



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

รังสีประยุกต์และไอโซโทป

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การตรวจสอบเส้นหมึ้นายรังสี ด้วยเทคนิคอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

Detection of Irradiated Rice Noodles by Electron Spin Resonance (ESR)

นามผู้วิจัย นายสทการ มณฑลวัฒนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สูดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การตรวจสอบเส้นหมี่ฉายรังสี ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

Detection of Irradiated Rice Noodles by Electron Spin Resonance (ESR)

โดย

นายสหการ มณฑลวัฒนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สหการ มณฑลพัฒนา 2553: การตรวจสอบเส้นหมีฉายรังสี ด้วยเทคนิค
อิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ปริญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และ
ไอโซโทป) สาขารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุคประเสริฐ, Ph.D.
85 หน้า

อิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สเปกโตรสโคปี (ESR) เป็นวิธีทางกายภาพที่สามารถใช้ในการ
ตรวจพิสูจน์การฉายรังสีในอาหารหลายประเภท โดยอาศัยการตรวจวัดอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นภายใน
ตัวอย่าง ภายหลังจากการฉายรังสี งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิค ESR มาประยุกต์ใช้ในการตรวจพิสูจน์
เส้นหมีที่ผ่านการฉายรังสี ปริมาณ 0.5 ถึง 3 กิโลเกรย์ ด้วยเครื่อง ESR model Bruker EMX และ
ศึกษาผลอุณหภูมิที่เก็บรักษาระหว่างอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส ที่มีต่อการ
ลดลงของ ESR signal intensity ของตัวอย่างที่เก็บไว้เป็นเวลานาน 24 สัปดาห์ หลังการฉายรังสี ผล
การศึกษาพบว่า สภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR ประกอบด้วย
microwave frequency 9.826 GHz, microwave power 1.0 mW, center field 3510 G, sweep width
100 G, modulation frequency 100 kHz, modulation amplitude 10 G, receiver gain 2×10^3 G, time
constant 163.84 ms และ sweep time 51.2 s ซึ่งตัวอย่างเส้นหมีฉายรังสีให้ ESR spectra มีลักษณะ
เป็นพีคคู่มีตำแหน่งกึ่งกลางที่ $g = 2.0001$ ส่วนตัวอย่างเส้นหมีที่ไม่ได้ฉายรังสีให้ ESR signal
intensity ต่ำมาก ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืนในช่วง 0 ถึง 3
กิโลเกรย์ เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ตามสมการ $y = 10^6x + 4,290$ เมื่อ x คือ ปริมาณรังสีดูดกลืน
(กิโลเกรย์) และ y คือ ESR signal intensity (a.u.) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ
0.9981 อุณหภูมิ และเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่างภายหลังจากการฉายรังสี มีผลต่อการลดลงของ ESR
signal intensity โดยตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24
สัปดาห์ มีการลดลงของ ESR signal intensity ประมาณร้อยละ 50 และ 90 ตามลำดับ นอกจากนี้
อุณหภูมิ และเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่าง ยังมีผลให้ ESR spectra มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
อย่างไรก็ตามผลการศึกษาการลดลงของ ESR signal intensity ตามระยะเวลาการเก็บรักษาตัวอย่าง
แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้เทคนิค ESR ในการตรวจพิสูจน์การฉายรังสีในเส้นหมีได้ แม้เก็บ
ตัวอย่างไว้นาน 24 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้องภายหลังจากการฉายรังสี

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sahakan Monthonwattana 2010: Detection of Irradiated Rice Noodles by Electron Spin Resonance (ESR). Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Assistant Professor Wanwisa Sudprasert, Ph.D. 85 pages.

Electron spin resonance (ESR) spectroscopy is one of the physical methods for identification of irradiation on the wide variety of foods. This technique is based on the detection of free radicals induced in food composition by irradiation. In this study, ESR was applied to identify the irradiated rice noodle. Detailed ESR investigation on irradiated noodle was carried out in the dose range of 0.5 - 3 kGy using Bruker EMX spectrometer. The stability of that radiation-induced ESR signal intensity at cold (-18°C) and room (25°C) temperatures was studied over a storage period of 24 weeks. It was shown that operating conditions of the ESR spectrometer were as follows : microwave frequency 9.826 GHz, microwave power 1.0 mW, center field 3510 G, sweep width 100 G, modulation frequency 100 kHz, modulation amplitude 10 G, receiver gain 2×10^3 G, time constant 163.84 ms and sweep time 51.2 s. Irradiated rice noodle samples exhibited a strong, symmetric doublet ESR signal centered at $g = 2.0001$ whereas unirradiated noodle exhibited a very weak signal. A linear relationship between the ESR signal intensity and the absorbed dose was obtained for doses up to 3 kGy. The dose-response equation was $y = 10^6 x + 4290$, where x and y were absorbed dose (kGy) and ESR signal intensity (a.u.), respectively, and the correlation coefficient (R^2) was 0.9981. Storage temperature and time strongly influenced on the fading of ESR signal intensity. Keeping the samples at -18°C and 25°C for 24 weeks caused decreases of 50 % and 90 % in ESR signal intensities, respectively. Furthermore, the shape of the ESR spectra was influenced by storage temperature and time. However, long-term decay data at room temperature indicate that ESR technique can be used to identify irradiated rice noodles during 24 weeks of room temperature storage after the irradiation process.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.วันวิสา สุกประเสริฐ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในเรื่องการเรียน การค้นคว้าวิจัย การวางแผนงาน ตลอดจนการตรวจวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทปทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและคอยแนะนำสิ่งต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณอารักษ์ วิทิตธีรานนท์ นักฟิสิกส์รังสี ชำนาญการพิเศษของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่คอยดูแล ให้คำแนะนำ และคอยให้ความช่วยเหลือ ในขณะที่ใช้งานเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ และฉายรังสี เพื่อทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณสุมาลี นิลพฤกษ์ และคุณหริเนตร มุ่งพยาบาล นักนิวเคลียร์เคมี ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการฉายรังสี และการใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ เพื่อทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่มอบเงินทุนสนับสนุนการดำเนินงานกิจกรรม ภายใต้โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พ.ศ. 2552 งานวิจัยนี้สำเร็จ

ขอขอบคุณ บิดามารดา ที่คอยเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน ให้คำแนะนำ ในเรื่องต่างๆ และเป็นกำลังใจให้เสมอ

สหการ มณฑลวัฒนา

ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	33
ผลและวิจารณ์	39
ผล	39
วิจารณ์	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	54
สรุป	54
ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของ Radiochromic film dosimeter FWT-60	62
ภาคผนวก ข ESR signal intensity ที่ Microwave power อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างๆ	64
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ	6
2	ประเทศต่างๆ ที่มีการรับรองการบริโภคอาหารฉายรังสี	8
3	มาตรฐานการตรวจสอบอาหารฉายรังสีของ CEN	15
4	การเปรียบเทียบระหว่าง protocol ใหม่ และ CEN protocol สำหรับการตรวจสอบอาหารฉายรังสี	30
5	ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างกัน ภายหลังจากการฉายรังสี	48
6	การลดลงของ ESR signal intensity ตามระยะเวลา และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี	49
ตารางผนวกที่		
ก1	การเปรียบเทียบปริมาณรังสีดูดกลืนที่ต้องการฉายตัวอย่างเส้นไหม กับปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตรวจวัดได้จาก Radiochromic film dosimeter FWT-60	63
ข1	ค่า ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสี 3 kGy เมื่อเพิ่มค่า Microwave power จาก 0.4 – 20 mW	65
ข2	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ	66
ข3	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์	67
ข4	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข5	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 2 สัปดาห์	69
ข6	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 2 สัปดาห์	70
ข7	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 3 สัปดาห์	71
ข8	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 3 สัปดาห์	72
ข9	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 1 เดือน	73
ข10	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 1 เดือน	74
ข11	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 2 เดือน	75
ข12	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 2 เดือน	76

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข13	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็นเวลา 3 เดือน	77
ข14	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 3 เดือน	78
ข15	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็นเวลา 4 เดือน	79
ข16	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 4 เดือน	80
ข17	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็นเวลา 5 เดือน	81
ข18	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 5 เดือน	82
ข19	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็นเวลา 6 เดือน	83
ข20	ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 6 เดือน	84

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องหมายอาหารฉายรังสี	12
2	ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ในสนามแม่เหล็กภายนอก	16
3	ส่วนประกอบของเครื่องอีเอสอาร์ สเปกโตรมิเตอร์	18
4	Peak-to-peak amplitude (A) ของอีเอสอาร์สเปกตรัม	18
5	โครงสร้างโมเลกุลของ Carbohydrate radical I และ II และการเปลี่ยนแปลงจากอนุมูลอิสระ I ไปเป็นอนุมูลอิสระ II	20
6	ESR spectra ของตัวอย่างข้าวเจ้าฉายรังสีที่ 3 kGy	21
7	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น	21
8	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับเวลาที่ใช้เก็บรักษา	22
9	ESR spectra ของตัวอย่างแป้งสาลีที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี (ข้าว) และที่ผ่านการฉายรังสี (ข้าว)	22
10	ESR spectra ของตัวอย่างแป้งสาลีที่ผ่านการฉายรังสีก่อน (ข้าว) และหลังได้รับความร้อน (ข้าว)	23
11	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ ESR signal intensity กับระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี (ฉายรังสีที่ 2 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง)	24
12	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ ESR signal intensity กับระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี (ฉายรังสีที่ 2 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส)	24
13	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น	25
14	ส่วนต่างๆ ของปุ๋ยที่ใช้ในการตรวจสอบการฉายรังสี	26
15	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืนในกระดอง และเปลือกจากส่วนต่างๆ ของปูฉายรังสี	27
16	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่ใช้ในถั่วเหลืองทั้ง 7 สายพันธุ์	28
17	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับเวลาที่ใช้เก็บรักษาถั่วเหลืองหลังจากฉายรังสี	28

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	การเพิ่มขึ้นของ ESR signal intensity จาก parsley (a), perilla (b) และ long green onion (c) ก่อนและหลังฉายรังสี	29
19	Radiochromic film dosimeter FWT-60	31
20	เครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX	32
21	ESR tube	32
22	ตัวอย่างเส้นหมึบคละเย็บบรรจุถุงซิปลาสติกสำหรับนำไปฉายรังสี	33
23	(ก) เครื่องฉายรังสีแกมมา (ข) การติด Radiochromic film dosimeter (ค) ตำแหน่งการวางตัวอย่างในเครื่องฉายรังสีแกมมา	34
24	การบรรจุ ESR tube ใน cavity ของเครื่อง ESR	35
25	สีของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการฉายรังสี	39
26	ESR spectra ที่มีตำแหน่ง และความสูงที่เหมาะสม	40
27	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับ รากที่สองของ Microwave power ของตัวอย่างเส้นหมึบฉายรังสี ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 3 กิโลเกรย์	41
28	ESR spectra ของตัวอย่างภายหลังจากการปรับ Modulation amplitude	42
29	ESR spectra ของตัวอย่างเส้นหมึบที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี	43
30	ESR spectra ของตัวอย่างเส้นหมึบที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 0.5 - 3 กิโลเกรย์	44
31	ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับ ปริมาณรังสีดูดกลืนต่างๆ ที่ใช้ฉายตัวอย่างเส้นหมึบ หรือ Dose - response curve	45
32	การเปลี่ยนแปลงของ ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นหมึบที่ผ่านการฉายรังสีที่ 0.5 - 3 kGy ที่เก็บที่อุณหภูมิ (ก) - 18 องศาเซลเซียส และ (ข) 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 - 24 สัปดาห์	46
33	ลักษณะ ESR spectra ของตัวอย่างเส้นหมึบที่ผ่านการฉายรังสี 3 กิโลเกรย์ เก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 2 สัปดาห์	47

การตรวจสอบเส้นหมี่ฉายรังสี ด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

Detection of Irradiated Rice Noodles by Electron Spin Resonance (ESR)

คำนำ

การฉายรังสีอาหาร เป็นวิธีการถนอมอาหารวิธีหนึ่ง โดยการใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของรังสีแกมมา (ionizing radiation) ฉายไปยังอาหารที่อยู่ในภาชนะบรรจุหรือไม่ผ่านการบรรจุ ในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ข้อดีของการใช้รังสีในการถนอมอาหารซึ่งแตกต่างจากวิธีการถนอมอาหารวิธีอื่นๆ คือ ยังคงทำให้อาหารหรือผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรสดเหมือนเดิม หรือหากมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นก็ไม่มากนัก เนื่องจากการฉายรังสีไม่ได้ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นพอที่จะทำให้อาหารเปลี่ยนสภาพไปได้ (Delincee, 1998)

ในปัจจุบัน อาหารฉายรังสีได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศทั่วโลก โดยในแต่ละปีได้มีการนำผลผลิตทางการเกษตร หรือเครื่องเทศต่างๆ ที่ใช้ในการประกอบอาหารมาทำการฉายรังสีนับแสนตัน แต่บางประเทศก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการยอมรับอาหารฉายรังสี เช่น เบลเยียม ฝรั่งเศส อิตาลี เนเธอร์แลนด์ และอังกฤษ ทำให้มีการพัฒนาวิธีการตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ซึ่งจะเป็ประโยชน์ต่อการค้าระหว่างประเทศ เพราะในภาคอุตสาหกรรม มีการนำผลผลิตทางการเกษตรที่ผ่านการฉายรังสีมาใช้ในกระบวนการผลิต หรือแปรรูปเพื่อการส่งออก โดยไม่ทราบว่ผลผลิตทางการเกษตรเหล่านั้นผ่านการฉายรังสี จึงไม่ได้มีการติดฉลากกำกับ เมื่อถูกตรวจพบว่าผ่านการฉายรังสี ก็อาจทำให้สินค้าเหล่านั้นถูกส่งกลับคืน ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ผู้ผลิตอย่างมาก ซึ่งหากเราสามารถตรวจสอบได้ว่า วัตถุดิบที่เป็นผลผลิตทางการเกษตรที่นำมาใช้ผ่านการฉายรังสีหรือไม่ ก็จะสามารถแก้ปัญหาส่วนนี้ได้ (Delincee, 1998) การตรวจสอบอาหารที่ผ่านการฉายรังสี นอกเหนือจากประโยชน์ทางด้านการค้าระหว่างประเทศแล้ว ยังช่วยเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้บริโภคด้วย

วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีที่ European Committee for Standardization (CEN) ยอมรับ ประกอบด้วยวิธีทางกายภาพ และชีวภาพ วิธีทางกายภาพที่นิยม ได้แก่ Photo-stimulated luminescence และ Thermoluminescence โดยอาศัยการตรวจวัดพลังงานที่ถูกจับไว้ในสารประกอบอินทรีย์ภายในตัวอย่าง ด้วยการกระตุ้นด้วยแสงหรือความร้อน เพื่อให้มีการ

ปลดปล่อยพลังงานที่กักเก็บไว้ออกมาในรูปของการเรืองแสง (Khan and Bhatti, 1999; Engin, 2004, 2007) นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือ Electron Spin Resonance (ESR) spectroscopy ซึ่งถือว่าเป็นเทคนิคการตรวจวัดที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจสอบอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการฉายรังสี (Maghraby, 2007; Bayram and Delincee, 2004; Yordanov and Gancheva, 2000)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการตรวจสอบเส้นหมึ้นฉายรังสีด้วยเทคนิค ESR โดยทำการศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR สำหรับการตรวจวัดอนุมูลอิสระในตัวอย่างเส้นหมึ้นฉายรังสี สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน หรือ Dose - response curve และศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่เก็บรักษาหลังจากการฉายรังสีที่มีต่อ ESR signal intensity เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคนี้ ในการตรวจสอบเส้นหมึ้นฉายรังสี

วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค ESR ในการตรวจสอบการฉายรังสี ในตัวอย่างเส้นไหม โดยมีวัตถุประสงค์เชิงกิจกรรม ดังนี้

1. เพื่อศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR สำหรับการตรวจวัดอนุมูลอิสระในตัวอย่างเส้นไหมฉายรังสี
2. เพื่อเปรียบเทียบ ESR spectra ระหว่างตัวอย่างเส้นไหมที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และที่ผ่านการฉายรังสี
3. เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน หรือ Dose - response curve ของตัวอย่างเส้นไหมฉายรังสี
4. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่เก็บรักษาหลังจากการฉายรังสีที่มีต่อ ESR signal intensity

การตรวจเอกสาร

อาหารฉายรังสี

อาหารฉายรังสี (irradiated food) หมายถึง อาหารที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสี (radioactive substance) หรือมีรังสีตกค้าง การฉายรังสีอาหาร มีวัตถุประสงค์เพื่อทำลายเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ทำให้อาหารสามารถเก็บรักษาได้นานขึ้น เพื่อประโยชน์ในการขนส่งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง หรือเพื่อเพิ่มคุณภาพของอาหาร โดยการนำอาหารที่บรรจุในหีบห่อที่เหมาะสม ไปผ่านการฉายรังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ หรือ อิเล็กตรอนในปริมาณที่เหมาะสม หรือเพียงพอที่จะสามารถทำลายเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ได้

ความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี

การฉายรังสีอาหารเป็นหัวข้อที่มีการถกเถียงกันมาก โดยเฉพาะในเรื่องของความปลอดภัย กระบวนการฉายรังสีอาหารจัดเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้ความร้อน หรือที่เรียกว่า cold process (Jones, 1992) ซึ่งมีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องมานานแล้ว

ในปี พ.ศ. 2523 องค์การอนามัยโลก (World Health Organization, WHO) องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (United Nations Food and Agriculture Organization, FAO) และทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) ได้สรุปผลการทดสอบความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีว่า “อาหารใดๆ ก็ตามที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณเฉลี่ยไม่เกิน 10 กิโลเกรย์ ไม่ก่อให้เกิดโทษ และอันตราย ไม่ก่อให้เกิดปัญหาพิเศษทางโภชนาการ และจุลชีววิทยา และไม่จำเป็นต้องทดสอบความปลอดภัยอีกต่อไป” (WHO, 1981) จากข้อสรุปดังกล่าว โครงการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศของ FAO/WHO หรือโคเด็กซ์ (Codex) ก็ได้ประกาศรับรองมาตรฐานอาหารฉายรังสี และวิธีปฏิบัติในการฉายรังสีอาหาร สำหรับประเทศไทย ได้มีการปรับปรุงกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับอาหารฉายรังสีให้สอดคล้องกับมาตรฐานอาหารฉายรังสีของโคเด็กซ์ เพื่อสร้างความมั่นใจกับผู้บริโภคมากขึ้น โดยออกประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 103 เรื่อง “กำหนดวิธีการผลิตอาหารซึ่งมีการใช้กรรมวิธีการฉายรังสี” ซึ่งมีข้อความสำคัญตอนหนึ่งว่า “การฉายรังสีอาหารจะต้องดำเนินการในโรงงาน และใช้เครื่องมือที่ได้รับอนุญาตแล้ว ผู้ฉายรังสีอาหารจะต้องควบคุมให้อาหารฉายรังสี ได้รับรังสีเพียงพอตาม

วัตถุประสงค์ และปริมาณรังสีเฉลี่ยที่อาหารได้รับต้องไม่สูงกว่า 10 กิโลเกรย์ อาหารที่ผ่านการฉายรังสีแล้ว ต้องมีฉลากบอกวัตถุประสงค์ในการฉายรังสี ชื่อ และที่ตั้งของผู้ผลิต ผู้ฉายรังสี และวันเดือนปีที่ทำการฉายรังสี เพื่อให้ผู้บริโภคได้ทราบ และมีโอกาสเลือกซื้อ”

การฉายรังสีอาหารโดยทั่วไป ปริมาณของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะอยู่ระหว่าง 0.05 - 10 กิโลเกรย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร และวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี โดยปริมาณของรังสีที่แนะนำให้ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 1 ทั้งนี้ได้มีรายงานการทดลองความปลอดภัยของอาหารที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 10 กิโลเกรย์ เป็นจำนวนมาก พบว่า ปริมาณรังสีดังกล่าวมีความปลอดภัย (Loaharanu, 1995) ซึ่งถ้าเปรียบเทียบการใช้รังสี 10 กิโลเกรย์ จะเทียบเท่ากับพลังงานที่ทำให้น้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น 2.4 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการประยุกต์ใช้รังสีก่อไอออนสามารถแบ่งตามปริมาณของรังสีที่ใช้ (Satin, 1993) ได้แก่

1. ระดับต่ำ (low dose) ใช้ปริมาณรังสีสูงถึง 1 กิโลเกรย์ ใช้เพื่อยับยั้งการงอกของพืชหัวชะลอการสุก และทำลายแมลง
2. ระดับปานกลาง (medium dose) ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 1 - 10 กิโลเกรย์ ใช้เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเน่าเสีย ลดปริมาณของเชื้อโรคที่ไม่สร้างสปอร์ และชะลอการสุก
3. ระดับสูง (high dose) ใช้ปริมาณรังสีระหว่าง 10 - 50 กิโลเกรย์ ใช้เพื่อทำให้ปลอดเชื้อ (sterilization)

ตารางที่ 1 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)

ในส่วนของ การนำรังสีมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการแปรรูปอาหารมีคำศัพท์ที่เฉพาะดังนี้

Radication เป็นการฉายรังสีในระดับที่สามารถลดปริมาณของแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์ และพวกที่ก่อให้เกิดโรค จนไม่สามารถตรวจพบได้ เมื่อใช้วิธีการทางจุลชีววิทยา และยังหมายความถึงการทำลายปรสิต (parasites) วิธีนี้ใช้ปริมาณรังสีต่ำ (0.1 - 8.0 กิโลเกรย์) ในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค และจุลินทรีย์อื่น ยกเว้นไวรัส และยังทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรคชนิดไม่สร้างสปอร์ (ประมาณ 2 - 8 กิโลเกรย์) และวิธีนี้อาจเรียกว่า irradiation pasteurization โดยเฉพาะเมื่อต้องการเน้นในการทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค

Radurization เป็นการฉายรังสีในระดับที่เพียงพอต่อการรักษาคุณภาพของอาหาร โดยทำลายเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสียของอาหาร และใช้รังสีปริมาณ 0.4 - 10.0 กิโลเกรย์ เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาของผลผลิต วิธีนี้เรียกได้ว่าเป็น irradiation pasteurization วิธีหนึ่ง

Radappertization เป็นการถนอมอาหารโดยการใช้อัตราปริมาณสูง เพียงพอที่จะลดจำนวน หรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ (ยกเว้นไวรัส) ให้น้อยลง ซึ่งสามารถตรวจสอบด้วยวิธีเฉพาะทางจุลินทรีย์ได้ วิธีการนี้จะทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย หรือทำลายสารพิษให้หมดไป และไม่ทำให้เกิดการปนเปื้อนซ้ำซ้อน โดยใช้อัตราปริมาณ 10 - 15 กิโลเกรย์ ในการทำให้ปลอดเชื้อ

วิธีนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า irradiation sterilization หรือ commercial sterility (ความหมายเดียวกันกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารบรรจุกระป๋อง) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถเก็บรักษาในสภาวะปกติได้ (Barbosa-Canovas *et al.*, 1998)

ประวัติการฉายรังสีอาหาร

การใช้รังสีในการถนอมอาหารครั้งแรก ได้มีการจดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1905 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษ ส่วนในประเทศสหรัฐอเมริกา เริ่มใช้รังสีกับอาหารครั้งแรกในปี ค.ศ. 1920 โดยมีวัตถุประสงค์ในการทำลายพยาธิ *Trichinella spiralis* ซึ่งมีปะปนอยู่ในเนื้อสุกร (Jones, 1992) และมีการศึกษาอย่างมากเกี่ยวกับผลของรังสีเอ็กซ์ต่ออาหาร และองค์ประกอบในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 1920 - 1930 ต่อมาในปี ค.ศ. 1963 ได้มีการฉายรังสีข้าวสาลี และแป้งสาลี เพื่อควบคุมแมลง และใช้ในการถนอมอาหารสำหรับนักบินอวกาศของประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1972 และในปี ค.ศ. 1987 ทางกลุ่มประเทศเศรษฐกิจยุโรป ยกเว้นสหราชอาณาจักร และเยอรมันตะวันตก ได้รับรองความปลอดภัยของอาหารบางชนิดที่ผ่านการฉายรังสี และในปัจจุบันนี้มีมากกว่า 40 ประเทศทั่วโลก ที่ได้รับรองการบริโภคอาหารที่ผ่านการฉายรังสี ดังตารางที่ 2 ซึ่งในจำนวนนี้มี 25 ประเทศที่รับรองอาหารฉายรังสีที่ผลิตเพื่อการค้า การฉายรังสีในหลายประเทศส่วนใหญ่ มีวัตถุประสงค์ในการควบคุม และทำลายแบคทีเรีย และเชื้อราในเครื่องเทศ นอกจากนี้ยังใช้ในการชะลอการงอกของมันฝรั่ง และหัวหอม และการถนอมรักษารัษฎูพืช และแป้ง ผลไม้สด รวมไปถึงเนื้อสัตว์จำพวกสัตว์ปีก เมล็ดพืช ปลา และเนื้อสัตว์ชนิดอื่นๆ โดยมีรายงานว่า การใช้รังสีแกมมา สามารถคงคุณลักษณะที่ดีของอาหาร และทำลายจุลินทรีย์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2 ประเทศต่างๆ ที่มีการรับรองการบริโภคอาหารฉายรังสี

รายชื่อประเทศ				
แอลจีเรีย	คิวบา	อิตาลี	โปแลนด์	อาร์เจนตินา
สาธารณรัฐเชค	ไอวอรี โคสต์	รัสเซีย	บังคลาเทศ	เคนมาร์ก
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	อูรุกวัย
เวียดนาม	ยูโกสลาเวีย			

ที่มา: Barbosa-Canovas *et al.* (1998)

ประโยชน์ของการฉายรังสี

การใช้รังสีในการถนอมอาหารมีประโยชน์ดังนี้ (Urban, 1989)

1. ทำให้สามารถเก็บรักษาอาหารได้นานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รังสีมีประสิทธิภาพในการทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุทำให้อาหารเกิดการเน่าเสีย
2. รังสีทำลายจุลินทรีย์ แมลง ที่เป็นสาเหตุของการเกิดโรคได้ ทำให้อาหารมีคุณภาพดี และลดปัญหาจากการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพของมนุษย์
3. สามารถควบคุม และป้องกันการเน่าเสียของอาหาร เนื่องจากสามารถชะลอการเปลี่ยนแปลงระยะบริบูรณ์ (maturation) การชราภาพ (senescence) รวมทั้งการงอก (sprouting) ของผัก และผลไม้สด
4. ทำให้องค์ประกอบทางเคมีบางอย่างเปลี่ยนแปลง และช่วยปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น

5. ไม่ก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในอาหาร

6. ช่วยรักษาคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร

7. ช่วยรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร หรือทำให้คุณภาพทางประสาทสัมผัสดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีนอมรักษาอาหาร โดยวิธีอื่น ๆ

นอกจากนั้น การฉายรังสียังสามารถแทนที่การใช้สารเคมีในการถนอมรักษาอาหาร เช่น ใช้แทนที่สารไนไตรท์ในผลิตภัณฑ์ cured meats หรือใช้รังสีแทนการรมอาหาร ด้วยสารเคมีต่างๆ เช่น ethylene dibromide methyl, bromide และ ethylene oxide ในอาหาร (Loaharanu, 1994) เช่น ในพวกเครื่องเทศ ซึ่งในปัจจุบันนี้ มีข้อจำกัดในการใช้สารเคมีเหล่านี้เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากพบว่าสารเคมีเหล่านี้สามารถทำให้เกิดการกลายพันธุ์ และเป็นสาเหตุให้เกิดโรคมะเร็งขึ้นได้ ข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการฉายรังสีคือ สามารถฉายรังสีให้กับอาหารหรือผลิตภัณฑ์ที่บรรจุหีบห่อเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นการป้องกันการปนเปื้อนภายหลังการฆ่าเชื้อได้เป็นอย่างดี

การฉายรังสีอาหารสามารถกระทำได้กับอาหารทั้งภาชนะบรรจุที่มีขนาดเล็ก และใหญ่ ในสภาพแช่แข็ง หรือที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งทำให้สามารถปรับเปลี่ยน และตัดแปลงได้ง่าย การแช่แข็งอาหารก่อนการฉายรังสีทำให้เกิดสภาวะไร้ออกซิเจน จึงทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการเน่าเสียจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) หรือการเสียสภาพธรรมชาติจากความร้อน (heat denaturation) และมีรายงานว่า การฉายรังสีอาหาร เป็นวิธีการเดียวที่สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เช่น *Salmonella* ในอาหารแช่แข็งได้

ข้อจำกัดของการฉายรังสี

ภาชนะบรรจุที่ใช้กับอาหารที่จะนำไปผ่านการฉายรังสี จะต้องเป็นไปตามกฎข้อบังคับเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหาร ซึ่งในบางครั้งอาจมีการใช้การปรับสภาพบรรยากาศในภาชนะบรรจุ (modified atmosphere packaging) ร่วมกับการฉายรังสี ตัวภาชนะบรรจุจะต้องทนต่อรังสี และสามารถปกป้องอาหารจากสิ่งปนเปื้อนต่างๆ (protective characteristics) และต้องไม่ปลดปล่อยสารพิษที่อาจถูกสร้างขึ้นภายหลังจากการฉายรังสี และถ่ายเทสู่อาหาร รวมทั้งไม่ทำให้เกิดกลิ่น หรือรสชาติอาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง (Barbosa-Canovas *et al.*, 1998)

ผลของรังสีต่อองค์ประกอบในอาหาร

การฉายรังสีอาหารทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้หลายลักษณะ เช่น ทำให้โมเลกุลที่มีขนาดยาว ได้แก่ เซลลูโลสแตกตัวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืช ดังนั้นผลไม้ และผักจึงอ่อนนุ่ม หรือสูญเสียคุณภาพของเนื้อสัมผัสหลังผ่านการฉายรังสี การฉายรังสีอาหารที่มีไขมันทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (free radicals) ที่สามารถออกซิไดซ์ไขมัน ทำให้เกิดการหืน (rancidity) ขึ้น การใช้รังสีปริมาณสูงอาจทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติที่เรียกว่า burnt feathers เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาภายในอาหาร (Kader, 1986)

การฉายรังสีมันฝรั่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี และความเข้มข้นของสารฟีนอลเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความเข้มข้นของไขมัน และฟอสโฟลิปิดลดลง (Mondy and Gosselin, 1989) และนอกจากรังสีจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยตรงแล้ว อาจทำให้โครงสร้างของโปรตีนในระดับทุติยภูมิ (secondary) และตติยภูมิ (tertiary structure) เกิดการเปลี่ยนแปลง และอาจกระตุ้นให้เอนไซม์ทำงาน เป็นผลให้ลักษณะทางสรีรวิทยาเปลี่ยนแปลงไปจนสังเกตได้ โดยเนื้อสัมผัสอาจอ่อนนุ่มลงมีความหนืดลดลง และค่าการนำไฟฟ้า (electrical conductivity) อาจเพิ่มขึ้น (Brynjolfsson, 1989)

การฉายรังสีให้กับน้ำทำให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxy radicals) และสารชนิดอื่นๆ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนทำให้เกิดอนุมูลโปรตีนอิสระ (protein free radicals) และจะทำปฏิกิริยาต่อเนื้อเยื่อไขมันในอาหาร อนุมูลอิสระจะไม่เสถียรยกเว้นในบางสภาวะ แต่รังสีไม่มีผลต่อกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนในเนื้อสัตว์ ในส่วนของเอนไซม์พบว่ารังสีสามารถยับยั้งปฏิกิริยาเนื่องจากเอนไซม์ได้ในสภาวะที่เป็นสารละลายเจือจาง แต่เอนไซม์ในอาหารนั้นค่อนข้างทนต่อการฉายรังสี การยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ในอาหารจะต้องใช้ปริมาณรังสีประมาณ 5 - 10 เท่าของปริมาณที่ใช้ในการทำลาซจูลินทรีย์ (Frazier, 1988) ซึ่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ภายในเซลล์อาจดำเนินต่อหลังจากการทำลาซจูลินทรีย์ ถ้าไม่ทำการลวก (blanching) เพื่อทำลายเอนไซม์ในอาหารก่อนการฉายรังสี

ปริมาณรังสีแกมมาที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณอนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระ (carbohydrate free radicals) เพิ่มมากขึ้น การขยายตัวของปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นถ้าอาหารมีปริมาณความชื้นสูง อนุมูลคาร์โบไฮเดรตอิสระก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลของแป้ง เมื่อใช้รังสีปริมาณที่

สูงขึ้น เป็นผลให้ความหนืดลดลง และความสามารถในการละลายน้ำของแป้งเพิ่มขึ้น รวมทั้งความเป็นกรดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Subularse *et al.*, 1991)

จากกระบวนการฉายรังสี ทำให้เกิดความวิตกกังวลว่า เชื้อจุลินทรีย์ที่รอดชีวิตจะก่อให้เกิดอันตราย หรือมีคุณสมบัติทนต่อการฉายรังสีเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามคณะทำงานเกี่ยวกับความปลอดภัยของอาหารฉายรังสีระหว่างประเทศ ไม่ได้มองข้ามปัญหาเหล่านี้ และมีรายงานจากองค์การอนามัยโลก (WHO, 1994) โดย International Advisory Group รายงานว่าไม่พบหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่แสดงให้เห็นว่า การฉายรังสีอาหาร ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ ซึ่งจะนำไปเพิ่มระดับความรุนแรงในการก่อให้เกิดโรค หรือมีความต้านทานต่อการฉายรังสีเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังรายงานโดยอาศัยสมมุติฐานในกรณีที่เลวร้ายที่สุด (worst – case assumption) ที่จะเกิดขึ้นในการฉายรังสีอาหาร ซึ่งได้แก่การก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีนั้น พบว่าสารดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยกว่าระดับปริมาณทั่วไปที่พบในอาหารตามธรรมชาติ และการฉายรังสีทางการค้าจะไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสีในอาหารขึ้นได้ ในปี ค.ศ. 1993 American Medical Association Council on Scientific Affairs ยืนยันว่าการฉายรังสีอาหารเป็นวิธีการที่ปลอดภัย และให้ผลดีในการเพิ่มความปลอดภัยของอาหารตามกฎหมายของประเทศสหรัฐอเมริกา

อาหารฉายรังสีในประเทศไทย

ในส่วนของประเทศไทย ได้เริ่มมีการฉายรังสีกึ่งแข็งแข็ง เพื่อทดลองวางตลาดเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2527 ต่อมาได้มีการใช้รังสีในการทำลายปรสิต เช่น *Taenia Trichinella* และ *Entamoeba* ในแฮม รวมทั้งแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดโรคบางชนิด เช่น *Salmonella* และ *Shigella* โดยพบว่า การใช้รังสีปริมาณต่ำ 2 กิโลเกรย์ จะไม่ทำให้คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของแฮมเปลี่ยนแปลงและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคถึงแม้ว่าแฮมฉายรังสีจะมีราคาจำหน่ายแพงกว่าแฮมที่ไม่ผ่านการฉายรังสีก็ตาม (Loaharanu, 1994)

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 297 (ราชกิจจานุเบกษา, 2549) ได้กำหนดให้อาหารฉายรังสีต้องแสดงฉลากและรายละเอียดเพิ่มเติม ดังนี้

1. แสดงชื่อและที่ตั้งของสำนักงานใหญ่ของผู้ผลิตและผู้ฉายรังสี

2. แสดงข้อความว่า “ผ่านการฉายรังสีแล้ว” หรือข้อความที่สื่อความหมายในทำนองเดียวกัน
3. ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี ด้วยข้อความดังนี้ “เพื่อ.....” (ความที่เว้นไว้ให้ระบุวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี)
4. การแสดงเครื่องหมายการฉายรังสีอาจจะแสดงหรือไม่ก็ได้ แต่หากจะแสดงต้องใช้ตามรูปแบบที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 1 ใกล้เคียงชื่อของอาหาร
5. วันเดือนและปีที่ทำการฉายรังสี

ภาพที่ 1 เครื่องหมายอาหารฉายรังสี

ที่มา: สำนักนายกรัฐมนตรี (2549)

ปัญหาที่เกิดขึ้นของประเทศไทย

จากความเข้มงวดของประเทศในกลุ่มสหภาพยุโรป หรืออียู ทำให้มีการคุ้มครองสินค้าเกษตร และอาหารที่นำเข้ามายังประเทศเหล่านั้น โดยให้ความสำคัญกับอาหารที่ตรวจพบว่ามีองค์ประกอบที่ผ่านการฉายรังสี โดยมีได้ทำการติดฉลากกำกับอย่างถูกต้อง จากรายงาน RASFF (Rapid Alert System for Food and Feed) ของ DG-SANCO (สำนักงานที่ปรึกษาการเกษตรต่างประเทศ ประจำสหภาพยุโรป, 2550) พบว่า อียูตรวจพบสินค้าเกษตรและอาหารไม่ได้มาตรฐานตามที่อียูกำหนด ประจำเดือนมีนาคม 2550 จำนวน 13 รายการ ซึ่งมีการตรวจพบการฉายรังสีที่ไม่ได้รับอนุญาต ในสินค้าเส้นหมี่ จำนวน 1 รายการ นอกจากนี้ ยังมีการตรวจพบการฉายรังสีในผงปรุงรสของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป จำนวน 1 รายการ (Official Journal of the European

Union, 2005) ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาวิธีการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ให้ครอบคลุมอาหารทุกประเภท โดยเฉพาะอาหารส่งออกของไทย จึงมีความสำคัญมาก

การตรวจสอบอาหารฉายรังสี

แม้ว่าอาหารฉายรังสี จะเป็นที่ยอมรับจากองค์การสากลระหว่างประเทศต่างๆ ว่ามีความปลอดภัย เมื่อมีการฉายรังสีอาหาร ด้วยชนิดและปริมาณรังสี ตามที่มาตรฐานกำหนด แต่การฉายรังสีอาหาร ยังต้องมีการควบคุมในเรื่องของกรรมวิธีการผลิต ซึ่งปกติแล้ว ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขของไทย ควบคุมโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา กำหนดว่า อาหารฉายรังสี ต้องผ่านกรรมวิธีการผลิต ตามที่กำหนดและต้องมีการแสดงฉลาก แต่ถ้าอาหารเหล่านั้น ไม่ได้ผ่านการดำเนินการอย่างถูกต้อง เช่น ไม่ได้ติดฉลากว่าผ่านการฉายรังสีแล้ว อาหารนั้นก็ยากที่จะตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า เพราะอาหารนั้น ยังคงสภาพเดิมไม่เปลี่ยนแปลง ในการที่จะระบุว่าเป็นอาหารนั้นๆ เป็นอาหารฉายรังสีหรือไม่ อาจมีผลในทางการค้า เพราะอาจเกิดกรณี ที่มีการลักลอบฉายรังสีอาหาร แล้วไม่ได้แสดงฉลาก เพื่อวัตถุประสงค์ ในการทำให้อาหารมีคุณภาพที่ดี เพื่อส่งจำหน่ายยังประเทศต่างๆ แต่ถ้าไม่มีการเปิดเผยข้อมูลการฉายรังสี หรือแสดงฉลากว่าเป็นอาหารฉายรังสี ผู้บริโภค ก็ไม่อาจทราบได้ ฉะนั้น จึงได้มีการทดลองตรวจสอบอาหารฉายรังสี ด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อพิสูจน์ทราบได้ว่า อาหารนั้นๆ ผ่านการฉายรังสีมาแล้วหรือไม่ การตรวจพิสูจน์นี้ได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา

การตรวจพิสูจน์ด้วยวิธีการเหล่านี้ อาจเหมาะสำหรับการตรวจอาหารประเภทใดประเภทหนึ่ง ยังไม่มีข้อมูลที่รายงานว่ามีเครื่องมือใด ที่สามารถตรวจวัดการเป็นอาหารฉายรังสี ได้ทั้งหมดทุกประเภท อย่างถูกต้องแม่นยำ อย่างไรก็ตาม ขณะนี้มีการยอมรับวิธีการ และได้กำหนดมาตรฐานวิธีการตรวจสอบ ว่าอาหารนั้นๆ ผ่านการฉายรังสีหรือไม่ ดังตารางที่ 3 โดยการตรวจสอบอาหารฉายรังสีสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้ (เสาวพงศ์, 2550)

1. การวิเคราะห์ทางชีววิทยาและจุลชีววิทยา สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

1.1 การวัดปริมาณ o-tyrosine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่เซลล์ใช้สังเคราะห์โปรตีนในอาหารประเภทเนื้อสัตว์ ไก่ ปลา และอาหารทะเล

1.2 DNA Comet Assay โดยตรวจวัด DNA ภายในอาหารฉายรังสี โดยใช้ Microgel electrophoresis ใช้ตรวจสอบอาหารประเภทไก่ หมู ปลา ผัก และผลไม้

1.3 Direct epifluorescent/aerobic plate count (DEFT/APC) โดยตรวจวัดจุลินทรีย์ในอาหารหลังการฉายรังสี ใช้ตรวจสอบอาหารประเภทเครื่องเทศ ไก่ และสมุนไพร

2. การวิเคราะห์ทางเคมี เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ไขมัน โปรตีน เพอร์ออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ไทโรซีน และโทมินไกลคอล โดยอาศัยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS)

3. การวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ สามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

3.1 Thermoluminescence - TL เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ถูกจับไว้ในสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกต โดยการกระตุ้นด้วยความร้อน ใช้ตรวจสอบอาหารประเภท หอย กุ้ง ปู เครื่องเทศ สมุนไพรแห้ง และเมล็ดธัญพืช

3.2 Photostimulated luminescence - PSL เป็นการตรวจวัดพลังงานแสงที่ถูกจับไว้ในสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกต หรือ calcites โดยการกระตุ้นด้วยแสงอินฟราเรด ใช้ตรวจสอบอาหารประเภทสมุนไพร สัตว์น้ำ จำพวกมีเปลือก เช่น หอย กุ้ง และปู

3.3 Viscosity เป็นการตรวจวัดความหนืดของอาหารที่ cell wall มีการเปลี่ยนแปลงการซึมผ่าน ของสารละลาย เข้าไปในเซลล์ หลังการฉายรังสี โดยใช้เครื่อง Rheotest rotational viscometer ใช้ตรวจสอบอาหารประเภทพริกไทย อบเชย และกุ้ง

3.4 Electron spin resonance - ESR เป็นการตรวจวัดอนุมูลอิสระที่เกิดจากการฉายรังสีในองค์ประกอบของอาหาร เช่น crystalline sugars หรือ bone โดยการตรวจวัดสัญญาณที่ได้จากการดูดกลืนพลังงานในช่วงความถี่ไมโครเวฟของอิเล็กตรอนเดี่ยวในรูปของสเปกตรัม ใช้ตรวจสอบอาหารประเภทเนื้อสัตว์ที่มีส่วนประกอบของกระดูก เครื่องเทศ ผัก และผลไม้แห้ง

ตารางที่ 3 มาตรฐานการตรวจสอบอาหารฉายรังสีของ CEN

รหัสมาตรฐาน	วิธีการ	ชนิดตัวอย่าง
EN 1784	การวิเคราะห์ hydrocarbons ด้วยเทคนิค Gas chromatography (GC)	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู วัว) อะโวคาโด มะม่วง มะละกอ และเนยแข็ง
EN 1785	การวิเคราะห์ 2-alkylcyclobutanones ด้วยเทคนิค GC/MS	เนื้อสัตว์ (ไก่ หมู ปลา) ไข่สด และมะม่วง
EN 1786	การวิเคราะห์กระดูก ด้วยเทคนิค ESR	ไก่ ปลา วัว และขาบแช่แข็ง
EN 1787	การวิเคราะห์เซลลูโลส ด้วยเทคนิค ESR	ผงปารีคา พิสตาชิโอ และเมล็ดจากสตรอเบอร์รี่
EN 1788	การตรวจวัดพลังงานที่ได้จากการกระตุ้นสารประกอบอินทรีย์ประเภทซิลิเกตในตัวอย่างไม่ด้วยเทคนิค Thermoluminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก กุ้ง ปลาแห้ง ผลไม้ ผัก และมะเขือเทศ
prEN13708	การวิเคราะห์ผลึกน้ำตาล ด้วยเทคนิค ESR	ผลไม้อบแห้ง (มะละกอ มะม่วง มะเดื่อ และลูกเกด)
prEN13751	การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photostimulated luminescence	เครื่องเทศและสมุนไพร พริก และปลา
prEN13783	การตรวจนับจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ ด้วยเทคนิค Direct Epifluorescent Filter Technique/Aerobic Plate Count (DEFT/APC)	เครื่องเทศ สมุนไพร และพริก
prEN13784	การวิเคราะห์ความเสียหายของ DNA ด้วยเทคนิค DNA comet assay	ไก่ หมู และเมล็ดพืช

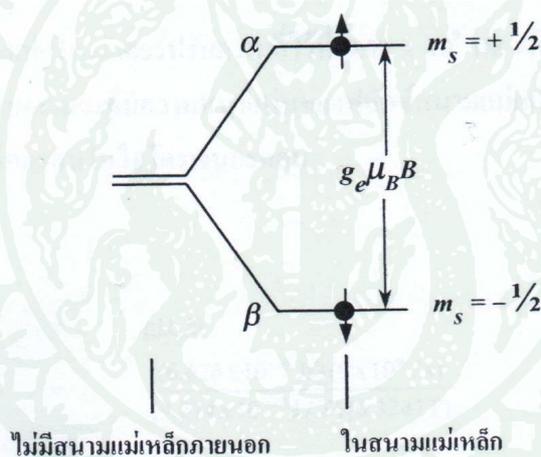
ที่มา: Delincee (2002)

โดยในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีนั้น การเลือกเทคนิคที่จะใช้ในการตรวจสอบ ถือเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ความแม่นยำ และความถูกต้องในการวิเคราะห์ ความ

เหมาะสมของตัวอย่าง กับเทคนิคที่จะใช้ทำการวิเคราะห์ ความสะดวก รวดเร็วในการวิเคราะห์ และราคา หรือค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ต้องมีความเหมาะสม เป็นต้น

Electron Spin Resonance (ESR) Spectroscopy

จากกลศาสตร์ควอนตัม ทำให้ทราบว่าอิเล็กตรอนมีโมเมนตัมเชิงมุม ซึ่งเกิดจากการหมุนรอบนิวเคลียส และมีค่าโมเมนตัมเชิงมุมภายใน (Intrinsic angular momentum) ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนหมุนรอบตัวเอง เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า สปิน ส่วนเลขควอนตัมแม่เหล็กเชิงสปิน (Spin magnetic quantum number, m_s) เป็นค่าที่บอกทิศทางสปินของอิเล็กตรอน เมื่อไม่มีอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก สปินทั้งสองของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเท่ากัน แต่เมื่ออยู่ภายในสนามแม่เหล็ก สปินทั้งสองจะมีพลังงานต่างกัน ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ในสนามแม่เหล็กภายนอก

ที่มา: นิพนธ์ (2547)

จากภาพที่ 2 พลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็ก เขียนได้ดังนี้

$$E = g \mu_B m_s B \quad (1)$$

เมื่อ g คือ g -factor มีค่าเท่ากับ 2
 μ_B คือ Bohr magneton มีค่าเท่ากับ 9.274×10^{-24} J/T

- m_s มีค่าเท่ากับ $-1/2$ และ $+1/2$
 B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก หน่วยเป็น เทสลา (T)

ผลต่างของระดับพลังงานของสองสปิน ΔE เขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_\alpha - E_\beta \\ \Delta E &= (+1/2 g \mu_B B) - (-1/2 g \mu_B B) \\ \Delta E &= g \mu_B B\end{aligned}\quad (2)$$

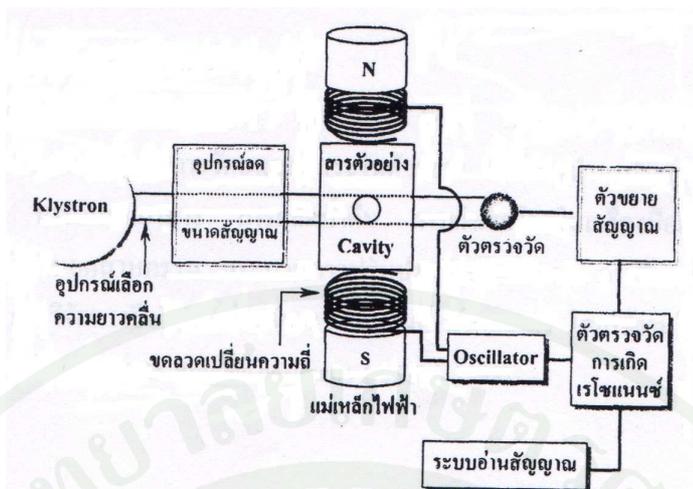
ดังนั้น การแทรกซึมระหว่างสองระดับพลังงานของสองสปิน จะเกิดขึ้นได้เมื่อ อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เท่ากับผลต่างระหว่างสองระดับพลังงาน จากสมการ

$$h \nu = g \mu_B B \quad (3)$$

- เมื่อ h คือ Plank's constant
 ν คือ ความถี่เรโซแนนซ์

ความถี่เรโซแนนซ์ค่าหนึ่งจะพอดีกับความเข้มสนามแม่เหล็กภายนอกค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นความถี่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ (X band) มีค่า 9.75 GHz กับความเข้มสนามแม่เหล็ก มีค่า 350 mT อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานสูงขึ้น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า เรโซแนนซ์ เนื่องจากเป็นเรโซแนนซ์ที่เกิดจากการหมุนของอิเล็กตรอน จึงเรียกว่า อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance) หรืออีเอสอาร์

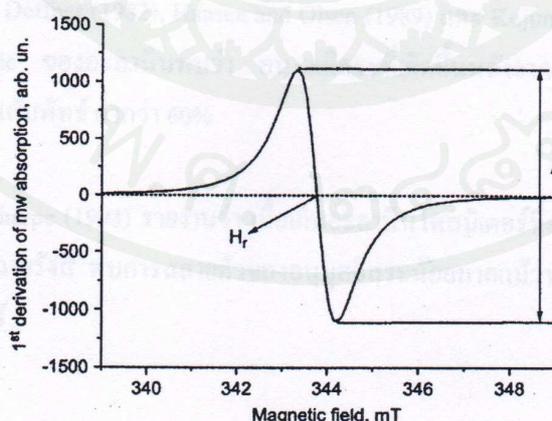
เครื่องอีเอสอาร์ สเปกโตรมิเตอร์ (ESR Spectrometer) ประกอบด้วย Klystron tube หรือแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ ส่งคลื่นไมโครเวฟไปยังอุปกรณ์เลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับการเกิดเรโซแนนซ์ แล้วเข้าสู่ Cavity หรือที่ใส่ตัวอย่าง ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็ก มี Digital multimeter อ่านค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดเรโซแนนซ์ เครื่องจะวัดการเกิดเรโซแนนซ์ด้วย Phase-sensitive detector และบันทึกอีเอสอาร์สเปกตรัมที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของเครื่องอีเอสอาร์ สเปกโตรมิเตอร์

ที่มา: นิพนธ์ (2547)

ตามหลักการอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ อิเล็กตรอนเดี่ยวของอนุมูลอิสระจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่พอดีกับการเกิดเรโซแนนซ์ ในสถานะที่มีสนามแม่เหล็กภายนอก เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องอีเอสอาร์ สเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีหลักการทำงาน คือ ตั้งความถี่คลื่นไมโครเวฟคงที่ แล้วสแกนสนามแม่เหล็กจนกระทั่งเกิดเรโซแนนซ์ ระบบจะบันทึกสัญญาณอีเอสอาร์ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่เกิดเรโซแนนซ์ และแสดงผลเป็นกราฟอนุพันธ์อันดับหนึ่ง หรืออีเอสอาร์สเปกตรัม ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 Peak-to-peak amplitude (A) ของอีเอสอาร์สเปกตรัม

ที่มา: Schauer *et al.* (2007)

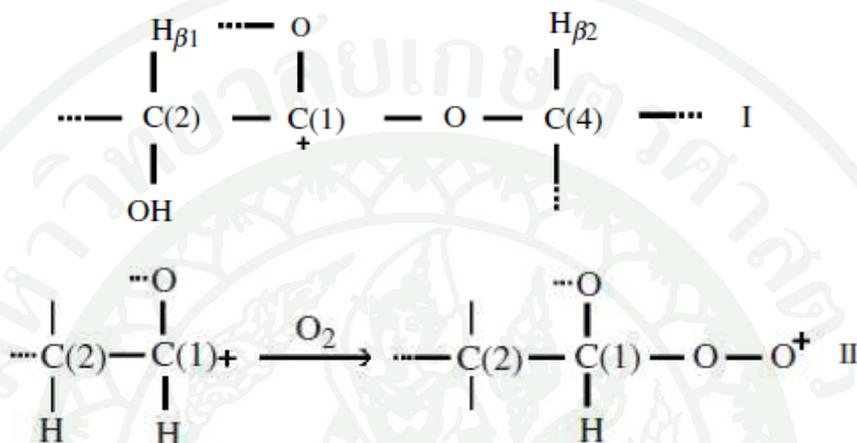
เครื่องอีเอสอาร์สเปกโตรมิเตอร์จะแสดงผลการวัดเป็นค่า ESR signal intensity และ Magnetic field ทุกๆ ตำแหน่งบนสเปกตรัม ส่วนค่า Peak-to-peak amplitude หรือ Intensity ของสเปกตรัม (ในภาพที่ 4) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลรวมของ Maximum และ Minimum ESR signal intensity โดยตำแหน่งของ Maximum และ Minimum ESR signal intensity จะอยู่ที่ Magnetic field 343.4 และ 344.2 mT ตามลำดับ

การเกิดอนุมูลอิสระในตัวอย่างอาหารฉายรังสี

การฉายรังสีอาหาร เป็นกระบวนการทางกายภาพ ที่ให้พลังงานไปในอาหาร โดยพลังงานที่อาหารได้รับนั้น เรียกว่า ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) โดยรังสีสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของอาหาร เช่น เกิดการกระตุ้น (excitation) หรือเกิดการไอออนไนเซชัน (ionization) ในโมเลกุล การแตกหักของพันธะเคมี การเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) และเกิดการสร้างพันธะขึ้นใหม่ รวมทั้งผลของอนุมูลอิสระที่สามารถชักนำให้เกิดโมเลกุลชนิดใหม่ขึ้น (radiolytic products) (Shimoyama, 2006)

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของอาหารฉายรังสีอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโดยตรง ซึ่งพลังงานจากรังสีจะทำให้เกิดการสลายตัวของพันธะเคมี โดยอาจทำให้โมเลกุลนั้นอยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ถ้าพลังงานที่ถูกถ่ายทอดสูงมากพอ อิเล็กตรอนที่มีประจุลบ จะสามารถออกมาจากโมเลกุล และกลายเป็นไอออนที่มีประจุบวก (positive ion) ได้ (Becker *et al.*, 2002) และการเปลี่ยนแปลงทางอ้อม ซึ่งเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวเป็นไอออนของน้ำเนื่องจากรังสี ไปทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับสารอื่นๆ ภายในอาหาร ซึ่งในอาหารส่วนใหญ่มีความชื้นสูง เมื่อได้รับรังสีก่อไอออน จะทำให้น้ำแตกตัวเป็นไอออนได้ เนื่องจากอิเล็กตรอนหลุดออกจากโมเลกุล และเกิดการแตกของพันธะ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะกลับมารวมตัวกันได้เป็นไฮโดรเจน (hydrogen) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide, H_2O_2) อนุมูลไฮโดรเจน (hydrogen radicals, H^\bullet) อนุมูลไฮดรอกซิล (hydroxyl radical, OH^\bullet) และอนุมูลไฮโดรเปอร์ออกซิล (hydroperoxyl radicals, HO_2^\bullet) (Rosenthal, 1992) ดังนั้นผลที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสี จึงอาจกล่าวได้ว่ามีสาเหตุล้วนมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของโมเลกุล (Moseley, 1989)

การฉายรังสีในตัวอย่างประเภทแป้งด้วยรังสีแกมมา อิเล็กตรอน หรือนิวตรอน จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น 3 ชนิด ดังภาพที่ 5 โดยที่อนุมูลอิสระ I คือ hydroxyalkyl radical จะเกิดขึ้นอย่างมากเมื่อได้รับรังสี และอนุมูลอิสระ I จะไปทำลายพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ II ขึ้น เรียกว่า aldehydalkyl radical ส่วนอนุมูลอิสระ III ไม่ทราบโครงสร้าง (Polat *et al.*, 2003)

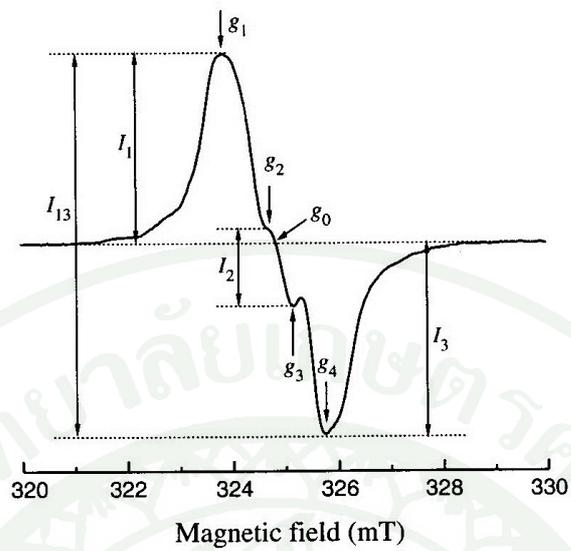


ภาพที่ 5 โครงสร้างโมเลกุลของ Carbohydrate radical I และ II และการเปลี่ยนแปลงจากอนุมูลอิสระ I ไปเป็นอนุมูลอิสระ II

ที่มา: Polat *et al.* (2003)

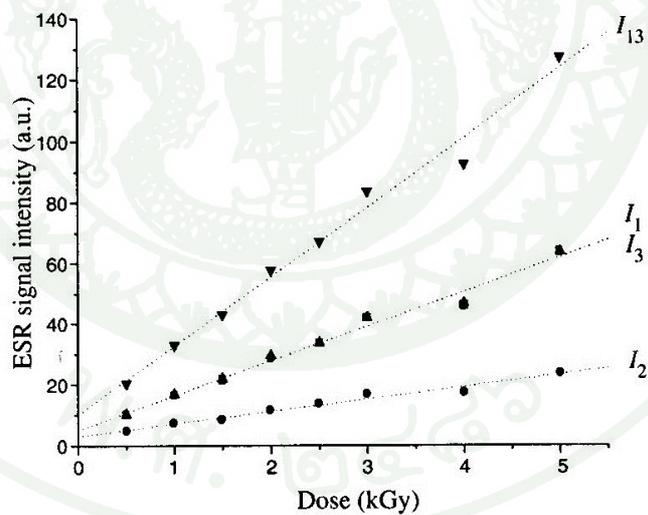
งานวิจัยการตรวจสอบอาหารฉายรังสีด้วยเทคนิค ESR

Polat *et al.* (2003) ได้ทำการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยทำการศึกษาในตัวอย่างข้าวเจ้านำมาร้อนด้วยตะแกรง เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดไม่เกิน 0.25 มิลลิเมตร ก่อนนำมาฉายรังสีแกมมา จาก Co-60 ของ Saraykoy Nuclear Research Center ประเทศตุรกี อัตรารังสีเท่ากับ 3.6 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง ปริมาณรังสี 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 และ 5 กิโลเกรย์ จากนั้นนำตัวอย่างประมาณ 300 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR model Bruker ER 4111-VT พบว่า ESR spectra มีลักษณะดังภาพที่ 6 และเมื่อปริมาณรังสีที่ใช้มากขึ้น จะทำให้ ESR signal intensity เพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ESR spectra ของตัวอย่างข้าวเจ้าฉายรังสีที่ 3 kGy

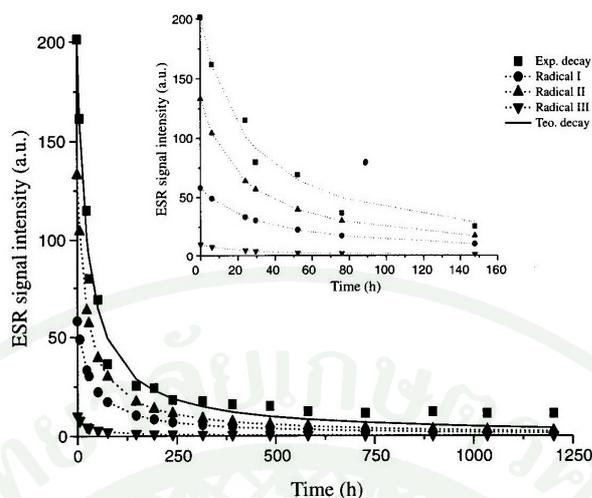
ที่มา: Polat *et al.* (2003)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น

ที่มา: Polat *et al.* (2003)

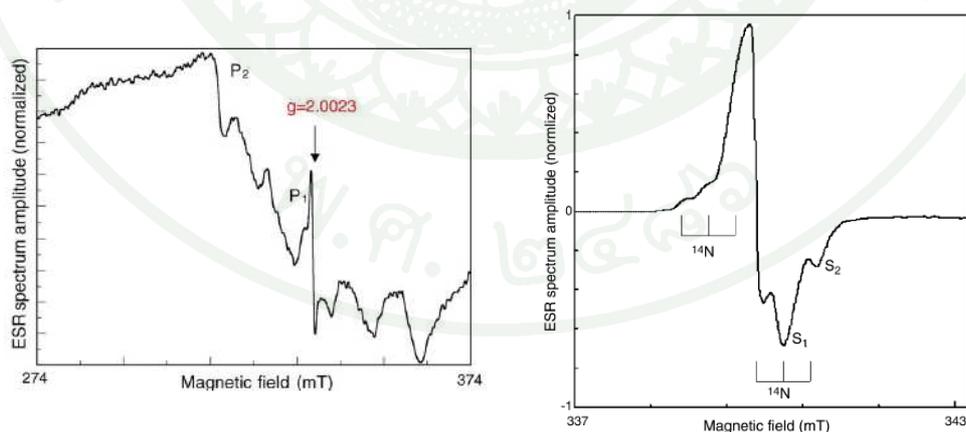
เมื่อทำการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสีที่มีต่อ ESR signal intensity พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้เก็บรักษาเพิ่มขึ้น ESR signal intensity จะลดลง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับเวลาที่ใช้เก็บรักษา

ที่มา: Polat *et al.* (2003)

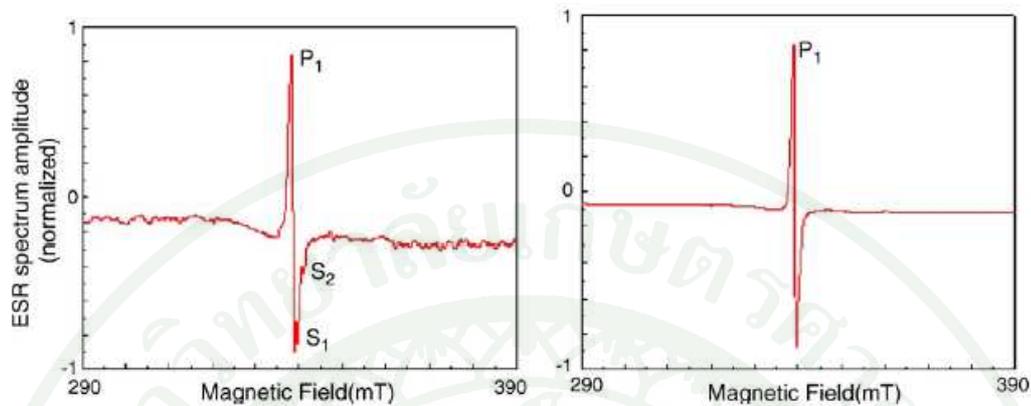
Shimoyama *et al.* (2006) ได้ทำการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยทำการศึกษาในตัวอย่างแป้งสาลี นำมาร้อนด้วยตะแกรง เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาด 200 ไมโครเมตร ก่อนนำมาฉายรังสีแกมมา ที่ Atomic Energy Research Institute ประเทศญี่ปุ่น ปริมาณรังสี 10, 30 และ 50 กิโลเกรย์ จากนั้นนำตัวอย่างประมาณ 300 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR พบว่า ESR spectra ของตัวอย่างแป้งสาลีที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และผ่านการฉายรังสี มีลักษณะดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ESR spectra ของตัวอย่างแป้งสาลีที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี (ซ้าย) และที่ผ่านการฉายรังสี (ขวา)

ที่มา: Shimoyama *et al.* (2006)

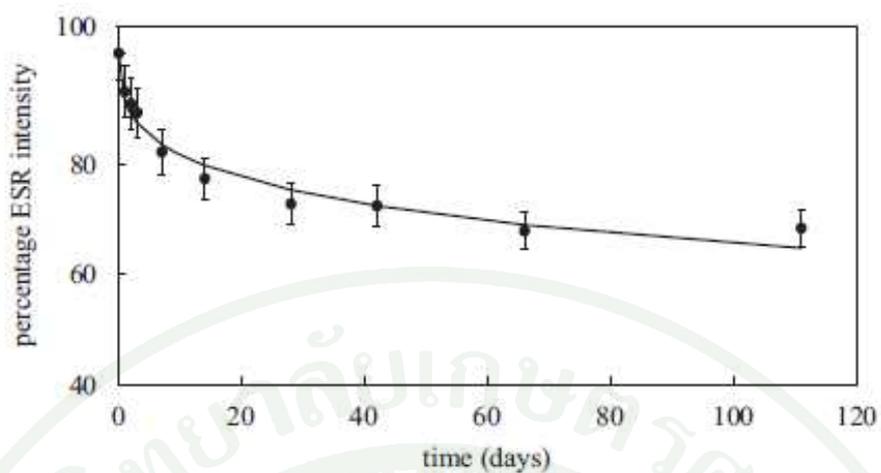
เมื่อทำการศึกษาโดยนำตัวอย่างแป้งสาธิตฉายรังสีมาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส นาน 3 นาที จะทำให้อนุมูลอิสระเกิดการสลายตัวไป ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ESR spectra ของตัวอย่างแป้งสาธิตที่ผ่านการฉายรังสีก่อน (ซ้าย) และหลังได้รับความร้อน (ขวา)

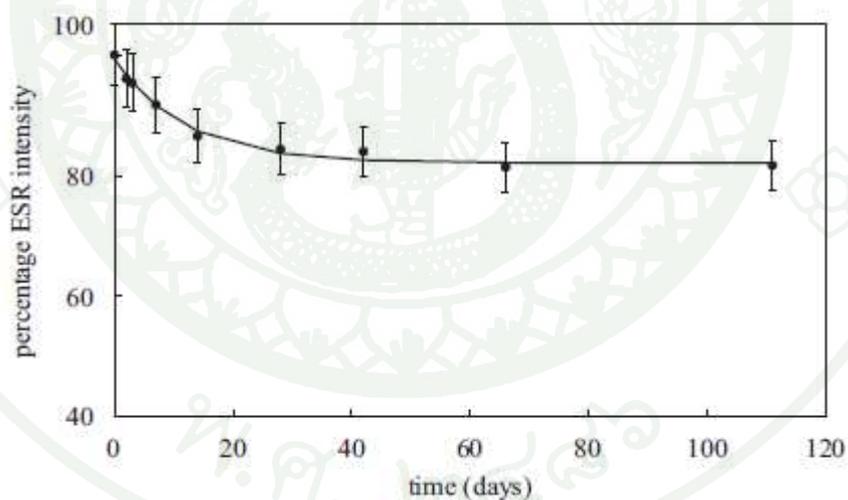
ที่มา: Shimoyama *et al.* (2006)

Bartolotta *et al.* (2007) ได้ทำการทดลองโดยใช้เทคนิค ESR ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ เพื่อประมาณค่าปริมาณรังสีที่ใช้ฉายไส้สด โดยการนำกระดูกไก่มาวิเคราะห์ พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ได้แก่ การเพิ่มปริมาณรังสี และเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี ซึ่งเตรียมตัวอย่างโดยนำซี่โครงไก่ มาขจัดเนื้อเยื่อต่างๆ ออก ล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้งนำไปแช่แข็ง แล้วบดให้ละเอียด นำไปฉายรังสีแกมมา จาก Co-60 panoramic irradiator IGS-3 อัตรารังสีเท่ากับ 2.00 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง นำตัวอย่างประมาณ 100 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR model Bruker ECS 106 จากการทดลองพบว่า เวลา และอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาหลังการฉายรังสี มีผลต่อ ESR signal intensity คือเมื่อทำการเก็บรักษาตัวอย่างไว้เป็นเวลานาน และเก็บรักษาในที่ที่มีอุณหภูมิสูง จะมีผลทำให้ ESR signal intensity ลดลง ดังภาพที่ 11 และภาพที่ 12 และเมื่อตัวอย่างได้รับปริมาณรังสีเพิ่มขึ้น จะทำให้ ESR signal intensity เพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 13



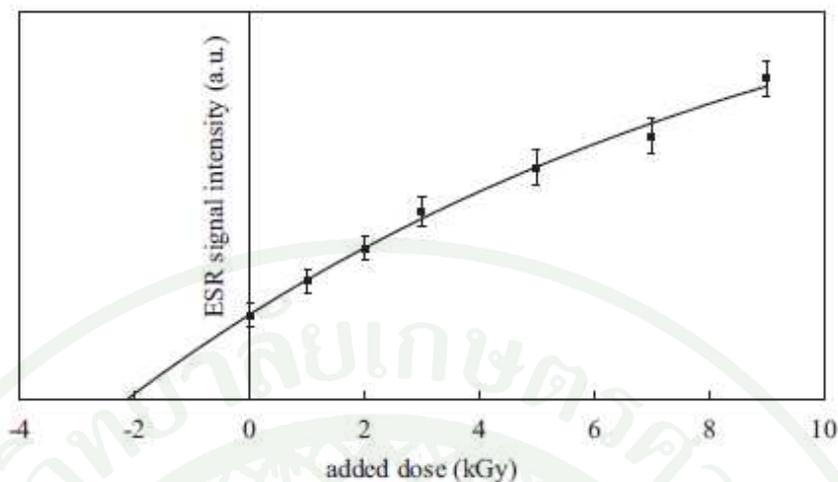
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ ESR signal intensity กับระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษา
หลังฉายรังสี (ฉายรังสีที่ 2 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง)

ที่มา: Bartolotta *et al.* (2007)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ ESR signal intensity กับระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษา
หลังฉายรังสี (ฉายรังสีที่ 2 กิโลเกรย์ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส)

ที่มา: Bartolotta *et al.* (2007)

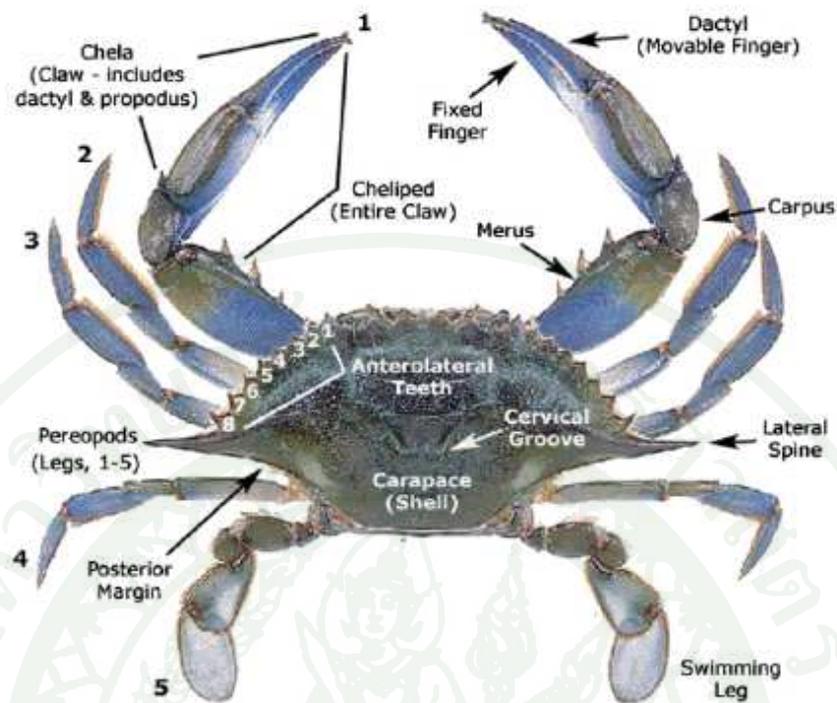


ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น

ที่มา: Bartolotta *et al.* (2007)

ผลการศึกษาทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ได้แก่ ปริมาณรังสี และเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี รวมทั้งอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี ซึ่งเทคนิค ESR นี้ สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีได้

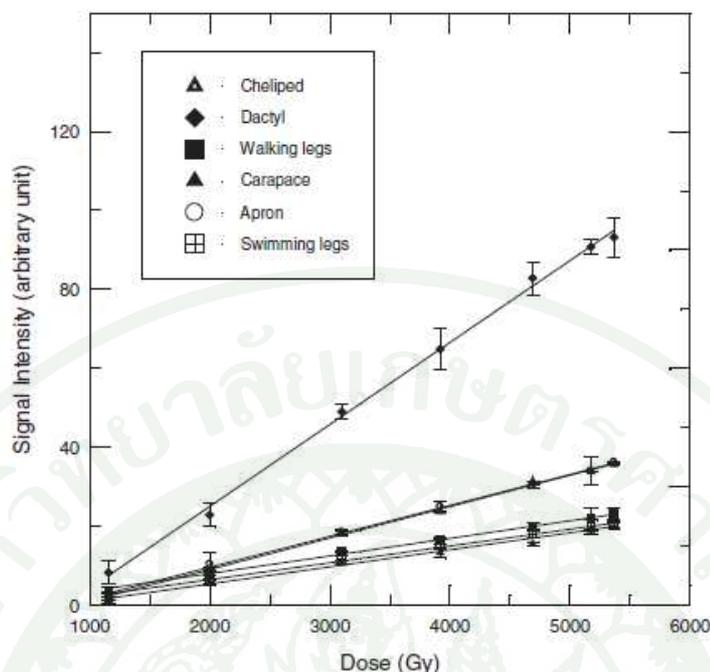
Maghraby (2007) ได้ทำการทดลองเพื่อตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยทดลองกับตัวอย่างปูสด โดยนำกระดอง และเปลือกจากส่วนต่างๆ ของปู ดังภาพที่ 14 มาขจัดส่วนที่เป็นเนื้อออก ล้างทำความสะอาด ผึ่งให้แห้ง และบดให้ละเอียด จากนั้นนำมาฉายรังสีแกมมา จาก Cs-137 ของบริษัท Atomic Energy of Canada Limited มีกัมมันตภาพรังสีเริ่มต้น (April 1970) 1,000 คูรี (3.7×10^{10} กิโลเบ็คเคอเรล) จากนั้นนำตัวอย่างประมาณ 100 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วย เครื่อง ESR model EMX-BRUKER ประเทศเยอรมัน



ภาพที่ 14 ส่วนต่างๆ ของปูที่ใช้ในการตรวจสอบการฉายรังสี

ที่มา: Maghraby (2007)

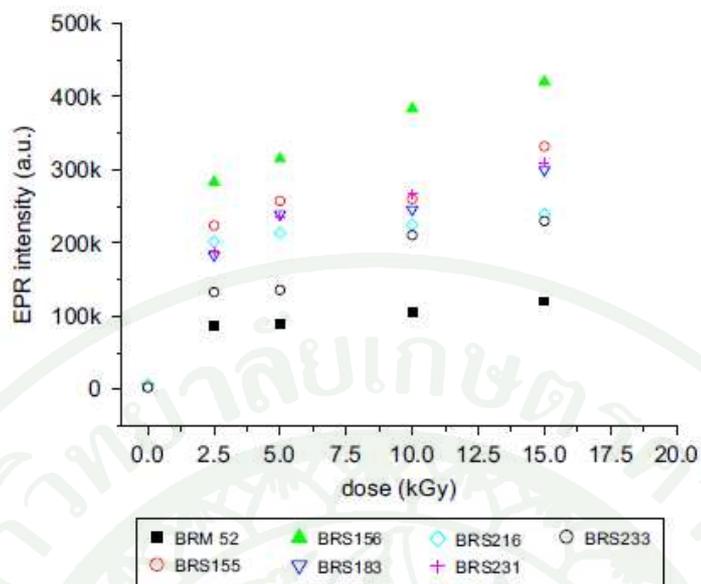
จากการทดลองพบว่า ส่วนต่างๆ ของปูนั้นตอบสนองต่อรังสีแกมมาต่างกัน ซึ่งได้ผลดังภาพที่ 15 คือ กล้ามด้านนอกมีความไวต่อรังสีมากที่สุด รองลงมาคือ เปลือกด้านท้อง (38%) กล้ามด้านใน (37%) ขาที่ใช้เดิน (30%) ขาที่ใช้ว่ายน้ำ (24%) และกระดอง (21%) อย่างไรก็ตาม สรุปได้ว่าเทคนิค ESR สามารถใช้ตรวจสอบอาหารฉายรังสีได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืนในกระดอง และเปลือกจากส่วนต่างๆ ของปูลายรังสี

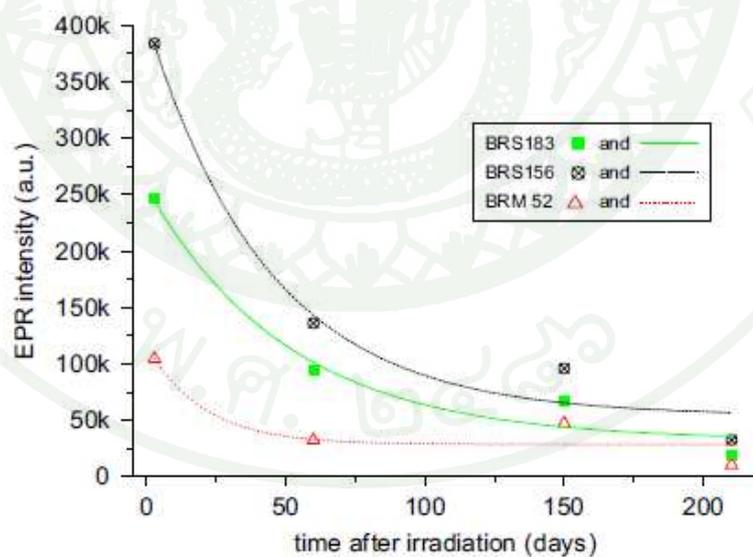
ที่มา: Maghraby (2007)

Mastro *et al.* (2007) ได้ทำการตรวจสอบอาหารฉายรังสี โดยทำการศึกษาในตัวอย่างถั่วเหลือง ทั้งหมด 7 สายพันธุ์ นำมาร้อนด้วยตะแกรง เพื่อให้ตัวอย่างมีขนาดไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาฉายรังสีแกมมา จาก Co-60 (Gammacell 220 AECL) อัตรารังสีเท่ากับ 3.4 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง ปริมาณรังสี 1 - 15 กิโลเกรย์ จากนั้นนำตัวอย่างประมาณ 300 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR พบว่าเมื่อปริมาณรังสีที่ใช้มากขึ้น จะทำให้ ESR signal intensity เพิ่มขึ้นด้วย ดังภาพที่ 16 และเมื่อทำการศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังฉายรังสี พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้เก็บรักษาเพิ่มขึ้น ESR signal intensity จะลดลง ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีที่ใช้ในถั่วเหลืองทั้ง 7 สายพันธุ์

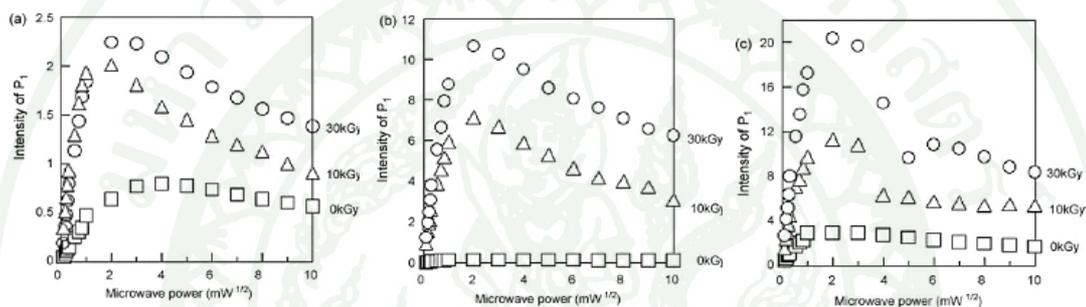
ที่มา: Mastro *et al.* (2007)



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับเวลาที่ใช้เก็บรักษาถั่วเหลืองหลังจากฉายรังสี

ที่มา: Mastro *et al.* (2007)

Ukai *et al.* (2008) ได้พัฒนา protocol สำหรับใช้ตรวจสอบผักแห้งฉายรังสี โดยตัวอย่างที่ใช้ ได้แก่ parsley, green perilla และ long green onion ซึ่งนำมาฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 ของ Japan Atomic Energy Research Institute (Takasaki Research Institute) อัตรารังสีเท่ากับ 5 เกรย์ต่อชั่วโมง ปริมาณรังสี 10, 30 และ 50 กิโลเกรย์ นำตัวอย่างประมาณ 300 มิลลิกรัม ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ESR model Joel, JES-FE1XG พบว่า เมื่อ microwave power เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ ESR signal intensity เปลี่ยนแปลงไปด้วย ขึ้นกับชนิดของตัวอย่าง และปริมาณรังสีที่ใช้ฉายตัวอย่าง ดังภาพที่ 18 ซึ่งจากการทดลอง ทำให้ทราบว่าสามารถใช้ protocol ใหม่ในการตรวจสอบผักแห้งฉายรังสีได้ ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง protocol ใหม่ กับ CEN protocol ไว้ ดังตารางที่ 4



ภาพที่ 18 การเพิ่มขึ้นของ ESR signal intensity จาก parsley (a), perilla (b) และ long green onion (c) ก่อนและหลังฉายรังสี

ที่มา: Ukai *et al.* (2008)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่าง protocol ใหม่ และ CEN protocol สำหรับการตรวจสอบ
ผักแห้งฉายรังสี

	New protocol	N1787 CEN protocol (1996)
Sample preparation (mg)	300	100
Magnetic field (mT)	250 ± 250 330 ± 100	348 center field ^a
Microwave power	Variable 0 – 196 mW	0.4 mW for pistachio nuts 0.8 mW for paprika powder

^a Center field at 9.5 GHz microwave frequency ($g \sim 200$)

ที่มา: Ukai *et al.* (2008)

จากงานวิจัยที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น จะเห็นว่าเทคนิค ESR นั้น มีความสะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ สำหรับการตรวจสอบอาหารฉายรังสี ซึ่งนอกจากการตรวจสอบอาหารฉายรังสีแล้ว ยังมีการนำเทคนิค ESR ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ด้วย เช่น การประเมินค่าปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับเมื่อเกิดอุบัติเหตุทางรังสี และการกำหนดอายุซากสัตว์โบราณ หรือวัตถุโบราณ เป็นต้น

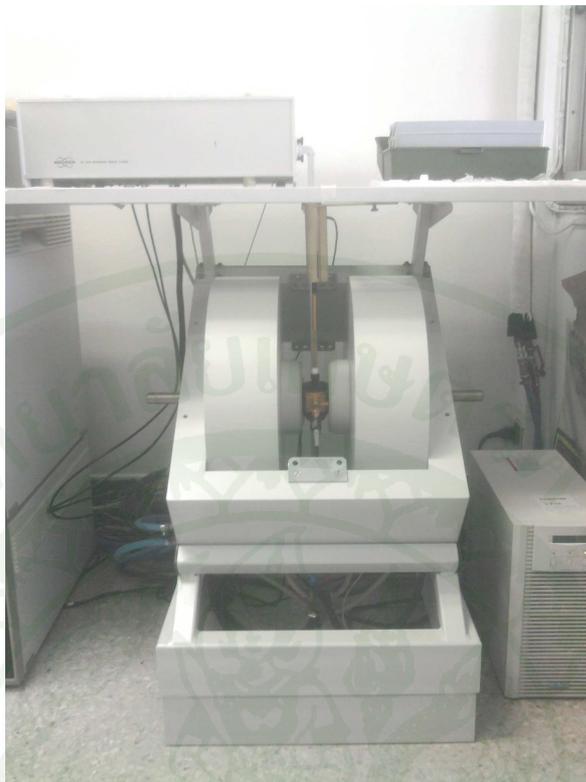
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เส้นหม้อบแห้งตรา ไวไว
2. เครื่องฉายรังสีแกมมา (Gammacell 220) ต้นกำเนิดรังสี Co-60 อัตรารังสี 0.0023 kGy/s
3. Radiochromic film dosimeter FWT-60 (ภาพที่ 19) คุณสมบัติแสดงในภาคผนวก ก
4. เครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX (ภาพที่ 20)
5. ESR tube (ภาพที่ 21)
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม
7. ตู้อบแห้ง (CONTHERM รุ่น Series Five)
8. เครื่องบดตัวอย่าง Retsch ของ Scientific Promotion Co., LTD
9. ถุงซิปลาสติก



ภาพที่ 19 Radiochromic film dosimeter FWT-60



ภาพที่ 20 เครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX



ภาพที่ 21 ESR tube

วิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

นำเส้นหมือบแห้ง มาอบด้วยตู้อบแห้ง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจนหมด จนเส้นหมี่มีลักษณะแห้ง และกรอบ จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด ด้วยเครื่องบดตัวอย่าง จนได้ตัวอย่างเส้นหมี่ที่มีลักษณะเป็นแป้ง และทำการแบ่งใส่ถุงซิปลาสติก โดยบรรจุถุงละประมาณ 50 กรัม จำนวน 6 ถุง ดังภาพที่ 22 เพื่อเตรียมสำหรับนำไปฉายรังสี



ภาพที่ 22 ตัวอย่างเส้นหมี่บดละเอียดบรรจุถุงซิปลาสติกสำหรับนำไปฉายรังสี

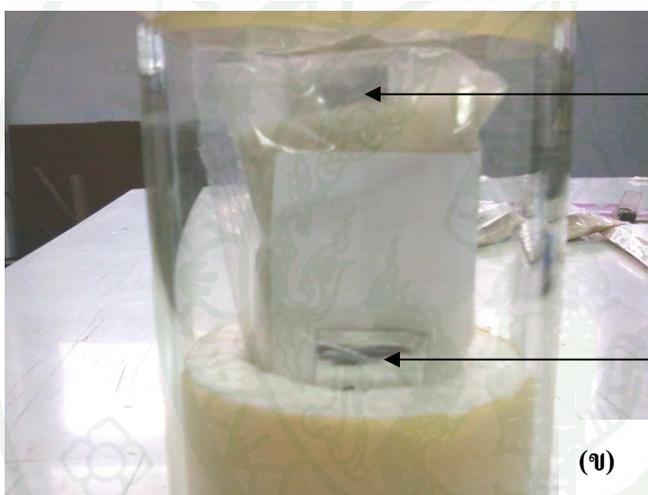
2. การฉายรังสีตัวอย่าง

นำตัวอย่างเส้นหมี่บดละเอียดที่บรรจุในถุงซิปลาสติก มาฉายรังสีด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมา ต้นกำเนิดรังสี Co-60 อัตรารังสี 0.0023 kGy/s โดยแยก 1 ถุง สำหรับเป็นตัวอย่างควบคุม หรือไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และอีก 5 ถุง นำไปฉายรังสีเป็นเวลา 216 , 437, 654, 879 และ 1,321 วินาที เพื่อให้ตัวอย่างเส้นหมี่ได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 0.5, 1, 1.5, 2 และ 3 กิโลเกรย์ ตามลำดับ โดยตรวจสอบปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตัวอย่างได้รับ ด้วย Radiochromic film dosimeter FWT-60 ดังภาพที่ 23



ตำแหน่งสำหรับวาง
ตัวอย่างเพื่อฉายรังสี

(ก)



Radiochromic film dosimeter
ตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสี
ต่ำสุด

Radiochromic film dosimeter
ตำแหน่งที่ได้รับปริมาณรังสี
สูงสุด

(ข)



(ค)

ภาพที่ 23 (ก) เครื่องฉายรังสีแกมมา

(ข) การติด Radiochromic film dosimeter

(ค) ตำแหน่งการวางตัวอย่างในเครื่องฉายรังสีแกมมา

3. การศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR

3.1 นำตัวอย่างเส้นหมึบดละเอียด ที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 3 กิโลเกรย์ มาชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 300 มิลลิกรัม โดยบรรจุลงในถุงซิปลาสติกขนาดเล็ก เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการใช้ในการตรวจสอบตัวอย่างเส้นหมึ

3.2 นำตัวอย่างที่มีน้ำหนักประมาณ 300 มิลลิกรัม บรรจุลงใน ESR tube แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ ด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX ดังภาพที่ 24 เพื่อหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR ตามวิธีมาตรฐานของ CEN (European Standard EN 1787, 2000)



ภาพที่ 24 การบรรจุ ESR tube ใน cavity ของเครื่อง ESR

3.2.1 การปรับค่า Center field ทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยหาดำแหน่งที่เกิด ESR spectra ซึ่งทำได้โดยการ ตั้งค่า Center field เริ่มต้นที่ 3500 G และปรับค่า Sweep width ให้มาก

เพียงพอ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุม ESR spectra มากที่สุด จากนั้นปรับให้ ESR spectra อยู่กึ่งกลางของภาพ

3.2.2 การปรับค่า Sweep width เมื่อได้ ESR spectra ที่มีตำแหน่งอยู่กึ่งกลางของภาพ แล้วให้ทำการปรับค่า Sweep width ลดลง เพื่อให้จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดของ ESR spectra มีความเหมาะสมตามลักษณะความกว้างของ ESR spectra ที่เกิดขึ้น

3.2.3 การปรับค่า Receiver gain ทำการปรับ โดยเพิ่มค่า Receiver gain มากขึ้นเรื่อยๆ จน ESR spectra มีความสูงที่เหมาะสม

3.2.4 การหาค่า Microwave power ทำการตรวจวัดอนุมูลอิสระ โดยเริ่มจากการตั้งค่า Microwave power ที่ 0.4 mW แล้วหาค่า ESR signal intensity หรือ Peak-to-peak amplitude ซึ่งเป็นผลรวมของค่า intensity ที่ตำแหน่งสูงสุด และต่ำสุด จากนั้นค่อยๆ เพิ่มค่า Microwave power ให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 20 mW นำค่า ESR signal intensity ที่ได้ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal intensity กับรากที่สองของ Microwave power เพื่อให้ได้ค่า Microwave power ที่เหมาะสม

3.2.5 การปรับค่า Modulation amplitude โดยการตั้งค่า Modulation amplitude ให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนได้ ESR spectra ที่มีเส้นของสเปกตรัมที่มีลักษณะเรียบมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ได้ค่า Modulation amplitude ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

4. ศึกษาลักษณะของ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี

นำตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสี และที่ผ่านการฉายรังสี ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 0.5, 1, 1.5, 2 และ 3 กิโลเกรย์ มาซึ่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 300 มิลลิกรัม แล้วนำมาบรรจุลงใน ESR tube ตั้งค่าสภาวะการทำงานของเครื่อง ESR ตามสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 3. และทำการตรวจวัดอนุมูลอิสระภายในตัวอย่างๆ ละ 3 ครั้ง จากนั้นทำการเปรียบเทียบ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ เปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และพิจารณาจากค่า g -factor

5. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน หรือ Dose - response curve

นำค่า ESR signal intensity จาก ESR spectra ของทุกตัวอย่างที่ได้จากข้อ 4. มาหาค่าเฉลี่ย แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน และหาสมการของความสัมพันธ์ กับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

6. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

ทำการแบ่งตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีทุกตัวอย่าง รวมทั้งตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ออกเป็น 2 ส่วน แต่ละส่วนนำไปบรรจุในถุงซิปลาสติก เพื่อแยกกลุ่มในการเก็บรักษาตัวอย่างที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างในแต่ละกลุ่มนั้น จะนำไปใส่ในถุงดำก่อนนำไปเก็บ เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างถูกแสง โดยปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบอาหารฉายรังสีที่ได้ ทำการศึกษา มี 2 ปัจจัย ได้แก่

6.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้เก็บรักษาตัวอย่าง หลังการฉายรังสี โดยทำการแยกเก็บตัวอย่าง ในช่องแข็งตู้เย็น (-18 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส)

6.2 ผลของระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาตัวอย่าง หลังจากการฉายรังสี โดยทำการตรวจวัด อนุมูลอิสระในตัวอย่างที่แยกเก็บที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2, 3, 4, 8, 12, 16, 20 และ 24 สัปดาห์

7. สถานที่ทำการวิจัย

7.1 ห้องปฏิบัติการของสำนักสนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยทางรังสี สำนักงาน ปรมาณูเพื่อสันติ

7.2 ห้องเตรียมปฏิบัติการ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

8. ระยะเวลาทำการวิจัย

ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2552 ถึง เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2553

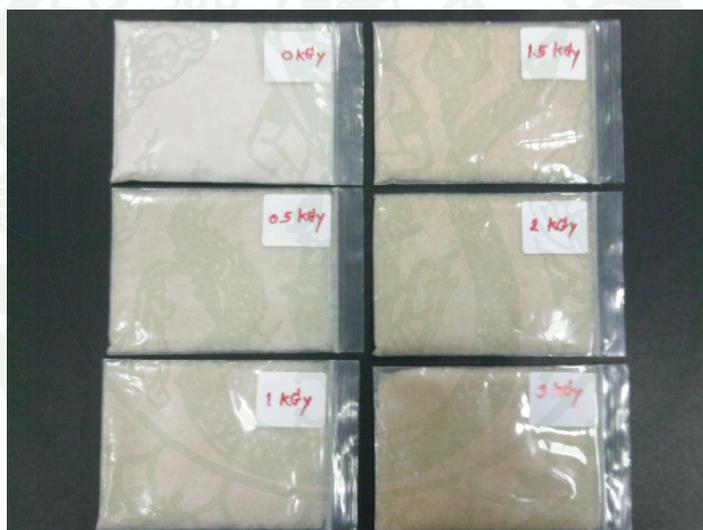


ผลและวิจารณ์

ผล

1. การเตรียม และฉายรังสีตัวอย่างเส้นไหม

ตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีในช่วงปริมาณรังสี 0.5 - 3 กิโลเกรย์ พบว่า มีการเปลี่ยนแปลง คือ มีสีเข้มขึ้นตามปริมาณรังสีที่ได้รับ ดังภาพที่ 25 ซึ่งปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตัวอย่างได้รับเมื่อทำการตรวจวัดด้วย Radiochromic film dosimeter พบว่า มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4 % (ผลแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 ก)



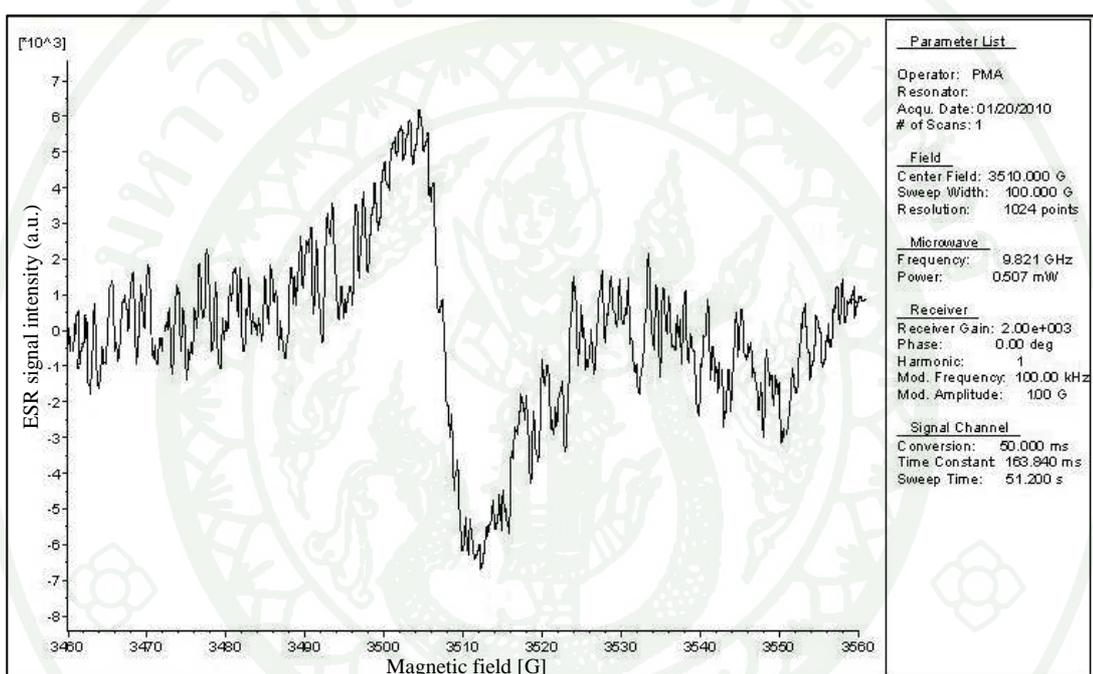
ภาพที่ 25 สีของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากผ่านการฉายรังสี

2. การศึกษาสถานะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR

2.1 การปรับค่า Center field เมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยการ ตั้งค่า Center field ที่ 3500 G และปรับค่า Sweep width 200 G เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุม ESR spectra มากที่สุด แล้วปรับให้ ESR spectra อยู่กึ่งกลางของภาพ พบว่า ได้ค่า Center field ที่ 3510 G

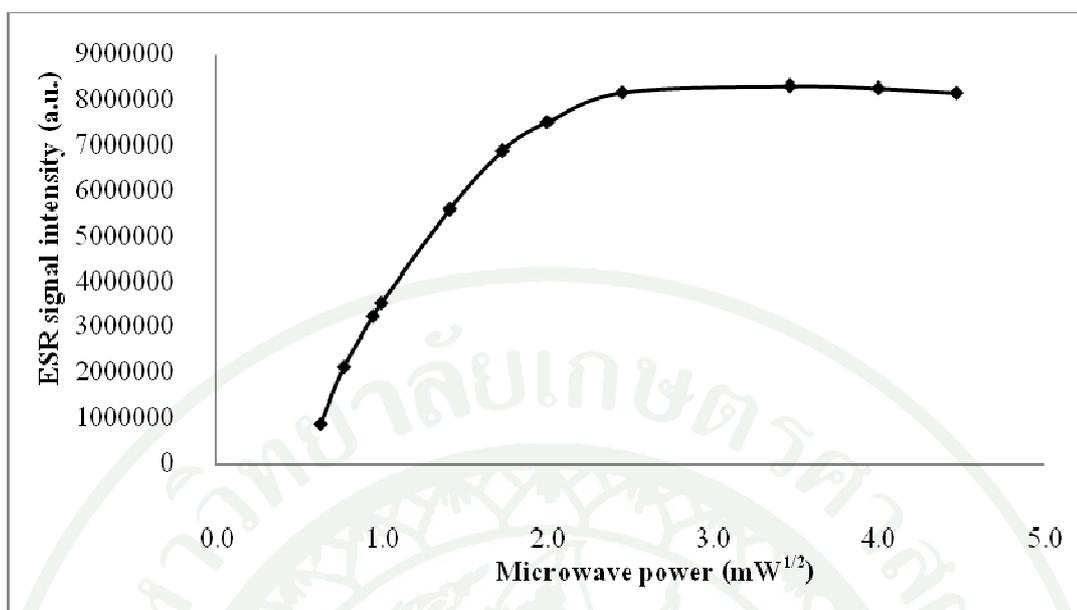
2.2 การปรับค่า Sweep width เมื่อได้ ESR spectra ที่มีตำแหน่งอยู่ตรงกลางของ magnetic field แล้วจึงทำการปรับค่า Sweep width ให้เหมาะสมตามลักษณะความกว้างของสเปกตรัมที่เกิดขึ้น พบว่า ได้ค่า Sweep width ที่ 100 G

2.3 การปรับค่า Receiver gain เมื่อทำการปรับ โดยให้ปรับเพิ่มค่า Receiver gain มากขึ้นเรื่อยๆ จน ESR spectra มีความสูงที่เหมาะสม พบว่า ได้ค่า Receiver gain ที่ 2×10^3 G และได้ ESR spectra ดังภาพที่ 26



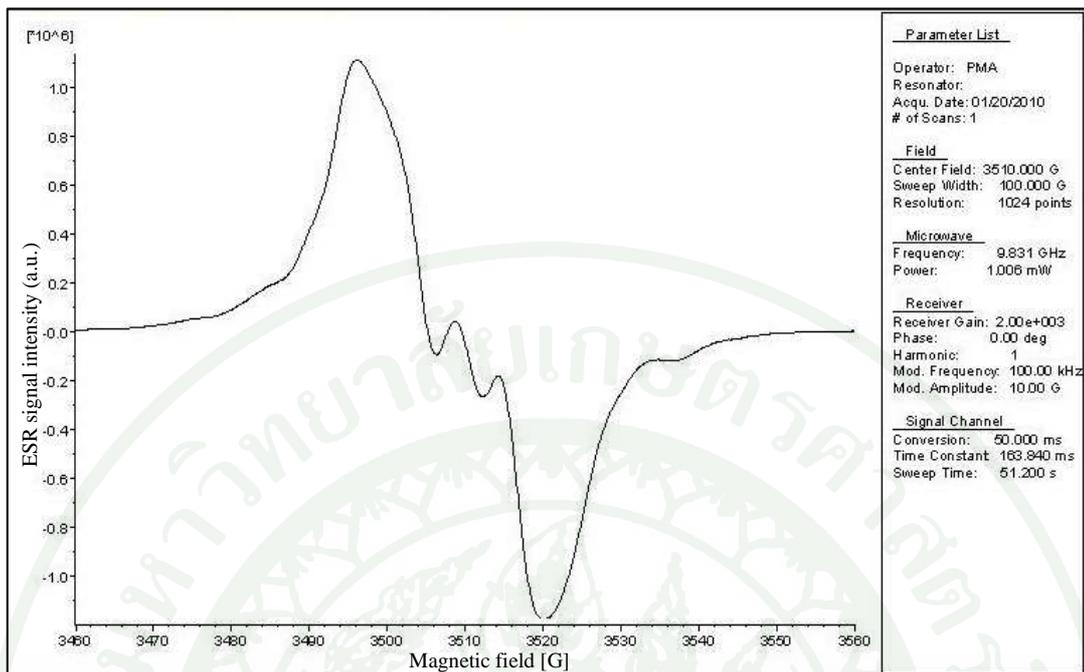
ภาพที่ 26 ESR spectra ที่มีตำแหน่ง และความสูงที่เหมาะสม

2.4 การหาค่า Microwave power เมื่อเพิ่มค่า Microwave power จาก 0.4 mW ไปจนถึง 20 mW พบว่า ESR signal intensity มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จาก 0.4 mW ถึง 2 mW จากนั้นค่า ESR signal intensity จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น แล้วเริ่มคงที่ เมื่อใช้ค่า Microwave power จาก 6 mW จนถึง 20 mW ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 ข สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ESR signal intensity กับรากที่สองของ Microwave power ได้ ดังภาพที่ 27 ซึ่งพบว่า ค่า Microwave power ที่เหมาะสม คือ 1 mW



ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับ รากที่สองของ Microwave power ของตัวอย่างเส้นไหมฉายรังสี ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 3 กิโลเกรย์

2.5 การปรับค่า Modulation amplitude เมื่อทำการปรับ จนได้ ESR spectra ที่มีเส้นของสเปกตรัมที่มีลักษณะเรียบแล้ว จะทำให้ได้ค่า Modulation amplitude ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดคือ 10 G และได้ ESR spectra ดังภาพที่ 28



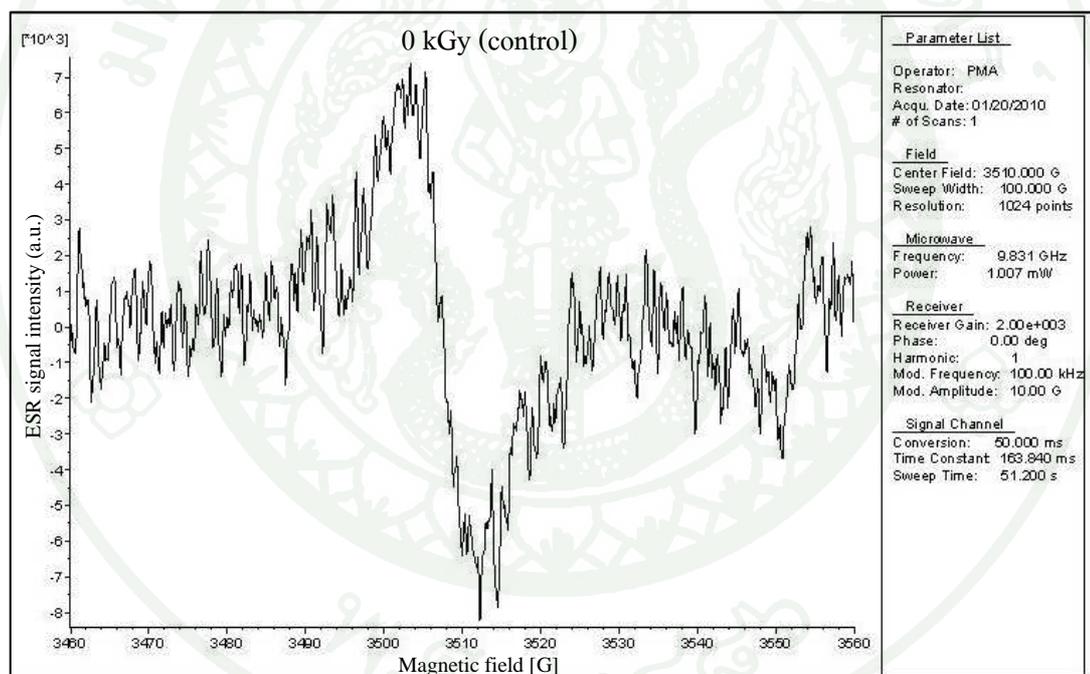
ภาพที่ 28 ESR spectra ของตัวอย่างภายหลังจากการปรับ Modulation amplitude

จากการทดลอง สามารถหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเส้นไหมได้ ดังนี้

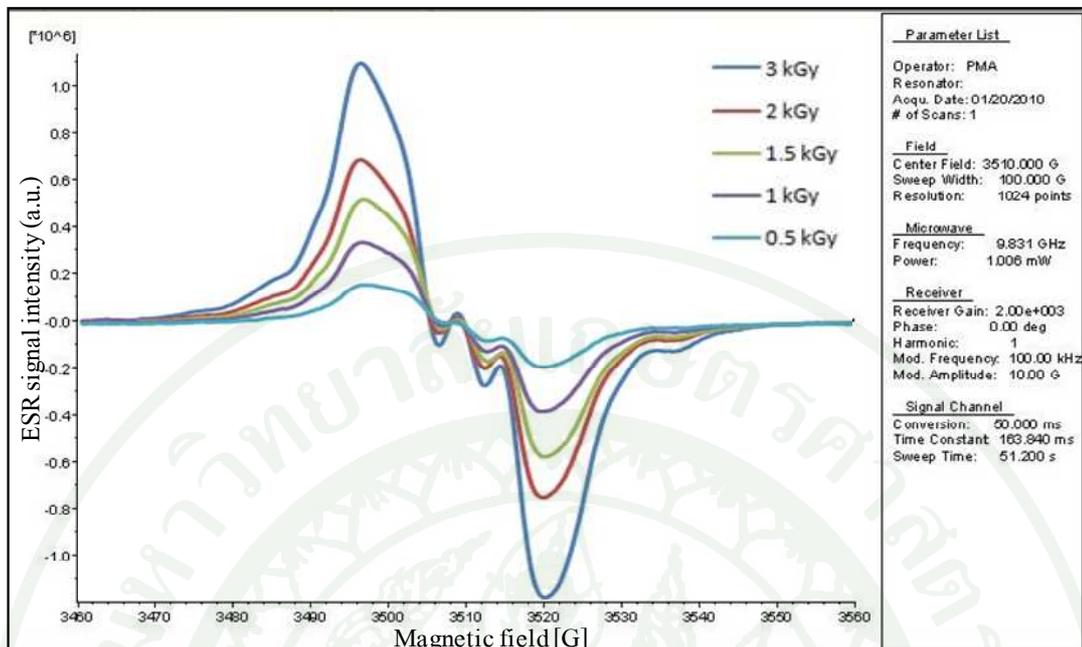
Microwave frequency	=	9.826	GHz
Microwave power	=	1.0	mW
Center field	=	3510	G
Sweep width	=	100	G
Modulation frequency	=	100	kHz
Modulation amplitude	=	10	G
Receiver gain	=	2×10^3	G
Time constant	=	163.84	ms
Sweep time	=	51.2	s

3. ศึกษาลักษณะของ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี

เมื่อนำค่าสภาวะการทำงานของเครื่อง ESR ที่ได้จากการทดลองข้างต้น มาใช้ในการตรวจสอบอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 3 กิโลเกรย์ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี พบว่า ลักษณะของ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีต่างๆ จะมีลักษณะที่คล้ายกัน คือเป็นพีคคู่ มีค่า g -factor ของพีคที่ตำแหน่งสูงสุด และต่ำสุด เท่ากับ 2.0081 และ 1.9945 ตามลำดับ โดยมีค่า g -factor ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เท่ากับ 2.0001 ทั้งนี้ ตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ดังภาพที่ 29 จะมีค่า ESR signal intensity ต่ำมาก ในขณะที่ ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี ตั้งแต่ 0.5 - 3 กิโลเกรย์ มีค่า ESR signal intensity มากขึ้นตามลำดับ ดังภาพที่ 30



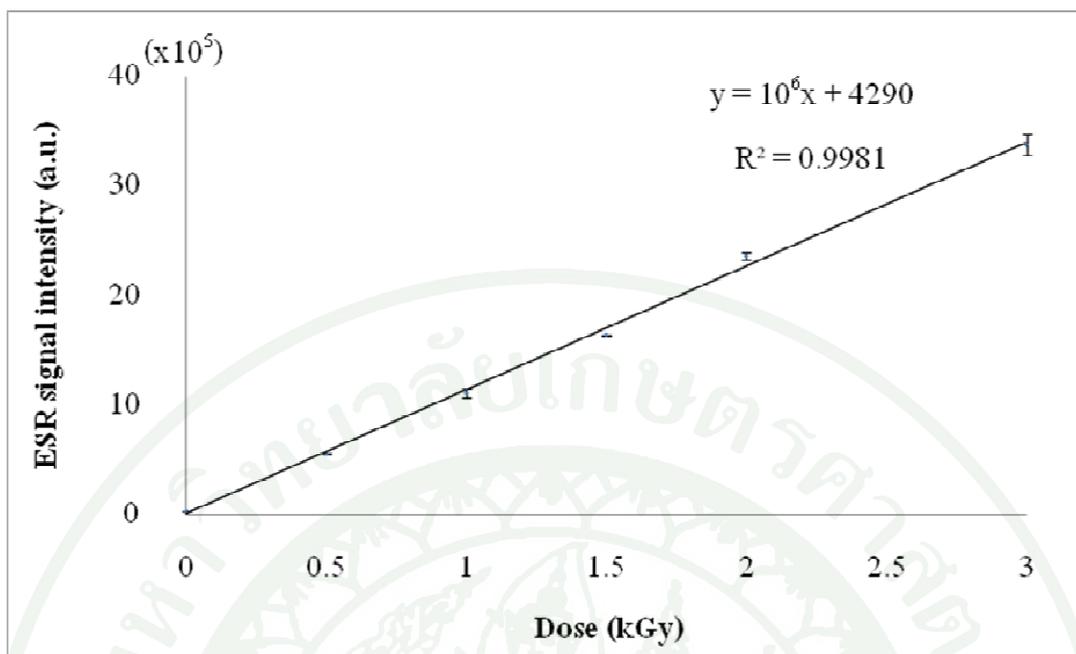
ภาพที่ 29 ESR spectra ของตัวอย่างเส้นไหมที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี



ภาพที่ 30 ESR spectra ของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 0.5 - 3 กิโลเกรย์

4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน หรือ Dose - response curve

จาก ESR spectra ที่ได้จากทุกตัวอย่าง เมื่อทำการหาค่า ESR signal intensity แล้ว พบว่า ESR signal intensity มีค่ามากขึ้น เมื่อตัวอย่างได้ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสีสูงขึ้น และเมื่อนำค่า ESR signal intensity ของทุกตัวอย่าง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสี หรือ Dose - response curve พบว่า ได้กราฟเส้นตรง ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ $y = 10^6 x + 4,290$ เมื่อ y คือ ESR signal intensity (a.u.) และ x คือ ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง (กิโลเกรย์) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9981 ดังภาพที่ 31



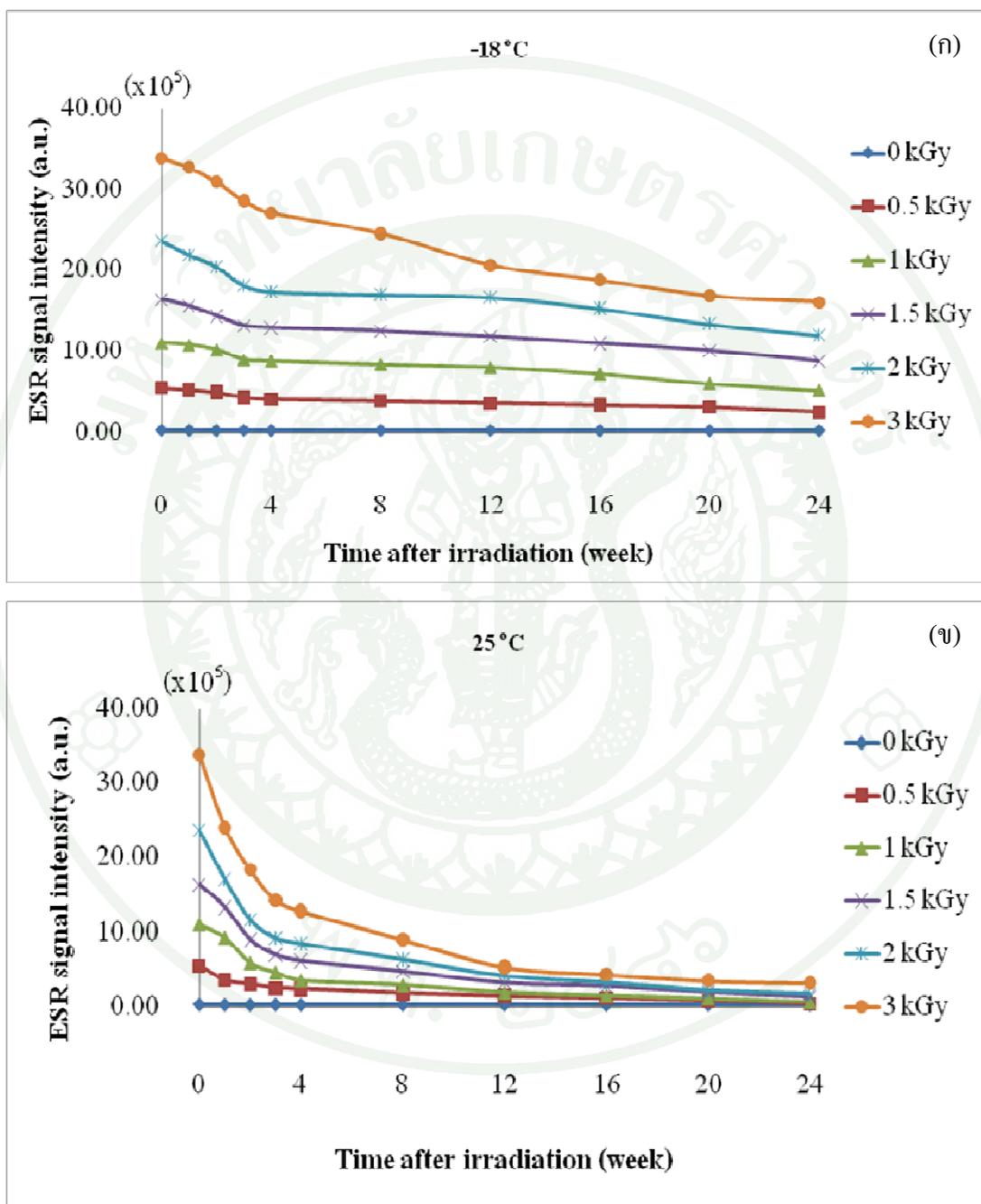
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับ ปริมาณรังสีดูดกลืนต่างๆ ที่ใช้ฉาย ตัวอย่างเส้นหมึ หรือ Dose - response curve

5. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

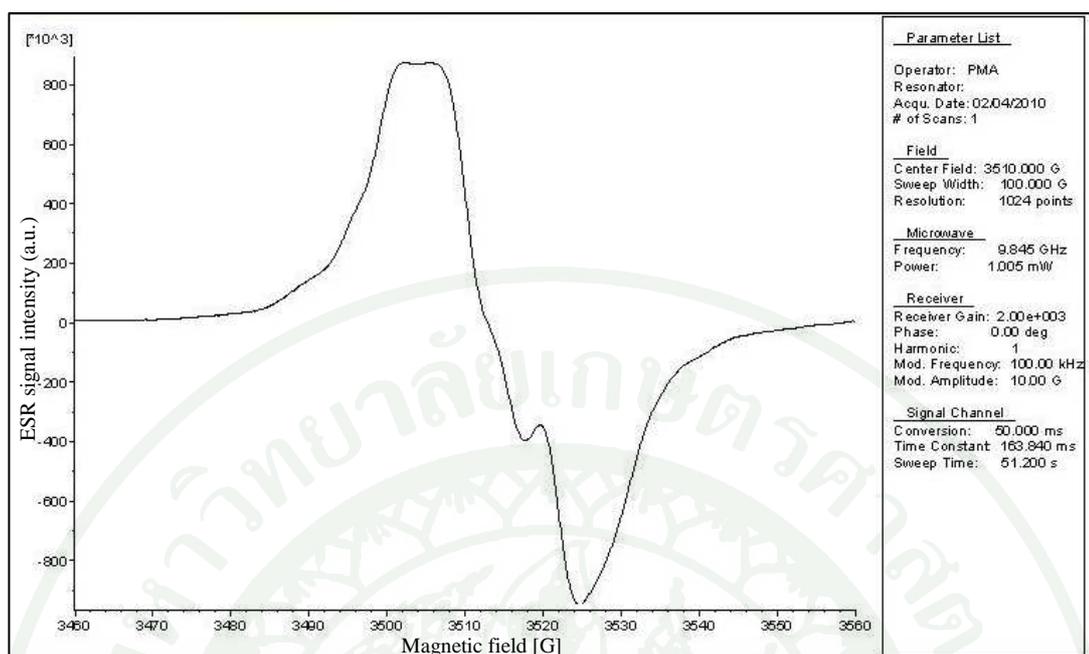
การทดลองนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบเส้นหมึฉายรังสี โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่าง หลังจากการฉายรังสี ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้ ถือเป็นสิ่งสำคัญที่มีผลต่อการประเมินความถูกต้องในการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

จากการเก็บตัวอย่างในช่องแข็งตู้เย็น (-18 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน 6 เดือน พบว่า ESR signal intensity มีค่าลดลงตามเวลาที่เก็บตัวอย่าง โดยตัวอย่างเส้นหมึฉายรังสีที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีการลดลงของ ESR signal intensity น้อยกว่าตัวอย่างเส้นหมึฉายรังสีที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 32 นอกจากนี้ เมื่อเก็บตัวอย่างไว้นานขึ้น ยังพบว่า ESR spectra มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป โดยพิคเล็กๆ ที่อยู่กึ่งกลางจะหายไป ดังภาพที่ 33 ซึ่งตัวอย่างที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ลักษณะ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีที่ปริมาณรังสี 0.5 และ 1 กิโลเกรย์ เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน 2 สัปดาห์ ส่วนที่ปริมาณรังสี 1.5, 2 และ 3 กิโลเกรย์ เริ่มมี

การเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน 3 เดือน ขณะที่ตัวอย่างทุกปริมาณรังสี ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ลักษณะของ ESR spectra เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน 2 สัปดาห์



ภาพที่ 32 การเปลี่ยนแปลงของ ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีที่ 0.5 - 3 kGy ที่เก็บที่อุณหภูมิ (ก) -18 องศาเซลเซียส และ (ข) 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 - 24 สัปดาห์



ภาพที่ 33 ลักษณะ ESR spectra ของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสี 3 กิโลเกรย์ เก็บที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 2 สัปดาห์

สำหรับที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อทำการเก็บตัวอย่างไว้เป็นระยะเวลาสั้น ESR signal intensity ก็มีการลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5 และเมื่อเปรียบเทียบค่า ร้อยละการลดลงของ ESR signal intensity พบว่า ที่ระยะเวลา 6 เดือน ตัวอย่างเส้นไหมฉายรังสีที่ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีการลดลงของ ESR signal intensity ประมาณร้อยละ 50 ในขณะที่ตัวอย่างเส้นไหมฉายรังสีที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีการลดลงของ ESR signal intensity สูงถึงประมาณร้อยละ 90 ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างกัน ภายหลังจากการฉายรังสี

T (°C)	Absorbed dose (kGy)	ESR signal intensity (a.u.) ($\times 10^5$)									
		Time after irradiation (week)									
		0	1	2	3	4	8	12	16	20	24
-18	0	0.32	0.32	0.30	0.32	0.29	0.30	0.30	0.28	0.27	0.28
	0.5	5.56*	5.34*	5.00*	4.41*	4.17*	3.95*	3.70*	3.43*	3.18*	2.56*
	1.0	11.12*	10.87*	10.26*	9.06*	8.90*	8.45*	8.08*	7.27*	6.08*	5.22*
	1.5	16.43*	15.63*	14.42*	13.20*	12.96*	12.50*	11.86*	11.01*	10.12*	8.81*
	2.0	23.64*	21.90*	20.46*	18.12*	17.37*	17.02*	16.69*	15.32*	13.40*	12.01*
	3.0	33.81*	32.67*	30.89*	28.59*	27.08*	24.59*	20.68*	18.82*	16.89*	16.15*
25	0	0.32	0.29	0.29	0.31	0.29	0.30	0.31	0.28	0.28	0.28
	0.5	5.56*	3.64*	3.11*	2.60*	2.49*	1.92*	1.51*	1.25*	0.89*	0.52*
	1.0	11.12*	9.37*	5.98*	4.70*	3.64*	3.02*	2.05*	1.60*	1.22*	0.74*
	1.5	16.43*	13.35*	9.02*	6.97*	6.19*	4.77*	3.22*	2.80*	1.99*	1.39*
	2.0	23.64*	17.15*	11.67*	9.25*	8.52*	6.39*	4.20*	3.32*	2.28*	1.83*
	3.0	33.81*	24.08*	18.39*	14.30*	12.86*	9.03*	5.35*	4.35*	3.49*	3.20*

* Significant difference from control (0 kGy, 0 week) at $p < 0.05$

ตารางที่ 6 การลดลงของ ESR signal intensity ตามระยะเวลา และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี

T (°C)	Absorbed dose (kGy)	Fading of ESR intensity (%)								
		Time after irradiation (week)								
		1	2	3	4	8	12	16	20	24
-18	0	0.5	6.2	0.4	8.6	5.9	5.5	11.5	15.2	10.9
	0.5	4.0	10.1	20.7	24.9	29.0	33.5	38.2	42.8	54.0
	1.0	2.3	7.8	18.5	20.0	24.0	27.3	34.6	45.3	53.1
	1.5	4.9	12.3	19.7	21.1	23.9	27.8	33.0	38.4	46.4
	2.0	7.3	13.4	23.3	26.5	28.0	29.4	35.2	43.3	49.2
	3.0	3.4	8.6	15.4	19.9	27.3	38.8	44.3	50.0	52.2
25	0	8.4	10.5	2.1	9.2	6.7	4.5	11.3	11.2	12.2
	0.5	34.6	44.1	53.3	55.3	65.5	72.8	77.5	83.9	90.7
	1.0	15.8	46.3	57.7	67.3	72.8	81.6	85.6	89.0	93.3
	1.5	18.7	45.1	57.6	62.3	71.0	80.4	83.0	87.9	91.5
	2.0	27.4	50.6	60.9	64.0	72.9	82.2	85.9	90.3	92.2
	3.0	28.8	45.6	57.7	62.0	73.3	84.2	87.1	89.7	90.5

วิจารณ์

1. การเตรียม และฉายรังสีตัวอย่าง

ตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสี ตั้งแต่ 0.5 - 3 กิโลเกรย์ มีสีเข้มขึ้นตามลำดับ ตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอัตรารังสีของเครื่องฉายรังสีที่ใช้ มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงต้องใช้ระยะเวลาในการฉายรังสีนาน ซึ่งส่งผลให้สีเข้มขึ้นได้ สำหรับปริมาณตัวอย่างเส้นไหมที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ พบว่า น้ำหนักตัวอย่าง 300 มิลลิกรัม เป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับการตรวจสอบการฉายรังสีในเส้นไหม ด้วยเทคนิค ESR เช่นเดียวกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003) ซึ่งใช้ตัวอย่างข้าวเจ้า ปริมาณ 300 มิลลิกรัม และ Shimoyama *et al.* (2006) ใช้ตัวอย่างแป้งสาลี ปริมาณ 300 มิลลิกรัม เพื่อตรวจสอบการฉายรังสี ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีการเตรียมตัวอย่างโดยการอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนตัวอย่างแห้ง เนื่องจากหากตัวอย่างมีความชื้น ปริมาณน้ำที่อยู่ในตัวอย่าง สามารถดูดกลืน Microwave power (Douifi *et al.*, 1998) ซึ่งอาจส่งผลต่อ ESR signal intensity และยังจำเป็นต้องบดตัวอย่างให้ละเอียดที่สุด เพื่อให้ตัวอย่างมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะช่วยให้ ESR signal intensity มีความคงที่

2. การศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่อง ESR

ค่าสภาวะการทำงานต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการตรวจสอบเส้นไหมฉายรังสีด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX โดยค่าที่ได้ นั้นมีความใกล้เคียงกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003) ซึ่งได้ทำการทดลองตรวจสอบข้าวเจ้าฉายรังสี ส่วนค่า Microwave power ที่เลือกใช้ คือ 1 mW เนื่องจากค่า Microwave power ดังกล่าว ทำให้ได้ ESR signal intensity มากที่สุด อีกทั้งอยู่ในช่วงที่ถือว่ามีการตอบสนองต่อรังสีเป็นเส้นตรง และเพื่อหลีกเลี่ยงผลของความอิ่มตัวของ ESR signal intensity (Microwave power saturation effect) เช่นเดียวกับการทดลองของ Ukai *et al.* (2008)

3. การศึกษาลักษณะของ ESR spectra ของตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี

จาก ESR spectra ที่ได้ แสดงให้เห็นตำแหน่งของค่า g -factor ของพีคที่ตำแหน่งสูงสุด และต่ำสุด เท่ากับ 2.0081 และ 1.9945 ตามลำดับ ส่วนค่า g -factor ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง เท่ากับ

2.0001 โดยค่า g -factor ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ซึ่งค่า g -factor ทั้ง 2 ค่า แสดงถึงชนิดของอนุมูลอิสระ คือ Carbohydrate radical I และ II ดังภาพที่ 5 ที่เกิดขึ้นภายใน ตัวอย่างหลังจากผ่านการฉายรังสี เช่นเดียวกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003) ซึ่งได้ทำการ ทดลองตรวจสอบซ้ำเข้าฉายรังสี โดยตรวจพบอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น 2 ชนิด โดยในการตรวจสอบ เส้นหมีฉายรังสีนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ผลแล้ว จะสามารถเห็นความแตกต่างของ ESR spectra ระหว่างตัวอย่างเส้นหมีที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี และที่ผ่านการฉายรังสี อย่างชัดเจน สอดคล้องกับ การทดลองของ Shimoyama *et al.* (2006) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบการฉายรังสีในตัวอย่างแป้งสาลี พบว่า สามารถใช้ ESR spectra ในการแยกแยะระหว่าง ตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสี ออกจาก ตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสี ได้อย่างชัดเจน

4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ESR signal intensity กับปริมาณรังสีดูดกลืน หรือ Dose - response curve

จาก Dose - response curve ที่ได้ พบว่า ค่า ESR signal intensity มีค่ามากขึ้นตามปริมาณ รังสี แสดงถึงปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น แปรตามปริมาณรังสีดูดกลืนที่เส้นหมีได้รับ เช่นเดียวกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003) และ Bartolotta *et al.* (2007) ซึ่งได้ทำการทดลอง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองของตัวอย่างต่อปริมาณรังสีที่ได้รับ พบว่า เมื่อตัวอย่างได้รับปริมาณ รังสีมากขึ้นการตอบสนองต่อรังสีก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดย curve ที่ได้ มีลักษณะใกล้เคียงกับ เส้นตรงมาก เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9981 ซึ่ง Dose - response curve ที่ได้นี้ สามารถนำไปใช้ตรวจสอบเส้นหมีฉายรังสี ด้วยเครื่อง Electron Spin Resonance (ESR) model Bruker EMX ซึ่งทำได้โดยการนำตัวอย่างเส้นหมีที่ไม่ทราบว่าเป็นการฉายรังสีหรือไม่ มา ทำการวิเคราะห์ โดยตั้งค่าสภาวะการทำงานของเครื่อง ESR ตามที่ได้จากการทดลอง แล้วนำค่า ESR signal intensity ที่ได้ ไปเปรียบเทียบกับ Dose - response curve โดยนำไปแทนค่าในสมการ จะทำให้ทราบปริมาณรังสีที่ตัวอย่างได้รับ เช่นเดียวกับการทดลองของ Bartolotta *et al.* (2007) ซึ่ง ได้ทำการทดลองตรวจสอบปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่างไก่ฉายรังสี

5. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของ ESR signal intensity นั้น พบว่า อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาตัวอย่างหลังจากการฉายรังสี ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความถูกต้องของการตรวจสอบอาหารฉายรังสี

จากการทดลองตรวจสอบเส้นหมี่ฉายรังสี พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อ ESR signal intensity โดยเมื่อเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีผลให้ ESR signal intensity ลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่ การเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะทำให้ ESR signal intensity ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Bartolotta *et al.* (2007) ซึ่งได้ทำการทดลองเก็บตัวอย่างไก่ฉายรังสี ไว้ที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 120 วัน เมื่อนำมาตรวจสอบ พบว่า ESR signal intensity ของตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเหลือร้อยละ 85 ในขณะที่ ESR signal intensity ของตัวอย่างที่เก็บที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงเหลือเพียงร้อยละ 65 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิสูงๆ มีผลทำให้อนุมูลอิสระเกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็ว

ส่วนที่อุณหภูมิเดียวกัน เวลาที่ใช้เก็บตัวอย่างหลังจากได้รับการฉายรังสีแล้วเป็นระยะเวลา 6 เดือน พบว่า ESR signal intensity มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่นานขึ้นด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003) ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเจ้าฉายรังสี ที่เก็บไว้เป็นเวลานาน 52 วัน แล้วนำมาตรวจสอบ พบว่า ESR signal intensity ที่วิเคราะห์ได้ มีการลดลงอย่างรวดเร็ว และการทดลองของ Mastro *et al.* (2007) ซึ่งได้ทำการตรวจสอบถั่วเหลืองฉายรังสี ที่เก็บไว้เป็นเวลานาน 200 วัน โดย ESR signal intensity ที่วิเคราะห์ได้ มีค่าลดลงไปเรื่อยๆ เช่นกัน เนื่องจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ไม่มีเสถียรภาพ เมื่อเก็บไว้เป็นเวลานานขึ้น อนุมูลอิสระจึงเกิดการสลายตัวไป โดยผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้เก็บรักษาหลังการฉายรังสี นอกจากทำให้ ESR signal intensity ลดลงแล้ว ยังทำให้ ESR spectra มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปอีกด้วย เช่นเดียวกับการทดลองของ Polat *et al.* (2003)

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นหมี่ที่ผ่านการฉายรังสีทุกตัวอย่าง แม้แต่ที่ปริมาณรังสีแตกต่างกันเพียง 0.5 กิโลเกรย์ ซึ่งเก็บรักษาเป็นระยะ

เวลานาน 6 เดือน ก็ยังคงมีความแตกต่างจาก ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 (ตารางที่ 5)

จากการทดลองทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า สามารถใช้เทคนิค ESR ในการตรวจพิสูจน์การฉายรังสีในเส้นไหมเชิงคุณภาพได้ ซึ่งในการตรวจสอบเส้นไหมว่าผ่านการฉายรังสีหรือไม่นั้น สามารถพิจารณาได้จาก ESR spectra แม้ตัวอย่างจะผ่านการฉายรังสีนานถึง 6 เดือน และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) ก็ตาม ส่วนการตรวจสอบเชิงปริมาณ ก็สามารถทำได้เช่นกัน โดยเปรียบเทียบจาก Dose - response curve แต่มีข้อจำกัดจากอิทธิพลของอุณหภูมิ และเวลาที่เก็บหลังการฉายรังสีที่ส่งผลให้ ESR signal intensity มีค่าลดลงตามเวลาที่เก็บ ซึ่งในทางปฏิบัติ การตรวจสอบปริมาณรังสีคู่กลืนที่ตัวอย่างเส้นไหมได้รับนั้น อาจทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถทราบได้ว่า ตัวอย่างนั้นผ่านการฉายรังสีมานานเท่าไร

ตั้งแต่ 0.5 - 3 กิโลกรัม ได้อย่างถูกต้อง แม้เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นาน 6 เดือน หลังจากการฉายรังสี

4. การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

สามารถตรวจวัดค่า ESR signal intensity ที่วิเคราะห์ได้จากตัวอย่าง แล้วนำไปหาค่า ปริมาณรังสีดูดกลืน จากสมการ $y = 10^6 x + 4,290$ เมื่อ y คือ ESR signal intensity (a.u.) และ x คือ ปริมาณรังสีดูดกลืนในตัวอย่าง (กิโลกรัม) โดยสมการดังกล่าว จะใช้วิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง ในกรณีที่ทำกรวิเคราะห์ทันทีหลังจากตัวอย่างได้ผ่านการฉายรังสี เนื่องจากมีการลดลงของสัญญาณ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ และเวลาที่เก็บรักษาตัวอย่าง

ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาคอุตสาหกรรม ในการตรวจ พิสูจน์อาหารฉายรังสี ด้วยเทคนิค ESR นอกจากนี้ ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบวัตถุดิบ ประเภทข้าว หรือแป้ง ก่อนนำมาแปรรูปได้อีกด้วย จึงเป็นการสร้างความมั่นใจให้กับอุตสาหกรรม อาหารส่งออกของไทย

ข้อเสนอแนะ

เทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ถือเป็นเทคนิคที่มีความสะดวก รวดเร็ว และมี ประสิทธิภาพ เนื่องจากมีความไวสูง และมีความแม่นยำ ซึ่งในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีนั้น ได้มีการนำเทคนิคนี้ ไปใช้ในการตรวจสอบอาหารหลายๆ ชนิด นอกจากนั้น ยังได้มีการนำเทคนิค นี้ไปประยุกต์ใช้ ในงานวิจัยต่างๆ เช่น การประเมินค่าปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับ เมื่อเกิดอุบัติเหตุ ทางรังสี และการกำหนดอายุซากสัตว์โบราณ หรือวัตถุโบราณ เป็นต้น แต่ก็มีข้อจำกัด คือ เครื่อง Electron Spin Resonance นั้น มีราคาสูง นอกจากนี้ ในการตรวจสอบอาหารฉายรังสีนั้น จำเป็นต้องมีการศึกษาวิจัยต่างๆ เพิ่มเติม เพื่อใช้ในการพัฒนาเทคนิคนี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น

1. การศึกษาผลของความชื้นของตัวอย่าง ที่มีต่อ ESR signal intensity
2. การศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้เก็บรักษาตัวอย่างหลังการฉายรังสี ที่นานขึ้น

3. การประเมินปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตัวอย่างได้รับ เมื่อผ่านการฉายรังสีมาเป็นเวลานาน

4. ผลของปัจจัยอื่นๆ เช่น แสงสว่าง และการบดตัวอย่าง เนื่องจากในความเป็นจริง การนำตัวอย่างมาตรวจสอบ ตัวอย่างนั้นจะผ่านการฉายรังสีมาก่อน แล้วจึงนำมาบดเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ แต่ในการทดลองได้ทำการบดตัวอย่างก่อน แล้วจึงนำไปฉายรังสี เพื่อหลีกเลี่ยงอนุมูลอิสระที่อาจเกิดขึ้นจากการบด

5. เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบเส้นหมีฉายรังสีได้จริง จึงควรทำการตรวจสอบการฉายรังสีในตัวอย่างจริง โดยทดสอบกับตัวอย่างเส้นหมีที่ไม่ทราบค่า ผ่านการฉายรังสีหรือไม่ รวมทั้งไม่ทราบปริมาณรังสีที่ฉาย (blind samples) และประเมินความถูกต้องของผลการตรวจสอบ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์ และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2547. สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ราชกิจจานุเบกษา. 2549. ฉบับประกาศและงานทั่วไป เล่ม 123 ตอนพิเศษ 93 ง หน้า 12-15 เรื่อง
“อาหารฉายรังสี” ลงวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2549. สำนักพิมพ์คณะรัฐมนตรีและ
ราชกิจจานุเบกษา, กรุงเทพฯ.
- เสาวพงศ์ เจริญ และ สุรศักดิ์ สัจจนุตร. 2550. รู้ได้อย่างไรว่าอาหารนี้ผ่านการฉายรังสีแล้วหรือยัง.
แหล่งเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์. แหล่งที่มา:
<http://www.tint.or.th/nkc/nkc5002/nkc5002y.html>, 3 กันยายน 2553.
- สำนักงานที่ปรึกษาการเกษตรต่างประเทศ ประจำสหภาพยุโรป. 2550. กรองยุโรปเพื่อไทย.
กฎระเบียบ EU. แหล่งที่มา: <http://news.thaieurope.net/content/view/2355/215/>,
3 กันยายน 2553.
- Barbosa-Canovas, G.V., U.R. Pothakamury, E. Palou and B.G. Swanson. 1998. **Nonthermal Preservation of Foods**. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Bartolotta, A., A. Parlato, E. Calderaro, M.C. D'Oca, M. Brai, M. Marrale and L. Tranchina.
2006. Application of the spectroscopy to estimate the original dose in irradiated
chicken bone. **Radiat. Phys. Chem.** 76, 1466-1469.
- Bayram, G. and H. Delincee. 2004. Identification of irradiated Turkish foodstuffs
combining various physical detection methods. **Food Control** 15, 81-91.
- Becker, K., P. Siddhuraju and H.P.S. Makkar. 2002. The effect of ionizing radiation on
antinutritional factors and the nutritional value of plant materials with reference to
human and animal food. **Food Chem.** 78, 187-205.

- Brynjolfsson, A. 1989. Future radiation sources and identification of irradiated foods. **Food Technol.** 43, 84 -89.
- Delincee, H. 1998. Detection of food treated with ionizing radiation. **Food Sci. Technol.** 9, 73-82.
- _____. 2002. Analytical methods to identify irradiated food-a review. **Radiat. Phys. Chem.** 63, 455-458.
- Douifi, L., J. Raffi, P. Stocker and F. Dole. 1998. A point about electron paramagnetic resonance detection of irradiated foodstuffs. **Spectrochimica Acta Part A** 54, 2403-2412.
- Engin, B. 2004. Use of thermoluminescence technique for the detection of irradiated spices. **J. Food Sci. Technol. (Mysore)** 41, 368-373.
- _____. 2007. Thermoluminescence parameters and kinetics of irradiated inorganic dust collected from black peppers. **Food Control** 18, 243-250.
- European Standard EN 1787. 2000. **Foodstuffs – Detection of irradiated food containing cellulose by ESR spectroscopy.** European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Frazier, W.C. and D.C. Westhoff. 1988. **Food Microbiology.** 4th ed. McGraw – Hill Book, Co. New York.
- Hackwood, S. 1991. An introduction to the irradiation processing of foods. *In* “ Food Irradiation”. **Elsevier Science Publishers, Ltd. Essex,** 1-18.
- Jones, J.M. 1992. Food Irradiation. *In* “ Food Safety”. **Eagan Press, Minnesota,** 301–330.

- Kader, A.A. 1986. Potential applications of ionizing radiation in postharvest handling of fresh fruits and vegetables. **Food Technol.** 40, 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. **Food Sci.** 56, 371-372.
- Khan, H.M. and I.A. Bhatti. 1999. Identification of irradiation treatment of spices by thermoluminescence of contaminating minerals. **J. Radioanal. Nucl. Chem.** 242, 739-744.
- Loaharanu, P. 1994. Cost/benefit aspects of food irradiation. **Food Technol.** 48, 104–108.
- Loaharanu, P. 1995. Food Irradiation : current status and future prospects. *In* “New Methods of Food Proeservation”. G.W. Gould (ed.). **Blackie Academic & Professional, Glasgow, U.K.**, 90-111.
- Maghraby, A. 2007. Identification of irradiated crab using EPR. **Radiation Measurements** 42, 220-224.
- Mastro, N. L. D., R.R. Marcos and D. Oliveira. 2007. Electron paramagnetic resonance study of some varieties of gamma-irradiated soybean. **Radiat. Phys. Chem.** 76, 1459-1462.
- Mondy, N.I. and B. Gosselin. 1989. Effects of irradiation on discoloration, phenols and lipids of potatoes. **Food Sci.** 54, 982 – 984.
- Moseley, B.E.B. 1989. Ionizing Radiation : Action and Repair. *In* “Mechanisms of Action of Foods Preservation Procedures”. **Elsevier Science Publishers, Ltd.** , Essex, 43-70.

Official Journal of the European Union. 2005. **List of Member States' Authorisations of Food and Food Ingredients which may be Treated with Ionising radiation.**

Available Source: http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_food/a_fd_2_00t1.asp?info_id=269,
September 3, 2010.

Polat, M. and M. Korkmaz. 2003. Use of electron spin resonance technique for the detection of irradiated rice Seeds (*Oryza sativa* L.). **Food Sci. Technol.** 38, 653-659.

Satin, M. 1993. **Food Irradiation a guidebook.** Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania.

Shimoyama, Y., M. Ukai and H. Nakamura. 2006. ESR detection of wheat flour before and after irradiation. **Spectrochimica Acta Part A** 63, 888-890.

Subulase, 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.

Ukai, M., H. Kameya, H. Nakamura and Y. Shimoyama. 2008. An electron spin resonance study of dry vegetables before and after irradiation. **Spectrochimica Acta Part A** 69, 1417-1422.

Urban, W.M. 1989. Food Irradiation, the past fifty years as prologue to tomorrow. **Food Technol.** 43(7), 76,92.

WHO, 1981. **Wholesomeness of Irradiated Food.** Report of a Joint FAO/IAEA/WHO Expert Committee, Technical Report Series No. 659, Geneva.

Yordanov, N.D. and V. Gancheva. 2000. A new approach for extension of the identification period of irradiated cellulose-containing foodstuffs by EPR spectroscopy. **Appl. Radiat. Isot.** 52, 195-198.





ภาคผนวก ก

คุณสมบัติของ Radiochromic film dosimeter FWT-60

คุณสมบัติของ Radiochromic film dosimeter FWT-60

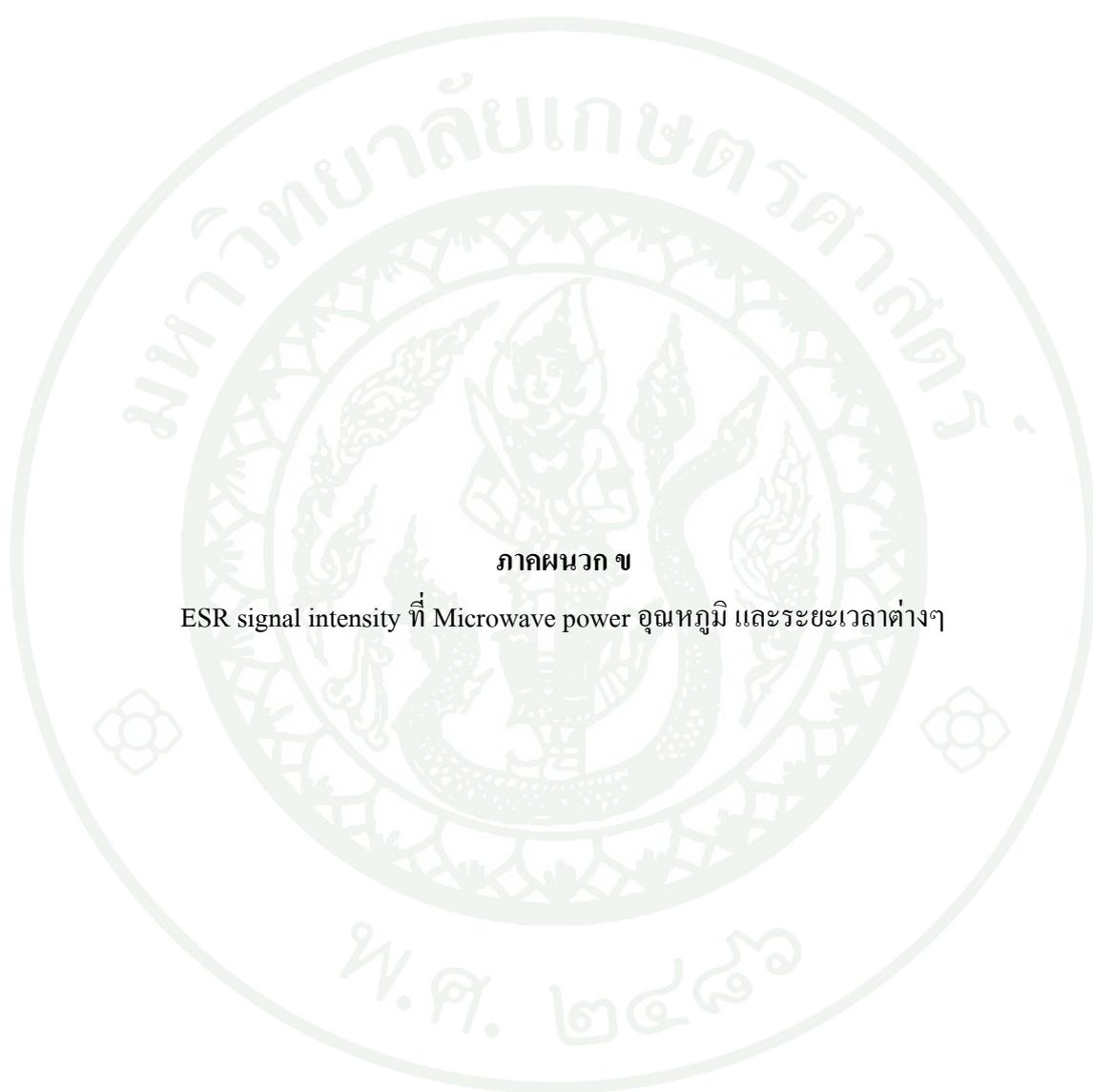


Specifications

- ◆ Type of Dosimeter: radiochromic thin film
- ◆ FWT Trade name: Radiachromic Dosimeter
- ◆ Dose Range: 0.5-200 kGy (0.05-20 Mrad)
- ◆ Dose Rate Dependence: Independent to over 10^{12} Gy/sec
- ◆ Intrinsic Sensitivity: The response (change in absorbance divided by thickness) is independent over unit thickness. Calibration of one thickness is applicable to all thicknesses.
- ◆ Peak color wavelength: 605 nm
- ◆ Wavelength of interest: 510 nm and 600 or 605 nm
- ◆ Color Build Up Time: Typically within 1 hour
- ◆ Color Change: Unirradiated: clear; irradiated: deep blue
- ◆ UV Sensitivity: Will color when exposed to wavelengths less than 350 nm.

ตารางผนวกที่ ก1 การเปรียบเทียบปริมาณรังสีดูดกลืนที่ต้องการฉายตัวอย่างเส้นหมี่ กับ ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตรวจวัดได้จาก Radiochromic film dosimeter FWT-60

ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ ต้องการ (กิโลเกรย์)	ปริมาณรังสีดูดกลืนที่ตรวจวัดได้จาก Radiochromic film dosimeter FWT-60 (กิโลเกรย์)	ความคลาดเคลื่อน (%)
0.5	0.479	4.20
1.0	1.034	3.40
1.5	1.466	2.27
2.0	1.925	3.75
3.0	2.868	4.40



ภาคผนวก ข

ESR signal intensity ที่ Microwave power อุณหภูมิ และระยะเวลาต่างๆ

ตารางผนวกที่ ข1 ค่า ESR signal intensity ของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสี 3 kGy
เมื่อเพิ่มค่า Microwave power จาก 0.4 - 20 mW

Microwave power	Microwave power ^{1/2}	ESR signal intensity (a.u.)		
		Top	Bottom	Total
0.4	0.6	420900	459900	880800
0.6	0.8	1034000	1104000	2138000
0.9	0.9	1576000	1675000	3251000
1.0	1.0	1703000	1845000	3548000
2.0	1.4	2697000	2919000	5616000
3.0	1.7	3304000	3603000	6907000
4.0	2.0	3577000	3956000	7533000
6.0	2.4	3975000	4226000	8201000
12.0	3.5	4002000	4338000	8340000
16.0	4.0	3993000	4298000	8291000
20.0	4.5	3927000	4263000	8190000

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ
ตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	15338	15647	30985		
	2	16639	16931	33570	31969	1399
	3	15486	15865	31351		
0.5 kGy	1	2.54E+05	2.95E+05	549000		
	2	2.65E+05	2.99E+05	564000	555900	7572
	3	2.64E+05	2.90E+05	554700		
1.0 kGy	1	5.26E+05	5.69E+05	1095200		
	2	5.32E+05	5.55E+05	1087000	1112133	36661
	3	5.57E+05	5.97E+05	1154200		
1.5 kGy	1	7.94E+05	8.42E+05	1636600		
	2	7.95E+05	8.51E+05	1645800	1643100	5656
	3	7.94E+05	8.53E+05	1646900		
2.0 kGy	1	1.19E+06	1.20E+06	2396000		
	2	1.17E+06	1.19E+06	2362000	2363667	31533
	3	1.15E+06	1.18E+06	2333000		
3.0 kGy	1	1.65E+06	1.69E+06	3339000		
	2	1.63E+06	1.69E+06	3313000	3380667	95574
	3	1.70E+06	1.79E+06	3490000		

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมี่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 1 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	15233	15478	30711		
	2	16439	16836	33275	31804	1323
	3	15727	15698	31425		
0.5 kGy	1	2.50E+05	2.86E+05	535600		
	2	2.53E+05	2.89E+05	541400	533567	9023
	3	2.44E+05	2.80E+05	523700		
1.0 kGy	1	5.17E+05	5.60E+05	1077800		
	2	5.03E+05	5.44E+05	1046300	1086833	45724
	3	5.50E+05	5.87E+05	1136400		
1.5 kGy	1	7.53E+05	7.93E+05	1545800		
	2	7.53E+05	8.01E+05	1554200	1563200	23246
	3	7.68E+05	8.21E+05	1589600		
2.0 kGy	1	1.09E+06	1.16E+06	2244000		
	2	1.04E+06	1.11E+06	2158000	2190333	46801
	3	1.06E+06	1.11E+06	2169000		
3.0 kGy	1	1.53E+06	1.62E+06	3153000		
	2	1.56E+06	1.64E+06	3205000	3266667	154053
	3	1.68E+06	1.76E+06	3442000		

ตารางผนวกที่ ข4 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13934	14679	28613		
	2	14046	14249	28295	29297	1469
	3	15615	15368	30983		
0.5 kGy	1	1.77E+05	1.71E+05	347900		
	2	1.86E+05	1.86E+05	372600	363800	13796
	3	1.91E+05	1.80E+05	370900		
1.0 kGy	1	4.82E+05	5.04E+05	985300		
	2	4.51E+05	4.72E+05	923100	936733	43387
	3	4.40E+05	4.62E+05	901800		
1.5 kGy	1	6.51E+05	7.10E+05	1361600		
	2	6.31E+05	6.81E+05	1312500	1335100	24781
	3	6.41E+05	6.90E+05	1331200		
2.0 kGy	1	8.26E+05	9.12E+05	1737900		
	2	8.23E+05	8.85E+05	1708100	1714967	20387
	3	8.04E+05	8.95E+05	1698900		
3.0 kGy	1	1.17E+06	1.26E+06	2431000		
	2	1.13E+06	1.21E+06	2345000	2408000	55218
	3	1.18E+06	1.27E+06	2448000		

ตารางผนวกที่ ข5 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง
เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18°C เป็น
เวลา 2 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14615	14288	28903		
	2	15958	16070	32028	29999	1759
	3	14154	14912	29066		
0.5 kGy	1	2.35E+05	2.56E+05	491200		
	2	2.39E+05	2.62E+05	500700	499600	7908
	3	2.44E+05	2.63E+05	506900		
1.0 kGy	1	4.91E+05	5.27E+05	1017700		
	2	4.96E+05	5.30E+05	1025800	1025933	8301
	3	4.98E+05	5.36E+05	1034300		
1.5 kGy	1	6.92E+05	7.34E+05	1425300		
	2	7.01E+05	7.44E+05	1445500	1441567	14700
	3	7.05E+05	7.49E+05	1453900		
2.0 kGy	1	9.79E+05	1.03E+06	2006400		
	2	1.00E+06	1.05E+06	2056000	2046133	35834
	3	1.01E+06	1.06E+06	2076000		
3.0 kGy	1	1.49E+06	1.57E+06	3054000		
	2	1.51E+06	1.58E+06	3091000	3089333	34530
	3	1.53E+06	1.60E+06	3123000		

ตารางผนวกที่ ๖ ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 2 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	15231	14574	29805		
	2	13935	13471	27406	28600	1200
	3	14349	14240	28589		
0.5 kGy	1	1.72E+05	1.51E+05	322400		
	2	1.63E+05	1.42E+05	305400	310633	10211
	3	1.63E+05	1.41E+05	304100		
1.0 kGy	1	2.86E+05	2.82E+05	568500		
	2	3.08E+05	3.00E+05	608400	597600	25479
	3	3.09E+05	3.07E+05	615900		
1.5 kGy	1	4.36E+05	4.54E+05	890600		
	2	4.45E+05	4.57E+05	902100	901600	10759
	3	4.48E+05	4.64E+05	912100		
2.0 kGy	1	5.61E+05	5.97E+05	1157600		
	2	5.66E+05	6.02E+05	1168100	1167167	9136
	3	5.72E+05	6.04E+05	1175800		
3.0 kGy	1	8.67E+05	9.42E+05	1808700		
	2	8.90E+05	9.64E+05	1854400	1838667	25963
	3	8.86E+05	9.67E+05	1852900		

ตารางผนวกที่ ข7 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นหมี่ที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 3 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	16038	16149	32187		
	2	15793	15936	31729	31845	301
	3	15928	15692	31620		
0.5 kGy	1	2.16E+05	2.24E+05	440200		
	2	2.15E+05	2.23E+05	437500	440833	3691
	3	2.19E+05	2.26E+05	444800		
1.0 kGy	1	4.53E+05	4.56E+05	909000		
	2	4.52E+05	4.55E+05	906900	906033	3482
	3	4.50E+05	4.53E+05	902200		
1.5 kGy	1	6.65E+05	6.72E+05	1337400		
	2	6.39E+05	6.65E+05	1304700	1320033	16445
	3	6.49E+05	6.69E+05	1318000		
2.0 kGy	1	8.97E+05	8.99E+05	1796700		
	2	9.01E+05	9.14E+05	1814800	1812100	14243
	3	9.02E+05	9.23E+05	1824800		
3.0 kGy	1	1.41E+06	1.44E+06	2847000		
	2	1.42E+06	1.45E+06	2871000	2859000	12000
	3	1.41E+06	1.45E+06	2859000		

ตารางผนวกที่ ข8 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง
เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา
3 สัปดาห์

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	16486	14996	31482		
	2	15792	15583	31375	31295	237
	3	15208	15820	31028		
0.5 kGy	1	1.46E+05	1.12E+05	258200		
	2	1.50E+05	1.09E+05	258900	259867	2307
	3	1.51E+05	1.11E+05	262500		
1.0 kGy	1	2.49E+05	2.10E+05	458200		
	2	2.51E+05	2.39E+05	489900	470367	17086
	3	2.48E+05	2.15E+05	463000		
1.5 kGy	1	3.65E+05	3.43E+05	707700		
	2	3.62E+05	3.34E+05	696000	697467	9585
	3	3.59E+05	3.30E+05	688700		
2.0 kGy	1	4.76E+05	4.56E+05	931900		
	2	4.73E+05	4.50E+05	923100	925267	5859
	3	4.69E+05	4.52E+05	920800		
3.0 kGy	1	7.23E+05	7.09E+05	1431300		
	2	7.11E+05	7.02E+05	1413800	1429867	15400
	3	7.31E+05	7.13E+05	1444500		

ตารางผนวกที่ ข9 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง
เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น
เวลา 1 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13947	14155	28102		
	2	14539	15028	29567	29204	973
	3	14937	15007	29944		
0.5 kGy	1	1.95E+05	2.17E+05	412100		
	2	1.99E+05	2.18E+05	417500	417433	5300
	3	2.01E+05	2.21E+05	422700		
1.0 kGy	1	4.26E+05	4.49E+05	874600		
	2	4.33E+05	4.63E+05	896700	889767	13151
	3	4.35E+05	4.63E+05	898000		
1.5 kGy	1	6.21E+05	6.70E+05	1290600		
	2	6.22E+05	6.74E+05	1296000	1295767	5054
	3	6.22E+05	6.79E+05	1300700		
2.0 kGy	1	8.28E+05	8.88E+05	1715600		
	2	8.39E+05	8.98E+05	1737700	1737400	21652
	3	8.51E+05	9.08E+05	1758900		
3.0 kGy	1	1.30E+06	1.39E+06	2680000		
	2	1.32E+06	1.40E+06	2719000	2708000	24434
	3	1.32E+06	1.40E+06	2725000		

ตารางผนวกที่ ข10 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่างเส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	15100	13476	28576		
	2	14968	14139	29107	29019	407
	3	15003	14372	29375		
0.5 kGy	1	1.36E+05	1.11E+05	247100		
	2	1.37E+05	1.11E+05	248300	248600	1670
	3	1.37E+05	1.13E+05	250400		
1.0 kGy	1	1.87E+05	1.78E+05	364800		
	2	1.87E+05	1.77E+05	363500	364033	681
	3	1.86E+05	1.78E+05	363800		
1.5 kGy	1	3.03E+05	3.12E+05	615700		
	2	3.05E+05	3.15E+05	620300	618633	2548
	3	3.06E+05	3.14E+05	619900		
2.0 kGy	1	4.14E+05	4.36E+05	850400		
	2	4.14E+05	4.37E+05	851700	851733	1350
	3	4.17E+05	4.36E+05	853100		
3.0 kGy	1	6.14E+05	6.63E+05	1276600		
	2	6.17E+05	6.70E+05	1286800	1285567	8418
	3	6.22E+05	6.71E+05	1293300		

ตารางผนวกที่ ข11 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 2 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14932	15196	30128		
	2	14796	15203	29999	30087	76
	3	14919	15214	30133		
0.5 kGy	1	1.82E+05	2.08E+05	389400		
	2	1.82E+05	2.11E+05	392800	394500	6129
	3	1.88E+05	2.13E+05	401300		
1.0 kGy	1	3.99E+05	4.33E+05	832300		
	2	4.06E+05	4.40E+05	846000	845233	12568
	3	4.11E+05	4.46E+05	857400		
1.5 kGy	1	5.95E+05	6.38E+05	1233400		
	2	6.06E+05	6.44E+05	1250700	1250433	16902
	3	6.12E+05	6.56E+05	1267200		
2.0 kGy	1	8.19E+05	8.75E+05	1694600		
	2	8.22E+05	8.80E+05	1701900	1701633	6904
	3	8.30E+05	8.78E+05	1708400		
3.0 kGy	1	1.18E+06	1.25E+06	2431000		
	2	1.20E+06	1.26E+06	2459000	2459000	28000
	3	1.21E+06	1.28E+06	2487000		

ตารางผนวกที่ ข12 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 2 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14739	15012	29751		
	2	14658	15037	29695	29836	198
	3	14875	15188	30063		
0.5 kGy	1	1.06E+05	8.50E+04	190762		
	2	1.07E+05	8.57E+04	192446	191985	1070
	3	1.07E+05	8.61E+04	192747		
1.0 kGy	1	1.65E+05	1.37E+05	301600		
	2	1.63E+05	1.36E+05	299400	302167	3089
	3	1.68E+05	1.38E+05	305500		
1.5 kGy	1	2.58E+05	2.23E+05	480600		
	2	2.52E+05	2.22E+05	473000	476633	3811
	3	2.53E+05	2.23E+05	476300		
2.0 kGy	1	3.30E+05	3.07E+05	636900		
	2	3.34E+05	3.08E+05	642300	639400	2722
	3	3.30E+05	3.09E+05	639000		
3.0 kGy	1	4.60E+05	4.41E+05	901500		
	2	4.69E+05	4.46E+05	915100	903433	10830
	3	4.51E+05	4.42E+05	893700		

ตารางผนวกที่ ข13 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 3 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14892	15239	30131		
	2	14985	15233	30218	30210	75
	3	15012	15268	30280		
0.5 kGy	1	1.71E+05	1.97E+05	367800		
	2	1.73E+05	1.98E+05	370300	369700	1682
	3	1.73E+05	1.98E+05	371000		
1.0 kGy	1	3.82E+05	4.23E+05	804700		
	2	3.84E+05	4.24E+05	808000	808100	3451
	3	3.87E+05	4.25E+05	811600		
1.5 kGy	1	5.74E+05	6.11E+05	1185000		
	2	5.74E+05	6.12E+05	1185500	1185967	1266
	3	5.75E+05	6.12E+05	1187400		
2.0 kGy	1	8.04E+05	8.65E+05	1669000		
	2	8.01E+05	8.67E+05	1668500	1668933	404
	3	8.07E+05	8.63E+05	1669300		
3.0 kGy	1	9.99E+05	1.06E+06	2061800		
	2	9.99E+05	1.07E+06	2069700	2067767	5273
	3	1.00E+06	1.07E+06	2071800		

ตารางผนวกที่ ข14 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 3 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14853	16210	31063		
	2	15025	15388	30413	30541	471
	3	14933	15214	30147		
0.5 kGy	1	8.23E+04	6.78E+04	150143		
	2	8.32E+04	6.82E+04	151430	151299	1096
	3	8.32E+04	6.91E+04	152324		
1.0 kGy	1	1.15E+05	8.87E+04	203870		
	2	1.16E+05	8.85E+04	204363	204840	1277
	3	1.16E+05	9.02E+04	206286		
1.5 kGy	1	1.77E+05	1.47E+05	323500		
	2	1.74E+05	1.47E+05	321200	321967	1328
	3	1.75E+05	1.46E+05	321200		
2.0 kGy	1	2.24E+05	1.95E+05	419500		
	2	2.25E+05	1.94E+05	418900	420267	1872
	3	2.26E+05	1.97E+05	422400		
3.0 kGy	1	2.81E+05	2.54E+05	534600		
	2	2.81E+05	2.54E+05	534700	535300	1127
	3	2.82E+05	2.54E+05	536600		

ตารางผนวกที่ ข15 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง
เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น
เวลา 4 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	14895	13294	28189		
	2	14327	13170	27497	28303	869
	3	15013	14211	29224		
0.5 kGy	1	1.70E+05	1.74E+05	343400		
	2	1.69E+05	1.74E+05	343000	343333	306
	3	1.70E+05	1.74E+05	343600		
1.0 kGy	1	3.50E+05	3.79E+05	728900		
	2	3.48E+05	3.81E+05	729800	727300	3579
	3	3.47E+05	3.77E+05	723200		
1.5 kGy	1	5.28E+05	5.69E+05	1097400		
	2	5.31E+05	5.72E+05	1102900	1100933	3066
	3	5.31E+05	5.71E+05	1102500		
2.0 kGy	1	7.41E+05	7.93E+05	1534000		
	2	7.40E+05	7.92E+05	1532500	1532067	2183
	3	7.38E+05	7.92E+05	1529700		
3.0 kGy	1	9.13E+05	9.69E+05	1881800		
	2	9.12E+05	9.70E+05	1881900	1881933	153
	3	9.13E+05	9.69E+05	1882100		

ตารางผนวกที่ ข16 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 4 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13765	14398	28163		
	2	13884	14473	28357	28362	202
	3	13925	14642	28567		
0.5 kGy	1	6.51E+04	6.09E+04	126026		
	2	6.49E+04	6.04E+04	125250	124894	1346
	3	6.41E+04	5.93E+04	123406		
1.0 kGy	1	8.26E+04	7.56E+04	158175		
	2	8.47E+04	7.73E+04	162023	160002	1931
	3	8.29E+04	7.69E+04	159809		
1.5 kGy	1	1.55E+05	1.24E+05	278700		
	2	1.55E+05	1.25E+05	279600	279600	900
	3	1.55E+05	1.26E+05	280500		
2.0 kGy	1	1.71E+05	1.60E+05	330800		
	2	1.72E+05	1.60E+05	331500	332133	1739
	3	1.74E+05	1.61E+05	334100		
3.0 kGy	1	2.27E+05	2.07E+05	433600		
	2	2.29E+05	2.06E+05	435700	435433	1716
	3	2.30E+05	2.07E+05	437000		

ตารางผนวกที่ ข17 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 5 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	15624	13142	28766		
	2	13904	12805	26709	27115	1490
	3	13826	12044	25870		
0.5 kGy	1	1.52E+05	1.62E+05	314000		
	2	1.55E+05	1.63E+05	318300	318000	3859
	3	1.56E+05	1.65E+05	321700		
1.0 kGy	1	2.95E+05	3.10E+05	604900		
	2	2.98E+05	3.15E+05	613400	607933	4744
	3	2.91E+05	3.14E+05	605500		
1.5 kGy	1	4.85E+05	5.22E+05	1007200		
	2	4.90E+05	5.27E+05	1016600	1012033	4706
	3	4.85E+05	5.27E+05	1012300		
2.0 kGy	1	6.58E+05	6.81E+05	1339400		
	2	6.60E+05	6.83E+05	1342300	1339567	2654
	3	6.55E+05	6.82E+05	1337000		
3.0 kGy	1	8.39E+05	8.46E+05	1685000		
	2	8.41E+05	8.49E+05	1690300	1689367	3983
	3	8.43E+05	8.50E+05	1692800		

ตารางผนวกที่ ข18 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 5 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13789	14892	28681		
	2	13997	14198	28195	28385	260
	3	13549	14729	28278		
0.5 kGy	1	4.52E+04	4.23E+04	87436		
	2	4.78E+04	4.29E+04	90712	89258	1669
	3	4.71E+04	4.25E+04	89626		
1.0 kGy	1	6.89E+04	5.40E+04	122847		
	2	6.89E+04	5.24E+04	121322	121963	791
	3	6.82E+04	5.35E+04	121719		
1.5 kGy	1	1.06E+05	9.07E+04	196508		
	2	1.08E+05	9.27E+04	200748	198713	2125
	3	1.07E+05	9.19E+04	198883		
2.0 kGy	1	1.22E+05	1.05E+05	226900		
	2	1.21E+05	1.06E+05	226900	228200	2252
	3	1.24E+05	1.07E+05	230800		
3.0 kGy	1	1.83E+05	1.64E+05	347300		
	2	1.83E+05	1.66E+05	349200	349133	1801
	3	1.85E+05	1.66E+05	350900		

ตารางผนวกที่ ข19 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 18 °C เป็น เวลา 6 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13950	14487	28437		
	2	14042	14821	28863	28492	347
	3	13877	14298	28175		
0.5 kGy	1	1.26E+05	1.30E+05	255900		
	2	1.25E+05	1.31E+05	255900	255833	115
	3	1.25E+05	1.31E+05	255700		
1.0 kGy	1	2.42E+05	2.75E+05	516200		
	2	2.45E+05	2.79E+05	523300	521900	5145
	3	2.47E+05	2.79E+05	526200		
1.5 kGy	1	4.11E+05	4.67E+05	877600		
	2	4.21E+05	4.64E+05	884300	881467	3467
	3	4.17E+05	4.66E+05	882500		
2.0 kGy	1	5.73E+05	6.20E+05	1193300		
	2	5.78E+05	6.29E+05	1206800	1201200	7038
	3	5.76E+05	6.27E+05	1203500		
3.0 kGy	1	7.97E+05	8.16E+05	1613000		
	2	7.98E+05	8.17E+05	1615600	1615033	1818
	3	8.00E+05	8.17E+05	1616500		

ตารางผนวกที่ ข20 ค่าเฉลี่ย ESR signal intensity และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวอย่าง เส้นไหมที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณต่างๆ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 25 °C เป็น เวลา 6 เดือน

Dose	No.	ESR signal intensity (a.u.)				
		Top	Bottom	Total	Average	S.D.
0 kGy	1	13780	14298	28078		
	2	13596	14189	27785	28078	293
	3	13899	14472	28371		
0.5 kGy	1	2.60E+04	2.51E+04	51102		
	2	2.68E+04	2.53E+04	52149	51648	525
	3	2.62E+04	2.55E+04	51694		
1.0 kGy	1	4.43E+04	3.07E+04	74930		
	2	4.20E+04	3.03E+04	72331	73986	1438
	3	4.44E+04	3.03E+04	74698		
1.5 kGy	1	7.07E+04	6.60E+04	136635		
	2	7.05E+04	6.87E+04	139205	139419	2897
	3	7.49E+04	6.76E+04	142417		
2.0 kGy	1	9.45E+04	8.76E+04	182044		
	2	9.54E+04	8.93E+04	184700	183333	1330
	3	9.47E+04	8.86E+04	183254		
3.0 kGy	1	1.64E+05	1.57E+05	321600		
	2	1.63E+05	1.55E+05	317800	319733	1901
	3	1.64E+05	1.56E+05	319800		

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายสหการ มณฑลวัฒนา
เกิดวันที่	5 มีนาคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ชีววิทยา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	นักศึกษาระดับบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางการ -	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนการผลิตบัณฑิตวิจัยและพัฒนา ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับสำนักงาน ปรมาณูเพื่อสันติ ประจำปี พ.ศ. 2552