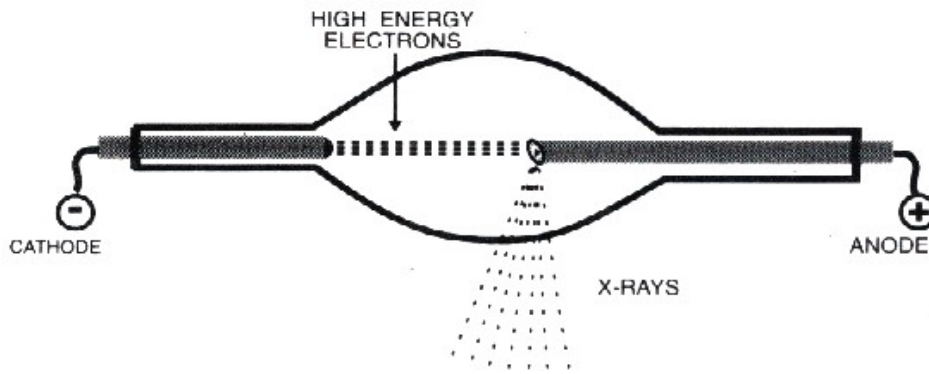
## เทคโนโลยีของกระบวนการฉายรังสีอาหาร

การฉายรังสีอาหารจัดเป็นวิธีการทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ หรือ อิเล็กตรอน ไปยังอาหารที่ผ่านการบรรจุหีบห่อหรืออาหารที่มีปริมาณมาก โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้

### 1. แหล่งของรังสี

รังสี (radiation) หมายถึงพลังงานที่แผ่กระจายจากต้นกำเนิด ออกไปในอากาศหรือตัวกลางใดๆ ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นรังสีความร้อน รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา ฯลฯ และรวมไปถึงกระแสอนุภาคที่มีความเร็วสูงด้วย อาทิเช่นรังสีแอลฟา รังสีบีตาและรังสีนิวตรอน การจำแนกรังสีตามคุณสมบัติทางกายภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มรังสีที่ไม่ก่อไอออน (non – ionizing radiation) ได้แก่ รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ความร้อน แสง เสียง คลื่นวิทยุ อัลตราไวโอเลตและไมโครเวฟและกลุ่มรังสีที่ก่อให้เกิดไอออน (ionizing radiation) ได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีแอลฟาและรังสีนิวตรอน ซึ่งรังสีในกลุ่มหลังนี้มีผู้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่ารังสีปรมาณู (atomic radiation) (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2542)

รังสีที่ใช้เพื่อการถนอมอาหารจัดเป็นรังสีไอออนไนส์ ซึ่งมีช่วงความถี่ของช่วงคลื่นสูงที่สุดคือ  $10^{19}$  –  $10^{22}$  เฮิร์ตซ์ (Hz) ซึ่งให้พลังงานสูงสามารถทะลุทะลวงเข้าไปในอะตอมของสารอื่นๆ จนถึงขั้นแตกตัวเป็นไอออนได้ ชนิดของรังสีดังกล่าวได้แก่รังสีแกมมา (gamma rays) รังสีเอกซ์ (X-rays) และลำอิเล็กตรอน (electron beam) (สายสนม, 2540) รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก มีจุดกำเนิดจากนิวเคลียส มีอำนาจในการทำให้แตกตัวน้อยมากแต่มีความสามารถทะลุทะลวงสูง ส่วนรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากเช่นกันและมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับรังสีแกมมา แต่มีได้มาจากนิวเคลียส และมีจุดกำเนิดจากชั้นของอิเล็กตรอนของอะตอมใดๆ เช่นเกิดจากการยิงอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงไปถูกเป้าที่ทำด้วยโลหะ ดังเช่นที่เกิดในเครื่องเอกซเรย์ การเกิดรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 7.1

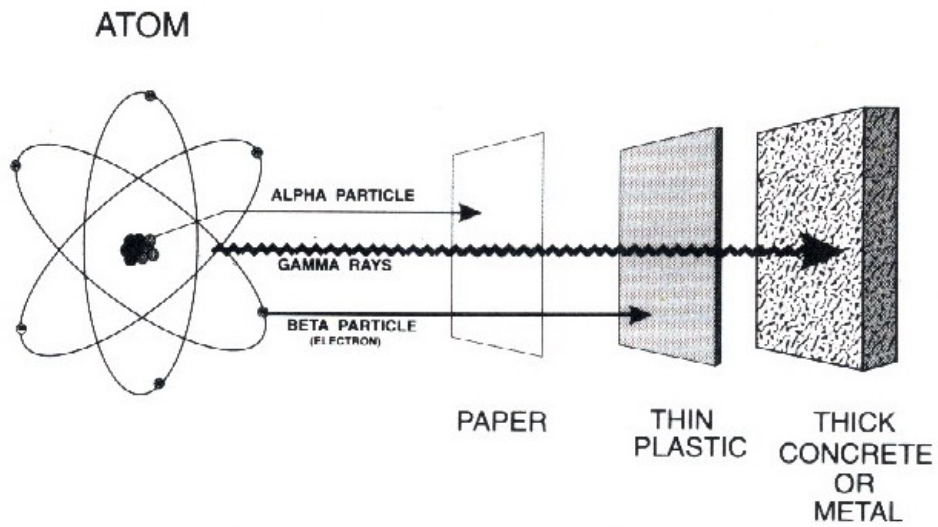


ภาพที่ 7.1 การเกิดรังสีเอ็กซ์

ที่มา : Satin (1993)

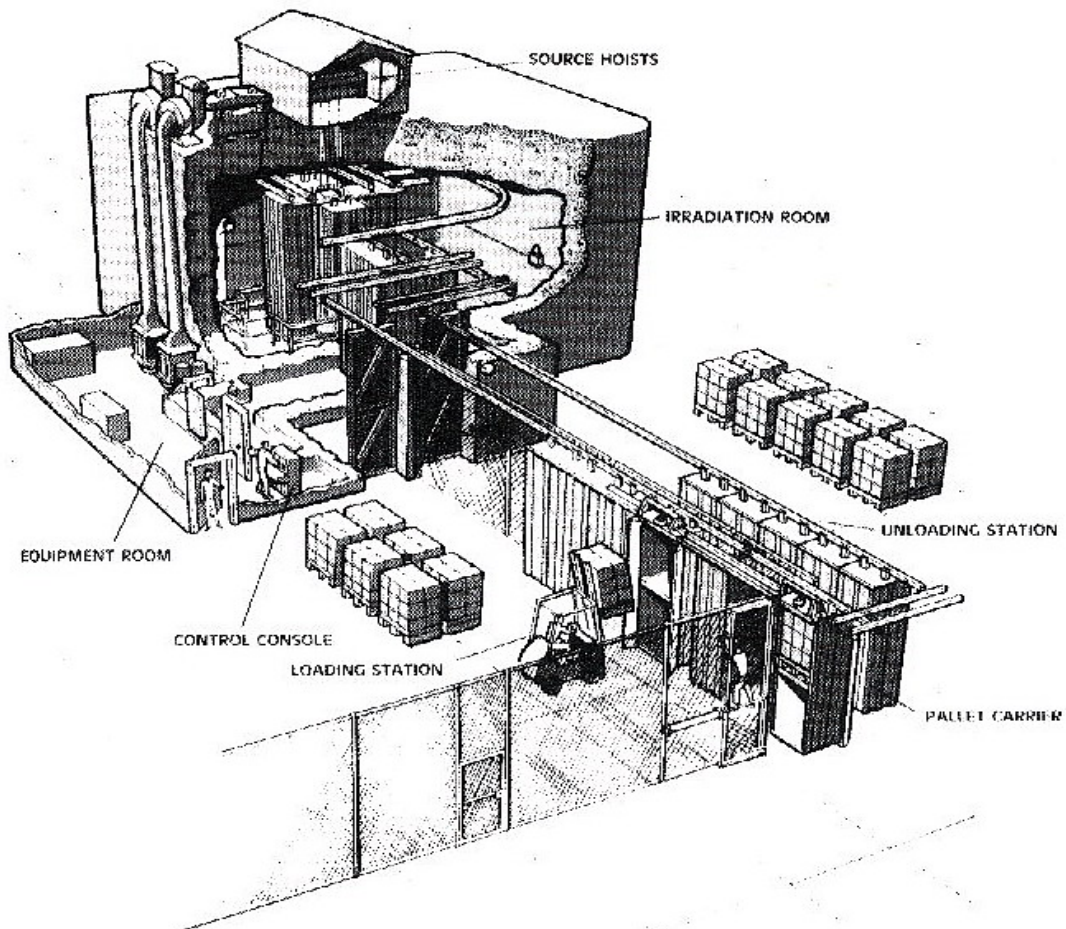
โดยทั่วไปแล้วอาหารจะถูกฉายด้วยรังสีแกมมาที่กำเนิดจากสารไอโซโทปกัมมันตรังสี (radioisotopes หรือ radionuclides) หรือถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนหรือรังสีเอ็กซ์ที่กำเนิดจากเครื่องเร่งอิเล็กตรอน (electron accelerator) โดยรังสีที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถใช้ในการสเตอริไลซ์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ใช้แล้วทิ้ง (disposable medical products) ถึงแม้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ ที่ให้กำเนิดรังสีจะแตกต่างกันออกไป แต่รังสีที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในลักษณะเดียวกัน โดยมีความแตกต่างกันคือความสามารถในการแทรกซึมผ่านวัตถุ (power of penetration) ของรังสีชนิดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 7.2 ซึ่งในการฉายรังสีอาหารจะเกี่ยวข้องกับขนาดและความหนาแน่นของอาหารที่นำไปฉายรังสี แหล่งกัมมันตรังสีที่ใช้ในทางการค้าที่ให้รังสีแกมมา ได้แก่ธาตุโคบอลต์-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากประเทศแคนาดา นอกจากนั้นยังมีธาตุซีเซียม -137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) ที่ได้จากกากนิวเคลียร์ที่ใช้แล้ว ในการฉายรังสีอาหารนั้นต้นทุนในการผลิตจะใกล้เคียงกับกระบวนการแปรรูปอาหารวิธีอื่น ๆ และลักษณะโดยทั่วไปของโรงงานฉายรังสีอาหารทางการค้าแสดงดังภาพที่ 7.3

Rosenthal (1992) รายงานว่าธาตุโคบอลต์-60 ได้จากการใช้อิออนภาคนิวตรอน (neutron) ยิงเข้าไปยังธาตุโคบอลต์-59 ภายในถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (nuclear reactor) เมื่อธาตุโคบอลต์-60 สลายตัวจะปล่อยรังสีแกมมาออกมาโดยมีพลังงาน 1.17 และ 1.33 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) และเมื่อรังสีหมดสิ้นแล้ว จะกลายเป็นธาตุนิเกิล (nickel) ซึ่งไม่เป็นสารกัมมันตรังสี ธาตุโคบอลต์-60 นี้มีครึ่งชีวิต (half life) 5.3 ปี โดยมีพลังงานรังสีลดลง 12.5% ต่อปี และพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะกระจายทุกทิศทางและดูดซับเข้าไปในวัตถุที่นำมาฉายรังสีได้เพียง 10 – 30 % เท่านั้น ส่วนซีเซียม - 137 เมื่อสลายตัวจะปล่อยรังสีแกมมาโดยมีพลังงาน 0.66 MeV และมีครึ่งชีวิต (half life) 30 ปี และมีพลังงานรังสีลดลง 2.3% ต่อปี



ภาพที่ 7.2 ความสามารถในการแทรกซึมผ่านวัสดุต่างๆ ของรังสีแอลฟา แกมมาและลำอิเล็กตรอน

ที่มา : Satin (1993)



ภาพที่ 7.3 โรงงานฉายรังสีอาหารทางการค้าทั่วไปที่ใช้โคบอลต์-60 เป็นแหล่งกำเนิดของรังสี

ที่มา : Barbosa-Canovas et al. (1998)

ในส่วนของเครื่องเร่งอิเล็กตรอนทางการค้าจะสร้างลำอิเล็กตรอนที่มีกำลังสูงมากพอที่จะยอมรับได้ในการฉายรังสีอาหาร แต่อิเล็กตรอนจะไม่แทรกซึมลงในเนื้อของวัตถุที่ถูกฉายรังสี ส่วนลำอิเล็กตรอนที่ถูกกั้นโดยส่วนที่เป็นโลหะหนัก เป็นผลให้เกิดรังสีเอกซ์ซึ่งจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงสูงกว่า (Jones, 1992) อย่างไรก็ตามโดยพลังงานส่วนใหญ่จากอิเล็กตรอนจะสูญเสียไปอยู่ในรูปความร้อนในวัตถุนั้น (Barbosa-Canovas et al., 1998)

ในทางการค้าเครื่องเร่งอิเล็กตรอนมักใช้ในการฉายรังสีให้กับวัตถุที่มีขนาดบางและเพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของวัตถุนั้น อิเล็กตรอนจะถูกยิงไปที่วัตถุเพียงด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว ในขณะที่ด้านที่ไม่ได้ถูกยิงอิเล็กตรอนจะใช้เป็นด้านที่ตรวจวัดและเป็นการประกันว่าลำอิเล็กตรอนได้ทะลุทะลวงผ่านวัตถุดังกล่าว ขนาดความหนาของวัตถุจะมีค่าได้อย่างมากที่สุดประมาณ 3.3 เซนติเมตร (Brynjolfsson, 1989) และขนาดของอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ที่สูงที่สุดที่สามารถใช้ในการฉายรังสีอาหาร คือ 10 และ 5 MeV ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่จะไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสารกัมมันตรังสีขึ้นในอาหาร ค่าพลังงานเฉลี่ยของการฉายรังสีโดยใช้โคบอลต์-60 คือ 1.2 MeV ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าขีดจำกัดดังกล่าว และมีรายงานว่าพลังงานระดับนี้ ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้น จะมีปริมาณไม่มากเกินกว่าสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติที่มีอยู่ในอาหารทั่วไปซึ่งทำให้เกิดขึ้นโดย C-14 และ K-40 นอกจากนี้สารกัมมันตรังสีจะสลายอย่างรวดเร็ว ประมาณ 10-20 เท่า ภายในช่วง 24 ชั่วโมงแรกหลังจากการฉายรังสี กัมมันตรังสีตามธรรมชาติจะไม่ใช้เวลาในการสลายตัวมากไปกว่าอายุการเก็บรักษาปกติของอาหาร การใช้เครื่องยิงลำอิเล็กตรอน จัดว่าเป็นวิธีที่ประหยัดกว่าการใช้เครื่องฉายรังสีโดยใช้โคบอลต์-60 ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์มีความหนาไม่มากและมีอัตราการผลิต (throughput rate) และสามารถนำเครื่องยิงลำอิเล็กตรอนมาต่อเข้ากับสายการผลิตแบบต่อเนื่องได้ นอกจากนี้แหล่งของรังสีเอกซ์ สามารถปิดเครื่องได้ในกรณีที่ยังไม่ใช้งาน ในขณะที่โคบอลต์-60 จะสลายตัวอย่างต่อเนื่องแม้ว่าจะไม่ได้ใช้งานก็ตาม

ในการฉายรังสีอาหารนั้น หัวใจของโรงงานฉายรังสีอาหารคือแหล่งของรังสี โดยทั่วไปโรงงานฉายรังสีอาหารจะมีผนังคอนกรีตที่หนากว่า 1.7 เมตรโดยรอบเพื่อป้องกันการรั่วไหล ส่วนภาชนะที่ใช้เก็บสารกัมมันตรังสีจะเป็นแท่งโลหะสแตนเลสและเก็บไว้ในอ่างน้ำที่มีความลึกประมาณ 5 - 6 เมตรในขณะที่ไม่ได้ใช้งาน และในส่วนของทางเข้าและออกของผลิตภัณฑ์ที่นำไปฉายรังสีอาหารนั้นจะมีลักษณะคล้ายเขาวงกต (labyrinths) (Rosenthal, 1992) ซึ่งเป็นการเพิ่มความปลอดภัยจากการรั่วไหลของรังสีให้แก่ผู้ปฏิบัติงานหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง

Brynjolfsson (1989) รายงานว่าขนาดของแหล่งให้กำเนิดรังสีจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของรังสีที่ใช้ (dose) และอัตราการผลิต ดังสมการ

$$S = \frac{XD}{3600F}$$

โดย S = ขนาดของแหล่งกำเนิดรังสี (kW), X = อัตราการผลิต (kg/h)

D = ปริมาณของรังสี (kGy) และ F = ส่วนของปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืน

ค่า F จะขึ้นอยู่กับลักษณะของการฉายรังสี รูปร่างและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไป ค่าของ F ที่ใช้สำหรับเครื่องเร่งอิเล็กตรอน เครื่องฉายรังสีโดยใช้โคบอลต์-60 และเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ จะมีค่า 0.4, 0.25 และ 0.05 ตามลำดับ

หน่วยวัด (units) ของรังสีนั้นมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมและมีความแตกต่างกัน โดยอัตราการสลายตัวของปริมาณไอโซโทปรังสีหนึ่งๆ สามารถวัดโดยใช้หน่วยวัดเรียกว่า คูรี (Curie , Ci) ซึ่ง 1 คูรี เท่ากับการสลายตัวของนิวเคลียสของไอโซโทปรังสีนั้นๆ  $3.7 \times 10^{10}$  ครั้งต่อวินาที (disintegration/second) ต่อมาได้เปลี่ยนแปลงเป็นหน่วยใหม่ในระบบ SI คือเบคเคอเรล (Bequerel , Bq) โดย 1 Bq เท่ากับการสลายตัว 1 ครั้งต่อวินาที ดังนั้น 1 Ci จึงเท่ากับ  $3.7 \times 10^{10}$  Bq อย่างไรก็ตามหน่วยคูรียังเป็นที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่นในทางการแพทย์และจากการที่ไอโซโทปรังสีที่มีปริมาณมากอาจจะแผ่รังสีออกมาในความเข้มข้นน้อยได้ เช่นดินแร่ยูเรเนียมแผ่รังสีแอลฟา ซึ่งมีการทะลุทะลวงต่ำ ในการวัดปริมาณรังสีที่แผ่จากสารรังสี (exposure หรือ exposed dose) จึงสนใจรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์ ซึ่งมีผลกระทบต่อวัตถุหรือสิ่งมีชีวิตรอบข้างมากกว่า และมีหน่วยวัดเรียกว่าเรนต์เกน (Roentgen) โดย 1 เรนต์เกน คือปริมาณรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่ทำให้อากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ความดันและอุณหภูมิมาตรฐาน (NTP) แตกตัวเกิดเป็นไอออน  $2.083 \times 10^{19}$  คู่ หรือ 1 esu (electrostatic unit)

จากการที่ปริมาณของรังสีบางส่วนถูกดูดกลืนไว้เรียกว่าปริมาณรังสีที่ดูดกลืน (absorbed dose) ซึ่งมีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุและชนิดของรังสี และมีการกำหนดว่าวัตถุที่ได้รับรังสีเอกซ์หรือแกมมา เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานไว้ 100 เอิร์ก (erg - คือหน่วยพื้นฐานของพลังงาน) ต่อมวล 1 กรัมของวัตถุนั้น เรียกว่า 1 แรด (rad - radiation absorbed dose) ซึ่งเป็นหน่วยเดิม ส่วนหน่วยใหม่คือระบบ SI กำหนดเป็น เกรย์ (Grey, Gy) โดย 1 Gy เท่ากับพลังงานที่ถูกดูดกลืน 1 จูล (Joule) ต่อวัตถุ 1 กิโลกรัม และมีค่าเท่ากับ 100 แรด

ในส่วนของหน่วยวัดปริมาณรังสีสำหรับบุคคลที่ได้รับ (dose equivalent) มีความซับซ้อนกว่าที่วัตถุได้รับเล็กน้อย โดยพิจารณาผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อ ซึ่งมีความแตกต่างกันไปตามแต่ชนิดของอวัยวะของร่างกายมนุษย์และชนิดของรังสี ทั้งนี้บุคคลใดได้รับรังสีแล้วรังสีนั้นก่อให้เกิดผลทางชีววิทยาเทียบเท่ากับผลที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์หรือแกมมา 1 แรด เรียกว่าบุคคลนั้นได้รับรังสี 1 เรม (Rem , Roentgen equivalent man) หรือเท่ากับ 100 ซีเวิร์ต (Sievert, Sv) ตามหน่วย SI ซึ่งตามปกติการได้รับรังสีของบุคคลในชีวิตประจำวันพบว่ามีค่าน้อยกว่า 1 เรมมาก หน่วยซีเวิร์ตจึงกลายเป็นหน่วยใหญ่ โดยทั่วไปจึงใช้เป็นมิลลิซีเวิร์ตซึ่งเล็กถึง 1,000 เท่า เช่นการเอ็กซ์เรย์กระเพาะที่โรงพยาบาลในแต่ละครั้ง จะได้รับรังสีประมาณ 15 มิลลิซีเวิร์ต (สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2542) การแปลงหน่วยวัดของรังสีแสดงดังตารางที่ 7.2

### ตารางที่ 7.2 การแปลงหน่วยวัดของรังสี

---

1 eV = $1.6 \times 10^{-19}$ J
$10^6$ eV = 1 MeV
1 Gy = 1 J/kg = $10^7$ erg/kg
1 Gy = $6.242 \times 10^{18}$ eV/kg = 0.24 gram-calorie/kg = 100 rad
1 kGy = 100 krad
10 kGy = 1 Mrad
1 rem = 0.001 Sv

---

ที่มา : ดัดแปลงจาก Rosenthal (1992)

ในส่วนของเครื่องมือที่ใช้วัดปริมาณพลังงานที่สารหรือวัตถุดูดกลืนไว้จากการได้รับรังสีเรียกว่ามาตรวัดปริมาณรังสี (dosimeter) ซึ่งมีหลายชนิด ชนิดที่แพร่หลายที่สุดได้แก่ Fricke dosimeter ซึ่งอาศัยหลักการเทียบสีตามมาตรฐาน ซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสีของสารละลายมาตรฐานในระบบ ferrous sulfate ซึ่งมาตรวัดนี้มีความสำคัญมากโดยใช้ในการควบคุมการทำงานเนื่องจากทุกชุดของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะต้องได้รับปริมาณพลังงานเท่ากัน มาตรวัดรังสีที่นิยมใช้เพื่อการควบคุมมักนิยมใช้แบบ radiochromic plastic dosimeter มีชื่อทางการค้าว่า Perplex ซึ่งเปลี่ยนสีได้เมื่อดูดกลืนรังสีในปริมาณที่ทราบแน่นอนโดยนำแผ่นพลาสติกดังกล่าวไปอ่านค่าสีที่เปลี่ยนไป (สายสนม, 2540)

Satin (1993) รายงานว่าในการฉายรังสีอาหารโดยทั่วไป ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะอยู่ระหว่าง 50 – 10,000 Gy ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการใช้รังสี 10,000 Gy หรือ 10 kGy จะเทียบเท่ากับพลังงานที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 2.4 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้รังสีไอออนส์สามารถแบ่งตามปริมาณของรังสีที่ใช้ได้แก่

- 1) ระดับต่ำ (low dose) ใช้ปริมาณรังสีสูงถึง 1 kGy โดยใช้เพื่อยับยั้งการงอกของพืชหัว ชะลอการสุกและทำลายแมลง
- 2) ระดับปานกลาง (medium dose) ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 1 – 10 kGy โดยใช้เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ลดปริมาณของเชื้อโรคที่ไม่สร้างสปอร์และชะลอการสุก
- 3) ระดับสูง (high dose) ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 10 – 50 kGy โดยใช้เพื่อสเตอริไลส์อาหาร

ในส่วนของงานนำรังสีมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปอาหารมีคำศัพท์ที่เฉพาะดังนี้

**Radication** เป็นการฉายรังสีในระดับที่สามารถลดปริมาณของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์และพวกที่ก่อให้เกิดโรค จนไม่สามารถตรวจพบได้เมื่อใช้วิธีการทางจุลชีววิทยา และยังหมายความถึงการทำลายปรสิต (parasites) วิธีนี้ใช้ปริมาณรังสีต่ำ (0.1 - 8.0 kGy) ในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและจุลินทรีย์อื่น ยกเว้นไวรัส และยังทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคชนิดไม่สร้างสปอร์ (ประมาณ 2 - 8 kGy) และวิธีนี้อาจเรียกว่า irradiation pasteurization โดยเฉพาะเมื่อต้องการเน้นในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

**Radurization** เป็นการฉายรังสีในระดับที่เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพของอาหาร โดยทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหาร และใช้รังสีขนาด 0.4 - 10.0 kGy เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ วิธีนี้เรียกได้ว่าเป็น irradiation pasteurization วิธีหนึ่ง

**Radappertization** เป็นการถนอมอาหารโดยการฉายรังสีปริมาณสูงเพียงพอที่จะลดจำนวนและ/หรือ กิจกรรมของจุลินทรีย์ (ยกเว้นไวรัส) ให้น้อยลง ซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยวิธีเฉพาะทางจุลินทรีย์ได้ วิธีการนี้จะทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสีย หรือทำลายสารพิษให้หมดไปและไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนซ้ำซ้อน โดยใช้รังสีขนาด 10 -15 kGy ในการทำให้ปลอดเชื้อ วิธีนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า irradiation sterilization หรือ commercial sterility (ความหมายเดียวกันกับ

ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาในสภาวะปกติได้ (Barbosa-Canovas et al., 1998)

คณะกรรมการผู้เชี่ยวชาญร่วมเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี (The Joint Expert Committee on the Wholesomeness of Irradiated Foods) จากองค์การอนามัยโลก (WHO) องค์การอาหารและการเกษตร (FAO) และ International Atomic Energy Agency (IAEA) ได้ประกาศรับรองความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีในปี ค.ศ. 1970 และในปี ค.ศ. 1980 ได้สรุปว่าการฉายรังสีอาหารโดยให้ปริมาณรังสีโดยเฉลี่ย 10 kGy จะไม่มีผลทำให้เกิดอันตรายจากสารพิษที่อาจถูกสร้างขึ้นและไม่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ รวมทั้งปราศจากอันตรายที่อาจเกิดเนื่องจากจุลินทรีย์ โดยแท้จริงแล้วปริมาณรังสีขนาด 10 kGy อาจไม่ใช่เป็นปริมาณที่สูงสุดที่จะเป็นหลักประกันความปลอดภัยต่อการบริโภคอาหารฉายรังสี และได้มีการทดสอบความปลอดภัยของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณดังกล่าวหลายครั้ง (Loaharanu, 1995) แต่เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่ามีความปลอดภัย ในส่วนของการศึกษาการใช้รังสีปริมาณสูงในการยืดอายุการเก็บรักษาอาหารในประเทศสหรัฐอเมริกา มีรายงานว่า การใช้ปริมาณรังสีที่สูงถึง 58 kGy จะไม่มีผลต่อคุณภาพของอาหาร ปริมาณของรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 ปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ

กระบวนการ	ปริมาณรังสี (kGy)
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)

## ประโยชน์และข้อจำกัดของการฉายรังสี

Urban (1989) รายงานว่า การใช้รังสีในการถนอมอาหารมีประโยชน์ดังนี้

1. ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งรังสีมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย
2. รังสีทำลายจุลินทรีย์ แมลง ที่เป็นสาเหตุให้เกิดโรคได้ ทำให้อาหารมีคุณภาพดีและลดปัญหาจากการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของมนุษย์
3. สามารถควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงระยะบริบูรณ์ (maturation) การชราภาพ (senescence) รวมทั้งการงอก (sprouting) ของผักและผลไม้สด
4. ทำให้องค์ประกอบทางเคมีบางอย่างของอาหารเปลี่ยนแปลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพอาหารให้ดีขึ้น
5. ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในอาหาร
6. ช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร
7. ช่วยรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร หรือทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถนอมรักษาอาหารโดยวิธีอื่น ๆ

นอกจากนั้น การฉายรังสียังสามารถแทนที่การใช้สารเคมีในการถนอมรักษาอาหาร เช่น ใช้แทนที่สารไนไตรท์ในผลิตภัณฑ์ cured meats หรือใช้รังสีในการแทนที่การรมอาหารหรือส่วนประกอบอาหารด้วยสารเคมีต่างๆ เช่น ethylene dibromide methyl bromide และ ethylene oxide ในอาหาร (Loaharanu, 1994) เช่น ในพวกเครื่องเทศ ซึ่งในปัจจุบันนี้มีข้อจำกัดในการใช้สารเคมีเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากพบว่าสารเคมีเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการกลายพันธุ์และเป็นสาเหตุให้เกิดโรคมะเร็งขึ้นได้ ข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการฉายรังสีคือ สามารถฉายรังสีให้กับอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นการป้องกันการปนเปื้อนภายหลังการฆ่าเชื้อได้เป็นอย่างดี

การฉายรังสีอาหารสามารถกระทำกับอาหารทั้งภาชนะบรรจุที่มีขนาดเล็กและใหญ่ ในสภาพแช่เยือกแข็งหรือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้สามารถปรับเปลี่ยนและดัดแปลงได้ง่าย การแช่เยือกแข็งอาหารก่อนการฉายรังสีทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเสื่อมเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) หรือการเสียสภาพธรรมชาติจากความร้อน (heat

denaturation) และมีรายงานว่า การฉายรังสีอาหาร เป็นวิธีการเดียวที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เช่น *Salmonella* ในอาหารแช่เยือกแข็งได้

ในส่วนของภาชนะบรรจุที่ใช้กับอาหารที่จะนำไปผ่านการฉายรังสีจะต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหาร ซึ่งในบางครั้งอาจมีการใช้การปรับสภาพบรรยากาศในภาชนะบรรจุ (modified atmosphere packaging) ร่วมกับการฉายรังสี ตัวภาชนะบรรจุจะต้องทนต่อรังสี และสามารถปกป้องอาหารจากสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ (protective characteristics) และต้องไม่ปลดปล่อยสารพิษที่อาจถูกสร้างขึ้นภายหลังจากการฉายรังสีและถ่ายเทสู่อาหาร รวมทั้งไม่ทำให้เกิดกลิ่นหรือรสชาติอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง (Barbosa-Canovas et al., 1998)

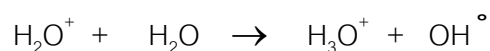
การฉายรังสีอาหารทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายลักษณะ ตัวอย่างเช่นทำให้โมเลกุลที่มีขนาดยาวเช่น เซลลูโลสแตกตัวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืช ดังนั้นผลไม้และผักบางชนิดจึงอ่อนนุ่มหรือสูญเสียคุณภาพของเนื้อสัมผัสหลังจากผ่านการฉายรังสี การฉายรังสีอาหารที่มีไขมันทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่สามารถออกซิไดซ์ไขมันและทำให้เกิดการหืน (rancidity) ขึ้นได้ การใช้รังสีปริมาณสูงอาจทำให้เกิดกลิ่นผิดปกติที่เรียกว่า burnt feathers เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนั้นยังทำให้โปรตีนสลายตัวและทำลายวิตามินบางชนิด โดยเฉพาะเอ บี ซี และอี อย่างไรก็ตามไม่สามารถกล่าวได้ว่าการฉายรังสีอาหารสามารถกระทำได้กับอาหารทุกประเภท เช่นเดียวกันกับการถนอมรักษาอาหารด้วยวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากการมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

การฉายรังสีอาจทำให้ผลไม้บางชนิดอ่อนนุ่มและสีเปลี่ยนแปลงและมีผลทำให้ความเหนียวของไข่ขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงถ้าใช้รังสีขนาดที่สูงพอที่จะทำลายเชื้อ *Salmonella* ซึ่งเป็นผลให้ไข่สดที่ผ่านการฉายรังสีไม่เป็นที่ยอมรับ การฉายรังสีน้ำนมจะทำให้รสชาติเปลี่ยนแปลงจากการเกิดออกซิเดชัน ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ประเภทต่าง ๆ จะมีระดับปริมาณรังสีที่ใช้ได้โดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสซึ่งแตกต่างกันออกไป แต่อาจแก้ปัญหาโดยนำไปแช่เยือกแข็งก่อนนำมาฉายรังสี ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงต่างๆ ลดลงได้ในระดับหนึ่ง การฉายรังสีอาหารสามารถยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ได้ จึงช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของผลไม้เช่น ภาวะบริบูรณ์ไปเป็นระยะสุกจนถึงระยะชราภาพได้ โดยมีการศึกษาพบว่าปริมาณรังสีสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดลักษณะผิดปกติของผักและผลไม้คือการใช้ที่ระดับ 2.25 kGy (Kader, 1986)

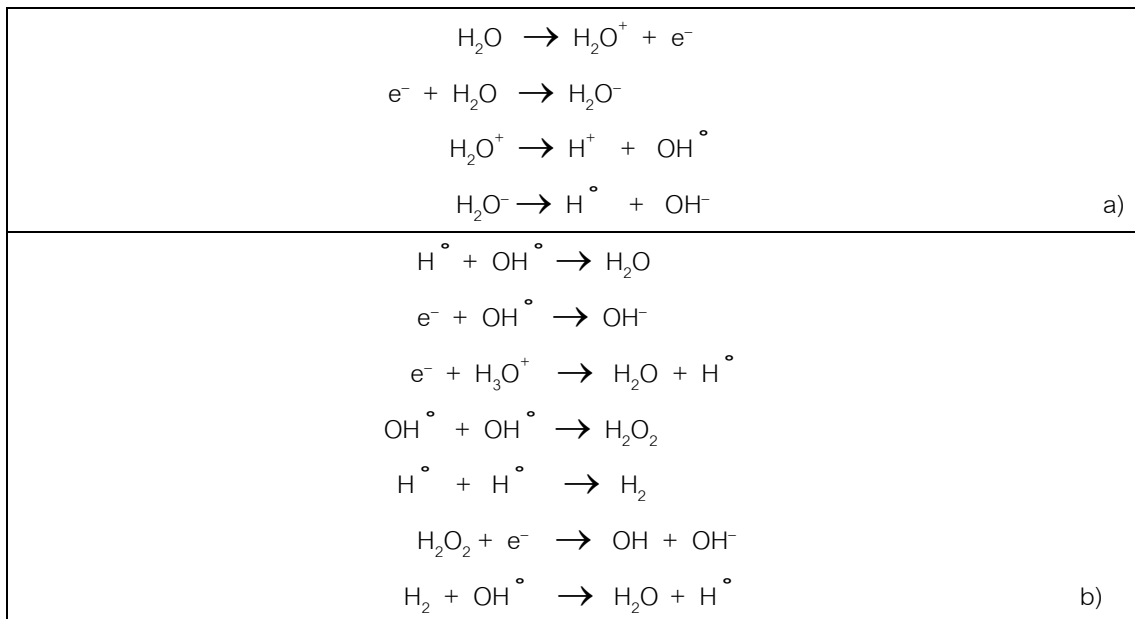
## การเปลี่ยนแปลงทางเคมี โภชนาการ และจุลินทรีย์ในอาหารฉายรังสี

### การเปลี่ยนแปลงทางเคมี

Rosenthal (1992) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารหรือวัตถุดิบฉายรังสีอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโดยตรง ซึ่งพลังงานจากรังสีจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมี โดยอาจทำให้โมเลกุลนั้นอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) หรือเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และการเปลี่ยนแปลงทางอ้อม ซึ่งเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำเนื่องมาจากรังสี (radiolytic products) ไปทำปฏิกิริยาต่อเนืองกับสารอื่นๆ ภายในอาหาร ซึ่งในอาหารส่วนใหญ่มีความชื้นสูง เมื่อได้รับรังสีไอออนไนส์จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้เนื่องจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุลและเกิดการแตกของพันธะและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะกลับมารวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจน (hydrogen) ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide,  $H_2O_2$ ) อนุมูลไฮโดรเจน (hydrogen radicals,  $H^\bullet$ ) อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical,  $OH^\bullet$ ) และอนุมูลไฮโดรเพอร์ ออกซิล (hydroperoxyl radicals,  $HO_2^\bullet$ ) การแตกตัวเป็นไอออนของน้ำแสดงดังภาพที่ 7.4(a) และการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระแสดงดังภาพที่ 7.4(b) จากภาพที่ 7.4 (a) เมื่อเกิด  $H_2O^+$  (water cation radical) จากการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาปลดปล่อยโปรตอนให้กับโมเลกุลของน้ำได้อีกดังสมการ



และจากปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ได้  $H_3O^+$  (solvated/hydrated proton, hydronium ion) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระต่อไป ซึ่งจะเห็นว่าผลของปฏิกิริยาในภาพ 4(b) จะเกิดสารที่เสถียรขึ้น 2 ชนิดคือ  $H_2O_2$  และ  $H_2$  แต่ก็ยังเกิดปฏิกิริยาต่อเนืองได้อีก ทำให้มีปริมาณของสารทั้งสองชนิดเกิดขึ้นต่ำแม้ว่าจะฉายรังสีในปริมาณสูง จึงทำให้สามารถใช้บ่อน้ำเป็นเกราะกำบังรังสีแกมมาได้ (สายสนม, 2540)



**ภาพที่ 7.4** a) การแตกตัวเป็นไอออนของน้ำ b) การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ

ที่มา : Fellows (2000)(a) และ สายสนม (2540)(b)

การฉายรังสีอาหารอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอาหารได้ ซึ่งโดยหลักการแล้วจะต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดและสามารถรักษาคุณภาพ รวมทั้งหลีกเลี่ยงการเกิดกลิ่นรสและรสชาติผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น รังสีจะทำปฏิกิริยากับวัตถุหรืออาหารที่นำมาฉายรังสีโดยการถ่ายทอดพลังงานไปยังอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนดังกล่าวอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) ถ้าพลังงานที่ถูกถ่ายทอดสูงมากพอ อิเล็กตรอนที่มีประจุลบจะสามารถออกมาจากโมเลกุลและกลายเป็นไอออนที่มีประจุบวก (positive ion) ได้ การฉายรังสีทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนในแต่ละครั้งเมื่อเกิดการกระตุ้น 2 ครั้ง แต่เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนจะเกิดขึ้นประมาณ 1,000 ครั้ง ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นได้ ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีต่อสิ่งมีชีวิตจึงอาจกล่าวได้ว่ามีสาเหตุล้วนมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุล (Moseley, 1989)

ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อชนิดและขนาดของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอาหารเนื่องจากรังสีได้แก่องค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนของอาหาร ซึ่งมีมากมายหลายชนิด การฉายรังสีทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชัน ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน องค์ประกอบของไขมัน และสารโปรออกซิแดนซ์ (pro-oxidants) นอกจากนี้รังสียังทำให้โมเลกุลโปรตีนบางส่วนเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ ความซับซ้อนของโมเลกุลของโปรตีนรวมทั้งองค์ประกอบอื่น ๆ ทำให้มีบริเวณที่สามารถทำปฏิกิริยากับรังสีและทำให้เกิดสารที่ไม่ต้องการขึ้นได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย

การฉายรังสีให้กับน้ำทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxy radicals, hydrated electrons) และสารชนิดอื่น ๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้เกิดอนุมูลโปรตีนอิสระ (protein free radicals) และจะทำปฏิกิริยาต่อเนื้อกับโมเลกุลอื่น ๆ ในอาหาร อนุมูลอิสระจะไม่เสถียรในอาหารยกเว้นในบางสภาวะ ในการฉายรังสีเนื้อสัตว์และเนื้อไก่นั้นพบว่า รังสีทำให้เกิดสารระเหยหลายชนิด แต่รังสีไม่มีผลต่อกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในเนื้อสัตว์ ในส่วนของเอนไซม์พบว่ารังสีสามารถยับยั้งปฏิกิริยาเอนไซม์ได้ในสภาวะที่เป็นสารละลายเจือจาง แต่เอนไซม์ในอาหารนั้นค่อนข้างทนต่อการฉายรังสี การยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ในอาหารจะต้องใช้ปริมาณรังสีประมาณ 5-10 เท่าของปริมาณที่ใช้ในการทำละลายจุลินทรีย์ (Frazier and Westhoff, 1988) ซึ่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ภายในเซลล์อาจดำเนินต่อหลังจากการทำลายจุลินทรีย์ถ้าไม่ทำการลวก (blanching) เพื่อทำลายเอนไซม์ในอาหารก่อนการฉายรังสี

การฉายรังสีน้ำตาลในสภาวะบริสุทธิ์ ทำให้เกิดการสลายตัว (degradation) อย่างเห็นได้ชัดเจน รวมทั้งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากแตกตัวจากรังสี การฉายรังสีแก่น้ำตาลที่อยู่ในสถานะของแข็งนั้นพบว่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ในน้ำตาลจะช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ผลของน้ำตาลดังกล่าวจะแตกต่างจากผลการฉายรังสีแก่น้ำตาลที่อยู่ในรูปของสารละลาย อย่างไรก็ตามเนื่องจากอาหารหลายชนิดที่มีปริมาณน้ำตาลสูงมักจะมีองค์ประกอบของน้ำในปริมาณสูง ดังนั้นน้ำตาลในอาหารเหล่านั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อผ่านการฉายรังสี

ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณอนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระ (carbohydrate free radicals) เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นถ้าอาหารมีปริมาณความชื้นต่ำ อนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของสตาร์ช เมื่อใช้รังสีปริมาณที่สูงขึ้นเป็นผลให้ความหนืดลดลงและความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชเพิ่มขึ้น รวมทั้งความเป็นกรดของสารละลายสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Subulase et al., 1991)

การฉายรังสีจะไม่มีผลต่อกรดไขมัน ยกเว้นกรดปาล์มิติก (palmitic acid) ในซากไก่ที่นำฉายรังสีแกมมาขนาดประมาณ 2.0 kGy ภายใต้สภาวะที่ใช้ทางการค้า ซึ่งพบว่ากรดนี้จะมีปริมาณลดลง และกรดโอเลอิก (oleic acid) จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น (Katta et al, 1991) การฉายรังสีมันฝรั่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความเข้มข้นของสารฟีนอลเพิ่มมากขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นของไขมันและฟอสโฟลิปิดลดลง (Mondy and Gosselin, 1989) และนอกจากรังสีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยตรงแล้ว อาจทำให้โครงสร้างของโปรตีนในระดับทุติยภูมิ (secondary) และตติยภูมิ (tertiary structure) เกิดการเปลี่ยนแปลงและอาจกระตุ้นให้เอนไซม์

ทำงาน เป็นผลให้ลักษณะทางสรีรวิทยาเปลี่ยนแปลงไปจนสังเกตได้ โดยเนื้อสัมผัสอาจอ่อนนุ่มลง มีความหนืดลดลงและค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) อาจเพิ่มขึ้น (Brynjolfsson, 1989)

### การเปลี่ยนแปลงทางคุณค่าโภชนาการ

มีรายงานการศึกษาผลของการฉายรังสีต่อการสลายตัวของวิตามินหลายชนิดในอาหาร แต่พบว่าการศึกษาน้อยมากเกี่ยวกับสารที่เกิดขึ้นหลังจากการฉายรังสีวิตามินเหล่านั้น โดยมีรายงานว่า วิตามินอีซึ่งเป็นวิตามินที่ละลายในไขมัน จะมีความทนต่อการฉายรังสีต่ำที่สุด และวิตามินบีหนึ่ง (B<sub>1</sub>) เป็นวิตามินที่ทนต่อการฉายรังสีต่ำที่สุดในบรรดาวิตามินที่ละลายน้ำทั้งหมด การเปลี่ยนแปลงของวิตามินจะแตกต่างกันเมื่อผ่านการให้ความร้อนและการฉายรังสี แต่วิตามินที่ทนต่อการฉายรังสีได้น้อย จะสลายตัวได้ง่ายจากแสง ออกซิเจนหรือความร้อน

คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีนอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยหลังจากผ่านการฉายรังสี แต่องค์ประกอบอื่น ๆ ที่มีปริมาณน้อยอาจทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว ไธอามีน (thiamine) วิตามินซี (ascorbic acid) รวมทั้งวิตามินเอและอี เป็นวิตามินที่สลายตัวได้ง่ายที่สุดจากการฉายรังสี Jenkins et al. (1989) รายงานผลของการใช้รังสีปริมาณต่ำต่อปริมาณ ไธอามีนในเนื้อสุกรอบที่บรรจุแบบสุญญากาศ โดยใช้ปริมาณรังสี 0.57 1.91 3.76 5.52 และ 7.25 kGy เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสี พบว่ามีปริมาณไธอามีนลดลง 7.7 23.5 38.1 49.8 และ 57.6% ตามลำดับ ในส่วนของอาหารที่เป็นแหล่งของวิตามินซี เช่น ผลไม้และผัก จะสูญเสียวิตามินซีเพียงประมาณ 0 - 20% หลังการฉายรังสี (Skala et al. 1987)

### การเปลี่ยนแปลงทางจุลินทรีย์

จากกรณีการเกิดโรคที่เกิดจากจุลินทรีย์ที่มีในอาหารมีเพิ่มมากขึ้นในประเทศต่างๆ ทั่วโลก ทำให้มีการศึกษาการฉายรังสีอาหารซึ่งสามารถทำลายเชื้อโรคเพิ่มมากขึ้น (Monk et al., 1995) โดยส่วนใหญ่จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุนั้นไม่ทนต่อการฉายรังสีหรืออาจทนได้ไม่เกินกว่า 10 kGy อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ที่ทนต่อการฉายรังสีปริมาณสูงจะลดปริมาณลง ซึ่งปริมาณจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่ อาจจะทนต่อปัจจัยอื่นๆ ได้น้อยลง เช่น ความร้อน การเปลี่ยนแปลงค่า pH ความเข้มข้นของเกลือและยาปฏิชีวนะ เป็นต้น ดังนั้นการถนอมรักษาอาหารโดยการฉายรังสีจะมี

ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นถ้าใช้วิธีการถนอมอาหารอื่น ๆ ร่วมด้วยในการทำลายหรือยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

การฉายรังสีมีผลในการทำลายเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งโดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่โครโมโซม (chromosome) ซึ่งมี DNA ที่มีลักษณะโมเลกุลวงแหวนประกอบด้วยคู่เบส (base pairs) หลายล้านคู่ จากการศึกษาพบว่ารังสีทำให้ DNA เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้จุลินทรีย์ถูกทำลาย อย่างไรก็ตามรังสียังมีผลต่อโมเลกุลอื่น ๆ ที่ไม่ทนต่อรังสี (เช่นในเมมเบรน) ซึ่งอาจเป็นผลให้จุลินทรีย์ถูกทำลายได้เช่นกัน ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจากการฉายรังสีขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในตัวจุลินทรีย์ ระยะการเจริญ ปริมาณของรังสี รวมทั้งความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง การทนต่อรังสีของจุลินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามสปีชีส์ (species) หรือสายพันธุ์ (strain) Adam และ Moss (1995) รายงานว่าแบคทีเรียชนิดแกรมลบ รวมทั้งพวกที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสีย พวกที่อยู่ในช่องทางเดินอาหารและแบคทีเรียที่ทำให้เกิดโรค จะทนต่อการฉายรังสีน้อยกว่าแบคทีเรียแกรมบวก การทนต่อการฉายรังสีสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้

แกรมลบ < แกรมบวก  $\approx$  เชื้อรา < สปอร์  $\approx$  ยีสต์ < ไวรัส

ในส่วนของสปอร์แบคทีเรียจะทนต่อรังสีมากกว่าเซลล์ปกติ (vegetative cells) ประมาณ 5 - 15 เท่า (Moseley, 1989) และโดยทั่วไปการทนต่อการฉายรังสีของเชื้อราจะใกล้เคียงกับเซลล์แบคทีเรียปกติ ส่วนยีสต์จะทนมากกว่าเชื้อราและแบคทีเรีย และไวรัสจะทนต่อการฉายรังสีมากที่สุดซึ่งรังสีปริมาณที่ใช้ทำลายแบคทีเรียจะไม่สามารถทำลายไวรัสได้ (Ingram and Roberts, 1980) ประสิทธิภาพของรังสีในการทำลายแบคทีเรียจะขึ้นกับชนิดและสปีชีส์ของแบคทีเรีย ปริมาณเริ่มต้นของเซลล์ (หรือของสปอร์) สภาพแวดล้อมของแบคทีเรีย เช่น ค่า pH อุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร ปริมาณของออกซิเจนและสภาวะทางกายภาพ (physical state) ของอาหารขณะฉายรังสี (Jay, 1986 ; Monk et al., 1995)

Monk และคณะ (1995) และ Radomyski และคณะ (1994) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคและจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารเมื่อผ่านการฉายรังสี และรายงานค่า D (D-Values) ของจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับอาหาร ซึ่งค่า D หมายถึงปริมาณของรังสีที่ใช้ในการทำลายจุลินทรีย์ให้ลดลงไป 90% (หรือลดลงไป 1 log cycle) สำหรับแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคส่วนใหญ่มีค่า D ต่ำกว่า 1 kGy และแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 10 kGy ค่า D ของจุลินทรีย์บางชนิด แสดงดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ค่า D ของจุลินทรีย์บางชนิดเมื่อผ่านการให้รังสี

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

ที่มา : Barbosa-Canovas et al. (1998)

แบคทีเรียแกรมลบที่เป็นสาเหตุให้เกิดการเสื่อมเสียในเนื้อสัตว์แช่เย็นจะไม่ทนต่อการฉายรังสีและโดยปกติแบคทีเรียแกรมบวกเช่น lactobacilli และ lactococci จะทนต่อรังสีแกมมามากกว่าแบคทีเรียแกรมลบ การทนต่อรังสีอาจเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่มีอยู่อาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่ำ ดังนั้นการใช้รังสีปริมาณต่ำอาจจะทำลายแบคทีเรียแกรมลบแต่จะไม่ทำลายแบคทีเรียแลคติกที่ใช้ในการผลิตไส้กรอกหมัก ทั้งนี้ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์จากอันตรายเนื่องมาจากจุลินทรีย์จะได้รับการยอมรับมากขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการฉายรังสี (Thayer et al., 1986)

Loaharanu (1995) รายงานว่าอาหารทะเลที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาจะสามารถนำมาบริโภคได้อย่างปลอดภัยจากเชื้อ *Vibrio* spp. โดยเฉพาะ *V. cholera* *V. parahaemolyticus* และ *V. vulnificus* ในส่วนของผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์และสัตว์ปีกซึ่งมีเชื้อ *Salmonella* เป็นแบคทีเรียแกรมลบและทนต่อการฉายรังสีมากที่สุดชนิดหนึ่งพบว่าปริมาณรังสีที่ใช้ในการทำลายเชื้อชนิดนี้ จะสามารถทำลายแบคทีเรียก่อโรคอื่น ๆ ชนิดแกรมลบได้ด้วย (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 กับซากไก่พบว่าสามารถชะลอการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้เป็นผลให้อายุการเก็บรักษาเพิ่มขึ้นและการฉายรังสียังช่วยลดปริมาณเริ่มต้นของเชื้อ *Yersinia* และ *Campylobacter* ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าผลิตภัณฑ์สัตว์ปีกที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีตลอดระยะเวลาการเก็บ 18 วันที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การใช้รังสีในการลดปริมาณหรือทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคพวกไซโครโทรป (psychrotrophic pathogens) ที่ปนเปื้อนในอาหารแช่เย็นหรือแม้แต่ที่ 0 องศาเซลเซียส เช่น *Yersinia enterocolitica* *Aeromonas hydrophila* และ *Listeria monocytogenes* โดยใช้ร่วมกับเทคนิคฮอร์ดเดิล (hurdles) อื่น ๆ สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเสื่อมเสียในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวได้ และมีผลเล็กน้อยต่อคุณภาพของอาหาร (Radomyski et al., 1994)

โดยทั่วไปแล้วแบคทีเรียจะทนต่อรังสีออกไนส์มากขึ้น ถ้าอยู่ในสภาวะแช่เยือกแข็ง (frozen state) หรือในสภาวะแห้ง (dehydrate) โดยสภาวะทั้งสองนั้นพบว่าผลทางอ้อมจากการแตกตัวของน้ำอันเนื่องมาจากรังสีจะลดลงอย่างมาก ถ้านำอาหารไปฉายรังสีที่อุณหภูมิต่ำมากเพื่อที่จะลดผลกระทบที่อาจทำให้เกิดลักษณะกลิ่นรสผิดปกติเนื่องจากการเกิดออกซิเดชันของไขมัน แต่จากจุดประสงค์ที่แท้จริงในการฉายรังสี ซึ่งกระทำเพื่อทำลายหรือยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่ปนเปื้อน ดังนั้นปริมาณรังสีที่ใช้จะต้องสูงมากพอที่จะทำลายจุลินทรีย์ดังกล่าว ซึ่งจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยก่อนเป็นอันดับแรก (Moseley, 1989)

ในส่วนเชื้อรา นั้น Monk และคณะ (1995) รายงานว่าการฉายรังสีจะช่วยลดปริมาณเชื้อราในอาหาร แต่มีรายงานที่ยังไม่สรุปชัดเจนเกี่ยวกับผลจากการฉายรังสีที่ทำให้เชื้อราบางส่วนถูกทำลายแต่ในเชื้อราที่รอดชีวิตนั้นสามารถผลิตสารพิษขึ้นได้ภายหลัง ซึ่งการฉายรังสีอาจไปกระตุ้นหรือไม่มีผล หรือมีผลในการลดปริมาณสารพิษลง และการทำลายเชื้อจุลินทรีย์คู่แข่งชนิดอื่นจะทำ

ให้เชื้อราสามารถผลิตสารพิษได้ในปริมาณมากกว่าในขณะที่มีเชื้ออื่นปะปนอยู่ในช่วงที่ยังไม่ฉายรังสี การรอดชีวิตของราหลังจากการฉายรังสีอาจทำให้เชื้อราเจริญได้รวดเร็วกว่าในอาหารที่มีเชื้อราคู่แข่งชนิดอื่นๆ อยู่ด้วย

จากกระบวนการฉายรังสีทำให้เกิดความวิตกกังวลว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจะก่อให้เกิดอันตรายหรือมีคุณสมบัติต้านหรือทนต่อการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคณะทำงานเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีระหว่างประเทศ มิได้มีเจตนาหรือมองข้ามปัญหาเหล่านี้และมีรายงานจากองค์การอนามัยโลก (WHO, 1994) โดย International Advisory Group รายงานว่าไม่พบหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แสดงให้เห็นว่าการฉายรังสีอาหารก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ซึ่งจะทำให้เพิ่มระดับความรุนแรงในการก่อให้เกิดโรคหรือมีความต้านทานต่อการฉายรังสีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังรายงานโดยอาศัยสมมุติฐานในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst – case assumption) ที่เกิดขึ้นในการฉายรังสีอาหารซึ่งได้แก่การก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีนั้น พบว่าสารดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยกว่าระดับปริมาณทั่วไปที่พบในอาหารตามธรรมชาติและการฉายรังสีทางการค้าจะไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีในอาหารขึ้นได้ ในปี ค.ศ. 1993 American Medical Association Council on Scientific Affairs ยืนยันว่าการฉายรังสีอาหารเป็นวิธีการที่ปลอดภัยและให้ผลดีในการเพิ่มความปลอดภัยของอาหารตามกฎหมายของประเทศ

การศึกษาเกี่ยวกับอาหารฉายรังสีในเรื่องของความปลอดภัยทั้งทางด้านจุลินทรีย์ คุณค่าทางโภชนาการ การกลายพันธุ์เนื่องจากผลของรังสีและความเป็นพิษของอาหารฉายรังสีพบว่ามีรายงานการศึกษามากมายและอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลที่ได้นั้นช่วยประกันความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีได้ในระดับหนึ่ง

### การประยุกต์ใช้รังสีทางการค้า

ในปัจจุบันทั่วโลกมีโรงงานผลิตอาหารฉายรังสีทางการค้าประมาณ 30 โรงงาน ทั้งที่เป็นโรงงานนำร่องและโรงงานที่ผลิตทางการค้าซึ่งอยู่ใน 35 ประเทศ (Barbosa-Canovas et al., 1998) และมีจำนวนของโรงงานฉายรังสีทางการค้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การฉายรังสีอาหารมีศักยภาพสูงในการทำลายแมลง ช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เสื่อมเสีย ชะลอการสุกและเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางสรีรวิทยาของพืชซึ่งทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่อประเทศที่กำลังพัฒนา (Loaharanu, 1995) การใช้รังสีปริมาณต่ำ 0.05 - 0.15 kGy มีผลในการยับยั้งการงอกของพืชหัวและพวกกล้าต้นใต้ดิน เช่น มันฝรั่ง หอมใหญ่และกระเทียม เป็นต้น โดยการยับยั้งการงอกของพืช

ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากรังสีได้เข้าทำลาย DNA ในเซลล์ที่อยู่ในระยะพักตัว บริเวณปลายยอดทำให้การแบ่งเซลล์หยุดชะงักลง

ปริมาณรังสี 0.15 - 0.50 kGy มีประสิทธิภาพในการทำลายแมลงในธัญพืชและผลิตภัณฑ์รวมทั้งผักผลไม้สดและผลิตภัณฑ์อบแห้ง แมลงจะตายถ้าได้รับรังสีค่อนข้างต่ำปริมาณ 0.01-1.00 kGy โดยรังสีไม่ก่อให้เกิดผลเสียในอาหารดังกล่าว นอกจากนั้น รังสียังใช้ในการยืดอายุการเก็บรักษาข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง พืชตระกูลถั่ว แป้งข้าวโพด กาแฟ โกโก้ ถั่วเหลือง รวมทั้งผลิตภัณฑ์ทำแห้งอื่นๆ เช่นปลาแห้ง ผลไม้ทำแห้ง ถั่วและยาสูบ เป็นต้น ซึ่งปริมาณรังสีที่จะใช้ในการทำลายแมลงขึ้นอยู่กับชนิดของแมลง การฉายรังสีไม่สามารถป้องกันการย้อนกลับเข้าทำลายของแมลง ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์จะต้องใช้วิธีการหรือภาชนะบรรจุที่เหมาะสมเพื่อป้องกันเหตุการณ์ดังกล่าว

การประยุกต์ใช้รังสีที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือการทำลายแมลงที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียในผลไม้สดในเขตร้อน เช่น มะละกอ มะม่วงและพืชตระกูลส้ม ซึ่งถูกทำลายโดยแมลงวันผลไม้ (fruit flies) และแมลงอื่น ๆ ซึ่งประเทศที่นำเข้าผลไม้เหล่านี้มีมาตรการที่เข้มงวดในการควบคุมไม่ให้แมลงเหล่านี้เล็ดลอดเข้าประเทศ การใช้สารเคมี ethylene dibromide (EDB) รณผลไม้เป็นวิธีการที่มักใช้เพื่อทำลายแมลงดังกล่าว แต่การใช้สารนี้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถก่อมะเร็งและยังตกค้างในผลไม้ จึงมีการห้ามใช้ในหลายประเทศ ในรัฐฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกามีการใช้รังสีปริมาณ 0.15 kGy เพื่อทำลายแมลงที่ทำให้มะละกอเสื่อมเสียได้ ปริมาณรังสี 0.5 - 1.00 kGy จะชะลอระยะบิรูรณ์ของผักและผลไม้สด เช่น กหลวย มะม่วง ส้ม มะละกอ และเห็ด การยืดอายุการเก็บรักษาสตอร์เบอร์หรือผลไม้อื่น ๆ รวมทั้งเนื้อปลาและเนื้อสัตว์ สามารถทำได้โดยการฉายรังสีขนาด 1.5 - 3.0 kGy ซึ่งเพียงพอต่อการทำลายจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ ได้แก่แบคทีเรียและเชื้อราที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสีย การฉายรังสีให้ผลไม้สดจะสามารถกระทำได้โดยใช้ปริมาณรังสีที่ต่ำกว่า 3 kGy เนื่องจากรังสีปริมาณที่สูงกว่าระดับนี้จะทำให้ผลไม้อ่อนนุ่มลงและสูญเสียคุณภาพ

การใช้รังสีถนอมรักษาอาหารแช่เยือกแข็งทำโดยใช้รังสีขนาด 2-3 kGy ร่วมกับการเก็บอาหารที่ 0-3°C จะสามารถยืดอายุการเก็บได้นานขึ้น การใช้รังสีแกมมาขนาด 2 kGy สามารถลดปริมาณจุลินทรีย์ในซากไก่ไปได้มากกว่า 90% โดยไม่มีผลต่อลักษณะทางประสาทสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ ในเครื่องเทศและเครื่องเทศผง ซึ่งปนเปื้อนจากสปอร์ของแบคทีเรียและเชื้อรา รังสีขนาด 10 kGy สามารถทำลายเชื้อและสปอร์เหล่านี้ได้โดยไม่มีผลเสียต่อคุณภาพ

การประยุกต์ใช้รังสีในการถนอมอาหารเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการต่าง ๆ เช่น ช่วยในการเพิ่มอัตราการฆ่าเชื้อของผักเพื่อใช้ในซूपผง เพิ่มผลผลิตของน้ำผลไม้ เช่น น้ำองุ่นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพในการทำไวน์ เพิ่มอัตราการฆ่าเชื้อผลไม้เช่นลูกพรุน ลดเวลาในการทำถั่วอบแห้ง เพิ่มขนาดของขนมปังที่ทำจากแป้งในสูตรที่เติมน้ำตาลเล็กน้อย ลดปริมาณของข้าวบาร์เลย์ที่ต้องใช้ในการผลิตเบียร์โดยเพิ่มผลผลิตของมอลต์ เป็นต้นและเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนทางด้านพลังงานที่ใช้ในการผลิตอาหารฉายรังสีกับวิธีการทำอาหารบรรจุกระป๋อง การแช่เย็นหรือแช่แข็งอาหารพบว่าการฉายรังสีใช้พลังงานไม่แตกต่างกัน (Loaharanu, 1995)

Boisseau (1994) รายงานว่าการประสบความสำเร็จของอุตสาหกรรมการผลิตอาหารฉายรังสีในประเทศฝรั่งเศสเป็นผลมาจากการถ่ายทอดข้อมูลทางเทคโนโลยีจากรัฐบาลและสถาบันการศึกษาไปสู่ผู้เกี่ยวข้องทางด้านอุตสาหกรรมอาหาร ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนที่สำคัญที่จะทำให้ตลาดของอาหารฉายรังสีประสบความสำเร็จ ได้แก่

1. การวิจัยจะต้องระบุสถานะในการประยุกต์ใช้รังสีในการถนอมอาหาร
2. กฎหมายจะต้องระบุสถานะที่เฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้รังสี
3. ผู้บริโภคจะต้องยอมรับอาหารฉายรังสี
4. กระบวนการฉายรังสีอาหารจะต้องมีประสิทธิภาพ

อาหารที่ฉายรังสีที่เป็นที่ยอมรับในประเทศฝรั่งเศสเช่น เนยแข็ง camembert และเนื้อไก่แยกกระดูก (mechanically deboned poultry meat)

ในส่วนของประเทศไทย มีการใช้รังสีในการทำลายปรสิต เช่น *Taenia* *Trichinella* และ *Entamoeba* ในแฮม รวมทั้งแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคบางชนิดเช่น *Salmonella* และ *Shigella* โดยพบว่าการใช้รังสีปริมาณต่ำ 2 kGy จะไม่ทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของแฮมเปลี่ยนแปลงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคถึงแม้ว่าแฮมฉายรังสีจะมีราคาจำหน่ายแพงกว่าแฮมที่ไม่ผ่านการฉายรังสีก็ตาม (Loaharanu, 1994a)

### การยอมรับของผู้บริโภคในอาหารฉายรังสี

Barbosa-Canovas et al. (1998) รายงานว่าสิ่งสำคัญที่สุดของการยอมรับในอาหารฉายรังสีและที่เป็นที่ถกเถียงกันมากที่สุดคือเรื่องของความปลอดภัย ผลของอาหารฉายรังสีที่มีต่อสุขภาพของผู้บริโภค สิทธิของผู้บริโภคที่ต้องทราบเกี่ยวกับอาหารฉายรังสี ผลเสียที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการ

บริโภคอาหารฉายรังสี รวมทั้งการขาดแคลนวิธีการในการตรวจสอบอาหารที่ฉายรังสีแล้ว ในระยะแรกหลายประเทศได้มีกฎเกณฑ์ออกมาเพื่อบังคับใช้และป้องกันอันตรายของอาหารฉายรังสีที่อาจเกิดขึ้น แต่เมื่อประชาชนได้รับทราบโดยการเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับการฉายรังสีอาหารทำให้มีการยอมรับกันมากขึ้น จนในปัจจุบันการฉายรังสีอาหารมีเรื่องของการเมืองและเรื่องของจิตวิทยาเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังมีการตระหนักถึงความเสี่ยงของพนักงานที่เกี่ยวข้องกับการฉายรังสีอาหาร รวมทั้งผลของการใช้รังสีต่อสิ่งแวดล้อม

### ความแตกต่างของอาหารที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีและอาหารฉายรังสี

Brynjofsson (1989) รายงานว่าการเปลี่ยนแปลงของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีเกิดขึ้นน้อยมาก และอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการแปรรูปอาหารแบบอื่นๆ และในปัจจุบันพบว่ายังไม่มีวิธีตรวจสอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าอาหารนั้น ๆ ผ่านการฉายรังสีมาแล้ว โดยมีรายงานการศึกษาเกี่ยวกับอาหารที่ผ่านการฉายรังสีทั้งทางด้านเคมี กายภาพและชีวภาพ เช่น จากการที่รังสีมีผลทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ คุณสมบัติทางจุลินทรีย์ กายภาพ (เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้า ความต้านทาน ความหนืด และความสามารถในการรวมตัวกับน้ำ) องค์ประกอบทางเคมี (คาร์โบไฮเดรต ไขมัน โปรตีน กรดนิวคลีอิกและวิตามิน) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ไม่ได้มีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้มีการศึกษาพบว่าสารที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุที่ใช้ห่อหุ้มอาหาร อาจใช้ในการชี้วัดว่าอาหารนั้น ๆ ผ่านการฉายรังสีมาแล้ว ส่วนวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสีวิธีอื่น ๆ เช่นการใช้ electron spin resonance (ESR) การวัดความหนืด วิธี thermoluminescence วิธี lyoluminescence การวัดความสามารถในการนำไฟฟ้า การวิเคราะห์องค์ประกอบของสารระเหยง่าย การวิเคราะห์จุลินทรีย์และองค์ประกอบของโมเลกุล DNA เป็นต้น

### กฎหมายเกี่ยวกับการฉายรังสีอาหาร

The Joint Expert Committee และ Codex Alimentarius ได้ออกมาตรฐาน "The Codex General Standard for Irradiated Foods" ในปี ค.ศ. 1983 ซึ่งใช้กันในหลายประเทศ ขณะเดียวกันบางประเทศใช้ตามคำแนะนำขององค์การอนามัยโลก โดยใช้ปริมาณรังสีในการถนอมรักษาอาหารสูงสุดไม่เกิน 10 kGy และใช้เครื่องวัดปริมาณของรังสีที่เรียกว่า Dosimeter และในบางประเทศจะต้องระบุบนฉลากอาหารด้วยคำว่า "ฉายรังสีหรือถนอมรักษาโดยการฉายรังสี" (irradiated, treated with radiation, radura, protected by ionization หรือ treated by

irradiation) และมีเครื่องหมาย radura ดังภาพที่ 7.5 โดยต้องระบุทั้ง 2 อย่างหรืออย่างใดอย่างหนึ่งโดยแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ



ภาพที่ 7.5 เครื่องหมาย radura บนผลิตภัณฑ์อาหารฉายรังสี  
ที่มา : Barbosa-Canovas et al. (1998)

## เอกสารอ้างอิง

- สายสนม ประดิษฐดวง. 2540. การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและการฉายรังสีอาหาร. ใน “วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร”. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กทม. น. 173 – 195.
- สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ. 2542. เจาะลึกเรื่องของปรมาณู. โรงพิมพ์คุรุสภา กทม. 45 น.
- Adams, M. R. and M. O. Moss. 1995. Food Microbiology. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Aziz, N. H. and L. A. A. Moussa. 2002. Influence of gamma radiation on mycotoxin producing moulds and mycotoxins in fruits. Food Control 13 : 281 – 288.
- Barbosa-Canovas, G. V. , U. R. Pothakamury, E. Palou and B. G. Swanson. 1998. Nonthermal Preservation of Foods. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Boisseau, P. 1994. Irradiation and the food industry in France. Food Technol. 48(5) : 138 – 140.
- Breitfellner, F., S. Solar and G. Sontag. 2003. Radiation induced chemical changes of phenolic compounds in strawberries. Radiation Phys. & Chem. 67 : 497 – 499.
- Brynjolfsson, A. 1989. Future radiation sources and identification of irradiated foods. Food Technol. 43(7) : 84 -89.
- Byun, M.-W., J.-W. Lee, H.-S. Yook, C. Jo and H.- Y. Kim. 2002. Application of gamma irradiation for inhibition of food allergy. Radiation Phys. & Chem. 63 : 369 – 370.
- Delincee, H. 1998. Detection of food treated with ionizing radiation. Trends Food Sci. & Technol. 63 : 73 – 82.
- Delincee, H. 2002. Analytical methods to identify irradiated foods – a review. Radiation Phys. & Chem. 63 : 455 – 458.
- Diehl, J. F. 2002. Food irradiation – past, present and future. Radiation Phys. & Chem. 63 : 211 – 215.
- Farkas, J. 1998. Irradiation as a method for decontamination food , a review. Int. J. Food Microbiol. 44 : 189 – 204.
- Fellows, P. 2000. Irradiation. pp. 196 – 209. In “ Food Processing Technology”. 2<sup>nd</sup> ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

- Frazier, W. C. and D. C. Westhoff. 1988. Food Microbiology. 4<sup>th</sup> ed. McGraw – Hill Book, Co. New York.
- Giroux, M. and M. Lacroix. 1998. Nutritional adequacy of irradiated meat – a review. Food Res. Int. 31 (4) : 257 – 264.
- Hackwood, S. 1991. An introduction to the irradiation processing of foods. pp. 1- 18. *In* “ Food Irradiation”. S. Thorne (ed.). Elsevier Science Publishers, Ltd. Essex.
- IAEA. 1999. Facts about food irradiation. International Consultative Group on Food Irradiation. <http://www.iaea.org/icgfi> retrieved on May 14, 2005.
- Ingram, M. and T. A. Roberts. 1980. Ionizing Radiation. pp. 46 – 69. *In* “ Microbial Ecology of Foods”. ICMSF (ed.). Academic Press, Inc. New York.
- Jay, J. M. 1986. Modern Food Microbiology. 3<sup>rd</sup> ed. Van Nostrand Reinheld Co., New York.
- Jenkins, R. K., D. W. Thayer and T. J. Hansen. 1989. Effect of low dose irradiation and post irradiation cooking and storage on the thiamine content of fresh pork. J. Food Sci. 54(6) : 1461 – 1465.
- Jones, J. M. 1992. Food Irradiation. pp. 301 – 330. *In* “ Food Safety”. 2<sup>nd</sup> ed. Eagan Press, Minnesota.
- Kader, A. A. 1986. Potential applications of ionizing radiation in postharvest handling of fresh fruits and vegetables. Food Technol. 40 (6) : 117 – 121.
- Katta, S. R., D. R. Rao, G. R. Sunki, and C. B. Chawan. 1991. Effect of gamma irradiation on whole chicken carcasses on bacterial loads and fatty acids. J. Food Sci. 56(2) : 371-372.
- Kilcast, D. 1995. Food irradiation : current problems and future potential. Int. Biodet. & Biodeg. 279 – 296.
- Lamuka, P. O., G. R. Sunki, C. B. Chawan, D. R. Rao and L. A. Shackelford. 1992. Bacteriological quality of freshly processed broiler chickens as affected by carcass pretreatment and gamma irradiation. J. Food Sci. 57(2) : 330 – 332.
- Loaharanu, P. 1994a. Cost/benefit aspects of food irradiation. Food Technol. 48 (1) : 104 – 108.
- Loaharanu, P. 1994b. Status and prospects of food irradiation. Food Technol. 48 (5) : 124 – 131.

- Loaharanu, P. 1995. Food Irradiation : current status and future prospects. pp. 90-111. *In* "New Methods of Food Proeservation". G. W. Gould (ed.). Blackie Academic & Professional, Glasgow, U.K.
- Martin, A. and S. A. Harbison. 1979. An introduction to radiation protection. 2<sup>nd</sup> ed. Chapman & Hall Ltd., London.
- Molins, R. A., Y. Motarjemi and F. K. Kaferstein. 2001. Irradiation : a critical control point in ensuring the microbiological safety of raw foods. *Food Control*. 12 : 347 – 356.
- Mondy, N. I. and B. Gosselin. 1989. Effects of irradiation on discoloration, phenols and lipids of potatoes. *J. Food Sci.* 54(4) : 982 – 984.
- Monk, J. D. , L. R. Beuchat and M. P. Doyle. 1995. Irradiation inactivation of foodborne microorganisms. *J. Food Prot.* 58 (2) : 197-208.
- Morehouse, K. M. 2002. Food irradiation – US regulatory considerations. *Radiation Phys. & Chem.* 63 : 281 – 284.
- Moseley, B. E. B. 1989. Ionizing Radiation : Action and Repair. pp. 43-70. *In* "Mechanisms of Action of Foods Preservation Procedures". G. M. Gould (ed.). Elsevier Science Publishers, Ltd. , Essex.
- Radomyski, T., E. A. Murano, D. G. Olson and P. S. Murano. 1994. Elimination of pathogens of significance in food by low dose irradiation : a review. *J. Food Prot.* 57(1) : 73 – 86.
- Rosenthal, I. 1992. Electromagnetic radiations in Food Science. Springer Verlag, Berlin.
- Satin, M. 1993. Food Irradiation. A Guidebook. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania.
- Siddhuraju, P., H. P. S. Makkar and K. Becker. 2002. The effect of ionising radiation on antinutritional factors and the nutritional value of plant materials with reference to human and animal food. *Food Chem.* 78 : 187 – 205.
- Skala, J. H., E. L. McGown and P. P. Waring. 1987. Wholesomeness of irradiated Foods. *J. Food Prot.* 50(2) : 150 – 160.
- Subularse, V. C., J. A. Liuzzo, R. M. Rao and R. M. Grodner. 1991. Cooking quality of brown rice as influenced by gamma irradiation. *J. Food Sci.* 56(1) : 96-98, 108.

- Thakur, B. R. and R. K. Singh. 1995. Combination process in food irradiation. *Trend in Food Sci. & Technol.* 6 : 7 – 11.
- Thayer, D. W., R. V. Lachica, C. N. Huhtanen and E. Wierbicki. 1986. Use of irradiation to ensure the microbiological safety of processed meats. *Food Technol.* 40(4) : 159.
- Tritsch, G. L. 2000. Food irradiation. *Nutrition* 16 : 698 – 718.
- Urban, W. M. 1989. Food Irradiation, the past fifty years as prologue to tomorrow. *Food Technol.* 43(7) : 76,92.
- Welle, F. , A. Mauer and R. Franz. 2002. Migration and sensory changes of packaging materials caused by ionizing radiation. *Radiation Phys. & Chem.* 63 : 841 – 844.
- WHO. 1994. Safety and Nutritional Adequacy of Irradiated Food. World Health Organization.