



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

สาขา

ฟิสิกส์

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ต่อกล้วยหอมทองหลังการฉายรังสีแกมมา

Electron Spin Resonance Study on Kluai Hom Thong after Gamma-Irradiation

นามผู้วิจัย นางสาวภัทรา สุขสบาย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ด.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ต่อกล้วยหอมทองหลังการฉายรังสีแกมมา

Electron Spin Resonance Study on Kluai Hom Thong after Gamma-Irradiation

โดย

นางสาวภัทรา สุขสบาย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ภัทรชา สุขสบาย 2555: การศึกษาอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ต่อกล้วยหอมทอง
หลังจากการฉายรังสีแกมมา ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์
ภาควิชาฟิสิกส์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์, D.Eng. 97 หน้า

ในปัจจุบันการฉายรังสีผลไม้เป็นที่นิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถชะลอการสุก และควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในระหว่างการเก็บรักษาได้อีกทั้งยังทำให้อายุการเก็บนานขึ้น แต่ผู้บริโภคยังคงไม่มั่นใจในความปลอดภัยของอาหารฉายรังสี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการตรวจสอบการฉายรังสีของผลไม้ที่มีประสิทธิภาพ เทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR) เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจสอบการฉายรังสีในผักและผลไม้อย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้นำเทคนิค ESR มาใช้เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีของกล้วยหอมทองซึ่งเป็นผลไม้ที่มีการส่งออกเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศไทย จากสาเหตุที่กล้วยเป็นผลไม้ซึ่งมีอายุการเก็บรักษาสั้น การจะส่งให้ถึงมือผู้บริโภคในต่างประเทศโดยไม่เน่าเสียก่อนนั้นจึงจำเป็นต้องพึ่งพาการฉายรังสี การเตรียมตัวอย่างทำโดยใช้การอบแห้งแล้วบดละเอียด จากนั้นนำไปวัดสัญญาณ ESR ผลที่ได้พบว่าสัญญาณ ESR ของกล้วยหอมทองมีลักษณะเป็น 2 พีก พีกหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางและอีกพีกอยู่ทางด้านขวาของพีกกลาง ตัวอย่างที่ฉายรังสีมีลักษณะของสัญญาณ ESR เหมือนกับตัวอย่างที่ไม่ฉายรังสี แต่จะมี ESR intensity มากกว่า 2 ถึง 3 เท่า นอกจากนี้การสุกของกล้วยหอมทองยังส่งผลต่อพีกด้านขวาทำให้ความเข้มของสัญญาณ ESR เพิ่มขึ้นในช่วงหลังจากฉายรังสี 3 วันเป็นต้นไป และทำให้ความเข้มของสัญญาณ ESR ของพีกกลางลดลงอีกด้วย สำหรับการตรวจสอบการฉายรังสีของกล้วยหอมทองนั้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ความเข้มของสัญญาณ ESR ของพีกกลาง ซึ่งสัญญาณจากตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่ามากกว่าสัญญาณจากตัวอย่างที่ไม่ผ่านการฉายรังสีอย่างชัดเจนตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา การเตรียมตัวอย่างโดยใช้ air-dry oven นั้น อาจมีผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้ แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และประหยัด จึงเหมาะสำหรับใช้เพื่อเป็นการตรวจสอบการฉายรังสีโดยสังเขป

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Patcha Sooksabai 2012: Electron Spin Resonance Study on Kluai Hom Thong after Gamma-Irradiation. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Assistant Professor Teerasak Veerapaspong, D.Eng. 97 pages.

Nowadays, fruit irradiation is more popular in many countries because it can slow down ripening process and control insect pests during storage period, so shelf life of fruit can be extended. However, customers may doubt about safety of the irradiated fruits. Then, it is necessary to use efficient techniques to determine the previous radiation treatment in fruits. Electron spin resonance (ESR) spectroscopy is one of the most famous techniques for identifying the irradiation history in vegetables and fruits. In this research, ESR method is applied to investigate the irradiation of Musa (AAA group) or Kluai Hom Thong - one of the most popular types of bananas in Thailand. It is also the leading fruit in the agriculture food exportation in Thailand. Because of short shelf life, irradiation process enables the bananas to be sent to the customers in other countries before they are rotten. The samples are dried under air-dry oven and are made to a powder before measuring ESR signals. From ESR measurements, the signal of all samples shows 2 peaks – one in the central and another in the right side of the central one. Irradiated samples have the same pattern of ESR signal as non-irradiates ones; but, they have approximately more than 2 times in the intensity. In addition, ripening process increase the intensity of the right peak after 3 days, and it also causes decrement in the intensity of the central peak. Due to the difference in ESR intensity between irradiated and non-irradiated samples during the entire storage period, the intensity of the central peak can be used as a clear evidence to confirm the irradiation history of Kluai Hom Thong. The sample preparation by using air-dry oven may produce free radicals but it is convenient, fast and cheap. Therefore, this method is appropriate to be a brief examination of previous irradiation.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง ผศ.ธีระศักดิ์ วีระภาสพงษ์ ผศ.สุธี บุญช่วย และ ดร. กนกวิชต์ ตียพันธ์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้
กรุณาตรวจทานความถูกต้องของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบพระคุณคุณธงชัย สดประเสริฐ ผู้อำนวยการกลุ่มมาตรฐานการวัดรังสีและกัมมันตรังสี นักฟิสิกส์รังสี สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้ให้ความรู้เรื่องเครื่องมือในกลุ่มงานรังสีและกัมมันตรังสี คุณสุมาลี นิลพฤกษ์ และคุณหริเณตร มุ่งพยาบาล นักนิวเคลียร์เคมี ที่ได้ให้ความรู้ในการใช้เครื่อง ESR (Electron spin resonance) และเครื่องฉายรังสีแกมมาเซลล์ จากแหล่งกำเนิดรังสี Co-60

ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้โอกาสในการศึกษา และสนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้ และขอบพระคุณพี่ๆเพื่อนๆน้องๆที่ให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งอย่าง

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องชายของข้าพเจ้า และนายฐกพลวรรณ จันทร์วัฒนะ ประโยชน์ไคอัน เนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน จนสำเร็จลุล่วงตามความมุ่งหมายของผู้วิจัย

ภัทรา สุขสบาย
พฤษภาคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	37
อุปกรณ์	37
วิธีการ	40
ผลและวิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	66
สรุป	66
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงวัตถุประสงคของการฉายรังสีและปริมาณรังสีสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้ในประเทศไทย	5
2 แสดงตัวอย่างอาหาร วัตถุประสงคของการฉาย และปริมาณรังสีที่กระทรวงสาธารณสุขอนุญาตให้ใช้ ฉบับที่ 103 (พ.ศ.2529)	6
3 แสดงวิธีการตรวจพิสูจน์อาหารฉายรังสีแบบต่างๆ	16
4 แสดงค่าความเข้มข้นแม่เหล็กที่ใช้ในการเกิดเรโซแนนซ์ B_{res} เมื่อ $g = 2$ ที่ความถี่ต่างๆ บางความถี่ของรังสีไมโครเวฟ	29
5 แสดงค่าสนามแม่เหล็กในตำแหน่งที่มีค่าสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สูงสุดและต่ำสุดของฟิสิกส์ที่พบทั้งก่อนและหลังฉายรังสี	57
6 แสดงตำแหน่งฟิสิกส์และค่า g จากทั้งก่อนและหลังฉายรังสี	58
ตารางผนวกที่	
1 แสดงตัวอย่างข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิจัย ความเข้มข้นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองก่อนและหลังฉายรังสี 0.3 kGy ที่ตำแหน่งค่าความเข้มข้นแม่เหล็กต่างๆ	74

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์ของอิเล็กตรอนนอกสนามแม่เหล็ก และในสนามแม่เหล็ก	19
2 สภาวะทางสปินของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยวหนึ่งอนุภาค และสำหรับสารตัวอย่างทั้งก้อนซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนหลายอนุภาค	19
3 ผลของอันตรกิริยาซีมานทำให้การจัดเรียงตัวทั้งสองแบบของอิเล็กตรอนเดี่ยวมีระดับพลังงานไม่เท่ากัน	20
4 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็ก	22
5 การเกิดเรโซแนนซ์การดูดกลืน เมื่อความถี่ของรังสีมีค่าพอดีกับความแตกต่างของระดับพลังงาน	22
6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของรังสีที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์กับความแตกต่างของระดับพลังงาน	23
7 ความสัมพันธ์ระหว่างเรโซแนนซ์การดูดกลืนกับสัญญาณอีพ็อดที่แสดงผลในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืน	23
8 แบบของสเปกตรัมดูดกลืน รวมทั้งอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสเปกตรัมดูดกลืนสำหรับไอโซทรอปิกสเปกตรัม, แอนไอโซทรอปิกสเปกตรัมแบบแอกเซียล ($g_{\perp} > g_{\parallel}$) และแอนไอโซทรอปิกสเปกตรัมแบบบรอมบิก	24
9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	25
10 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในของ microwave bridge และเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟ	26
11 แผนภาพการทำงานโดยรวมของเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	27
12 การแสดงผลของเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืนจากการสั่นของสนามแม่เหล็กด้วย modulation frequency (100 kHz) และ modulation amplitude (B_m)	28
13 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสี Co-60 รุ่น Gamma Cell 220	37
14 เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ESR รุ่น Bruker A300 Research	38
15 ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven)	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	41
17	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 ไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	43
18	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	43
19	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	44
20	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 4 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	44
21	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	45
22	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	46
23	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์	46
24	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีและอบแห้งมาแล้ว 3 วัน)	47
25	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีมาแล้ว 3 วัน และอบแห้งในวันที่จะวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์)	47
26	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ (อบแห้งและฉายรังสีมาแล้ว 10 วัน)	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
27	49
28	49
29	51
30	51
31	52
32	53
33	53
34	54
35	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
36	ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 5 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (หลังฉายรังสี 8 วัน)	55
37	สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองก่อนฉายรังสีและหลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy	56
38	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นไมโครเวฟกับความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์	58
39	สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่อุณหภูมิอบแห้งแตกต่างกัน	59
40	ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองของฟักกลางและฟักขาว บันทึกค่าในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy	60
41	ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสีของฟักกลางและฟักขาว บันทึกค่าในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังซื้อกล้วยหอมทองดิบจากตลาด	62
42	ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ผ่านการฉายรังสีของฟักกลางและฟักขาว บันทึกค่าในวันที่ 0, 1, 2, 3 และ 8 หลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy	64

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B_o	=	external magnetic field strength
B_m	=	modulation amplitude
B_{res}	=	resonance magnetic field strength
Co-60	=	Cobalt-60
EPR	=	electron paramagnetic resonance
ESR	=	electron spin resonance
ΔE	=	energy difference
GHz	=	gigahertz
g	=	Lande' splitting factor, Lande' g-factor, g-factor
g_e	=	free electron g-factor
Δg	=	g-factor change
h	=	Plank's constant
hfi	=	hyperfine interaction
J	=	Joule
kGy	=	kilogray
kHz	=	kilohertz
MHz	=	megahertz
μ_B	=	Bohr magneton
m_s	=	secondary spin quantum number, spin projection quantum number
ms	=	millisecond
mT	=	milliTesla
mW	=	milliwatt
S	=	spin quantum number
s	=	second
T	=	Tesla
ν	=	microwave frequency, wave frequency

การศึกษาอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ต่อกล้วยหอมทองหลังการฉายรังสีแกมมา

Electron Spin Resonance Study on Kluai Hom Thong after Gamma-Irradiation

คำนำ

ปัจจุบันนี้มีการฉายรังสีอาหารอย่างแพร่หลายเพราะนอกจากฆ่าเชื้อโรคหรือป้องกันแมลงได้แล้ว ยังเป็นวิธีการถนอมอาหารอย่างหนึ่ง นั่นคือชะลอการสุกของผลไม้ได้อีกด้วย ผลไม้สดของไทยนั้นเป็นที่ต้องการอย่างมากของต่างประเทศ เช่น ทูเรียน มะม่วง มังคุด และกล้วยหอม เป็นต้น

กล้วยหอมทองมีชื่อวิทยาศาสตร์คือ Musa (AAA group) "KluaiHomThong" เป็นกล้วยที่มีผลใหญ่ เนื้อสีเข้ม กลิ่นหอม รสหวาน เมื่อสุกเปลือกจะมีสีเหลืองทองน่ารับประทานด้วยเหตุนี้กล้วยหอมทองจึงเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย และเป็นที่ต้องการอย่างมากในต่างประเทศ อาทิเช่น ญี่ปุ่น ฮองกง และเนเธอร์แลนด์ เป็นต้น แต่การขนส่งกล้วยหอมทองไปยังประเทศเหล่านั้น บางครั้งกล้วยหอมทองอาจสุกหรือเน่าเสียก่อนถึงมือผู้บริโภค จึงมีการฉายรังสีกล้วยหอมทองดิบเพื่อชะลอการสุก ทำให้สามารถส่งออกกล้วยหอมทองได้ถึงมือผู้บริโภคในช่วงที่กล้วยหอมทองเริ่มสุกและมีสีเหลืองทองน่ารับประทาน

เนื่องจากการฉายรังสีเป็นวิธีการที่มีรังสีเข้ามาเกี่ยวข้องกับอาหาร จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการควบคุมและตรวจสอบปริมาณรังสีในอาหารชนิดต่างๆอย่างเข้มงวด การตรวจสอบว่าอาหารผ่านการฉายรังสีมาแล้วหรือไม่นั้น ทำได้โดยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะภายในของอาหารฉายรังสีเทียบกับอาหารไม่ฉายรังสี ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเปล่งแสงเหตุความร้อน (Thermoluminescence หรือ TL) และ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance หรือ ESR) เป็นต้น ซึ่ง ESR เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ตรวจการฉายรังสีผักและผลไม้ (แห้ง) เพราะสามารถตรวจอนุมูลอิสระที่เกิดจากการฉายรังสีของสารจำพวก crystalline sugars ได้ดี

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณ ESR กับระยะเวลาหลังการฉายรังสีกล้วยหอมทอง โดยใช้กล้วยหอมทองดิบที่ซื้อได้จากตลาดทั่วไปนำไปฉายรังสี แล้วนำกล้วยหอมทองฉายรังสีไปอบแห้งและบดละเอียด จากนั้นจึงนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง ESR

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม ที่จะใช้ในการตั้งค่าหาสัญญาณ ESR ของกล้วยหอมทอง
2. เพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลต่อสัญญาณ ESR ของกล้วยหอมทองหรือไม่
3. เพื่อศึกษาว่าการสุกของกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสีมีผลต่อสัญญาณ ESR หรือไม่
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ ESR กับระยะเวลาหลังจากการฉายรังสีของกล้วยหอมทอง

การตรวจเอกสาร

อาหารฉายรังสี

อาหารฉายรังสี (irradiated foods) เป็นอาหารที่แปรรูปด้วยกรรมวิธีการฉายรังสี เพื่อกำจัดหรือควบคุมเชื้อโรคและแมลงในผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งยังเป็นวิธีการถนอมอาหารที่เกิดจากการไอออไนซ์โดยใช้รังสี (ionizing radiation) การฉายรังสีอาหารเพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมาในอาหารเป็นการลดการเน่าเสียและคงคุณภาพ ช่วยลดจำนวนแบคทีเรีย จึงทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น การฉายรังสีอาหารเป็นกระบวนการที่ไม่ทำให้คุณสมบัติของอาหารเปลี่ยนแปลง เช่น ผลไม้ที่ผ่านการฉายรังสีจะยังคงมีความชุ่มฉ่ำเหมือนเดิม เนื้อสดและเนื้อแช่แข็งสามารถนำมาฉายรังสีได้โดยไม่จำเป็นต้องทำให้สุก และอาหารที่ผ่านการฉายรังสีจะไม่มีรังสีตกค้างเช่นเดียวกับการฉายเอ็กซเรย์ฟันและกระดูก แม้ว่าอาหารฉายรังสีจะได้รับการรับรองจากประเทศต่างๆ กว่า 40 ประเทศแล้วก็ตาม แต่ยังคงได้รับการยอมรับไม่มากนักจากผู้บริโภค

วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีอาหาร มีดังนี้

1) เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค เช่น แหนมจะฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์เพื่อกำจัดเชื้อโรคซัลโมเนลลาที่ทำให้เกิดโรคท้องร่วง กะปิจะฉายรังสีปริมาณ 6 กิโลเกรย์ เป็นการปรับปรุงคุณภาพด้านจุลินทรีย์และไข่จะฉายรังสีเพื่อกำจัดเชื้อซัลโมเนลลาเช่นเดียวกับแหนม

2) ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาโดยช่วยชะลอการเน่าเสียของผลไม้ เช่น สตอเบอรี่ โดยการฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์และเก็บที่อุณหภูมิตู้เย็น จะช่วยชะลอการเน่าเสียจากการเกิดเชื้อราสีเทา ผลไม้แอปเปิ้ล พีช แพร์ ฉายรังสีปริมาณ 2 กิโลเกรย์ ช่วยชะลอการเน่าเสียจากเชื้อรา ช่วยชะลอการเน่าเสียของผัก ยืดอายุการเก็บรักษาผัก เช่น แครอท ขึ้นฉ่าย ดอกกะหล่ำ และหอมหัวใหญ่ รังสีช่วยยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์และอาหารทะเล เช่น เนื้อหมู เนื้อไก่สด ปลาทูน่า กุ้งและปลาหมึกสด

3) ช่วยชะลอการสุกของผลไม้ เช่น ชะลอการสุกของมะม่วงหาวหงั่วกลางวัน โดยจุ่มน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที ทำการฉายรังสีปริมาณ 0.6 กิโลเกรย์และเก็บที่อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียสสามารถเก็บไว้ได้นาน 10 วัน และช่วยลดการเน่าเสียจากการเกิดโรคแอนแทรกซ์ในส

(Anthracnose) กลัวยหอมทองฉายรังสีปริมาณ 0.2-0.4 กิโลเกรย์ เก็บที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส สามารถชะลอการสุกได้ 3-5 วัน

4) ช่วยลดปริมาณปรสิตร เช่น การกำจัดพยาธิในปลาทะเลด้วยการใช้รังสีปริมาณ 6 กิโลเกรย์ การกำจัดพยาธิตัวจิ๋วในปลาน้ำจืด เช่น ปลาส้มปัก และแหนมปลา ใช้รังสีปริมาณ 8 กิโลเกรย์ การกำจัดพยาธิใบไม้ตับในปลาน้ำจืดใช้รังสีปริมาณ 0.6 กิโลเกรย์

5) ช่วยยับยั้งการงอกระหว่างการรักษา เช่น ยับยั้งการงอกของหอมหัวใหญ่ นำหอมหัวใหญ่ มาฉายรังสีปริมาณ 0.09 กิโลเกรย์ รวมกับการเก็บในห้องเย็นจะเก็บได้นานกว่า 5 เดือนโดยไม่งอก มันฝรั่งที่ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 0.08-0.15 กิโลเกรย์ และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส สามารถเก็บได้นานประมาณ 6 เดือน เห็ดฟาง ผ่านการฉายรังสีปริมาณ 1 กิโลเกรย์ เก็บที่อุณหภูมิ 17 องศาเซลเซียส สามารถชะลอการบานของดอกเห็ดได้นาน 4 วัน สำหรับเห็ดต่างประเทศฉายรังสีปริมาณ 1-2 กิโลเกรย์เก็บที่อุณหภูมิ 0-40 องศาเซลเซียส สามารถชะลอการบานได้นาน 10-14 วัน

6) ทำลายและยับยั้งการแพร่พันธุ์ของแมลง เป็นการกำจัดโดยทางอ้อม ด้วยการฉายรังสีเพื่อควบคุมและกำจัดแมลงโดยเทคนิคการใช้แมลงที่เป็นหมัน เช่น แมลงวันผลไม้และหนอนเจาะสมอฝ้าย

การฉายรังสีอาหารต้องใช้ปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ในระดับต่ำสุดให้เพียงพอตามวัตถุประสงค์ที่ทำการฉายและต้องปลอดภัยต่อผู้บริโภค โดยคงคุณค่าทางโภชนาการของอาหารไว้ไม่ทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติของอาหารเปลี่ยนแปลง และยังคงคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของอาหาร (สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553)

วัตถุประสงค์ของการฉายรังสีและปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุด (กิโลเกรย์) ที่อนุญาตให้ใช้ใน ประเทศไทยอ้างอิงจาก เอกสารหมายเลข 1 แนบท้ายประกาศกระทรวงสาธารณสุข (ฉบับที่ 297) พ.ศ. 2549 เรื่องอาหารฉายรังสี (ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 1 แสดงวัตถุประสงค์ของการฉายรังสีและปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุดที่อนุญาตให้ใช้ใน ประเทศไทย

วัตถุประสงค์ของการฉายรังสี	ปริมาณรังสีดูดกลืนสูงสุด * (กิโลเกรย์)
ยับยั้งการงอกระหว่างการรักษา	1
ชะลอการสุก	2
ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง	2
ลดปริมาณปรสิต	4
ยืดอายุการเก็บรักษา	7
ลดปริมาณจุลินทรีย์และจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	10

หมายเหตุ * ปริมาณรังสีดูดกลืน (กิโลเกรย์, kGy) คือ การวัดปริมาณพลังงานรังสีใดๆ ที่วัตถุ ตัวกลางใด ดูดกลืนไว้ได้ เมื่อมีรังสีผ่านเข้ามา

ที่มา: ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (ม.ป.ป.)

ข้อจำกัดของการฉายรังสีอาหาร

1. ไม่สามารถใช้ได้กับอาหารทุกชนิด โดยเฉพาะอาหารที่มีโปรตีนและน้ำสูง เช่น นม และผลิตภัณฑ์จากนม เพราะจะทำให้เกิดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์
2. อาจทำให้เนื้อสัมผัสของผลไม้และสีของเนื้อสัตว์บางชนิดเปลี่ยนไป ทำให้ต้องเลือกใช้ปริมาณรังสีที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์
3. ไม่สามารถทำลายสารพิษตกค้างที่มีอยู่ในอาหารได้

4. จำเป็นต้องใช้การแช่เย็น แช่แข็ง หรือความร้อน ร่วมด้วยในบางกรณี เพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการถนอมอาหาร

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างอาหาร วัตถุประสงค์ของการฉาย และปริมาณรังสีที่กระทรวงสาธารณสุข อนุญาตให้ใช้ ฉบับที่ 103 (พ.ศ.2529)

ชนิดของอาหาร	วัตถุประสงค์	ปริมาณรังสีเฉลี่ยสูงสุดที่อนุญาต (กิโลเกรย์)
ไก่	- ยึดอายุการเก็บรักษา	7
	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ทำให้เกิดโรค	7
เมล็ดโกโก้	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงระหว่างการเก็บรักษา	1
	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ในเมล็ดที่หมักไว้ ทั้งที่ผ่านความร้อนหรือไม่ผ่านความร้อน	5
พุทราแห้ง	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในระหว่างการเก็บรักษา	1
มะม่วง	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในระหว่างการเก็บรักษา	1
	- ชะลอการสุก	1
	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ โดยใช้ร่วมกับการใช้ความร้อน	1
หอมหัวใหญ่	- ยับยั้งการงอกในระหว่างการเก็บรักษา	0.15
มะละกอ	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง	1
	- ชะลอการสุก	1
มันฝรั่ง	- ยับยั้งการงอกในระหว่างการเก็บรักษา	0.15
ถั่ว	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในระหว่างการเก็บรักษา	1
ข้าว	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในระหว่างการเก็บรักษา	1

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชนิดของอาหาร	วัตถุประสงค์	ปริมาณรังสีเฉลี่ย สูงสุดที่อนุญาต (กิโลเกรย์)
เครื่องเทศ	- เพื่อควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลง	1
เครื่องปรุงรส	- ลดปริมาณจุลินทรีย์	1
หอมแห้ง และ หอมผง	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	10
สตรอเบอร์รี่	- ยืดอายุเวลาการเก็บรักษา โดยการลดจุลินทรีย์ที่ทำให้เสื่อมเสียลงบางส่วน	3
ปลาและ ผลิตภัณฑ์ปลา	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในปลาแห้งระหว่าง การเก็บรักษาและจำหน่าย - ลดปริมาณจุลินทรีย์ในปลาที่บรรจุภาชนะหรือยังไม่ บรรจุภาชนะ - ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคในปลาที่บรรจุ ภาชนะหรือยังไม่บรรจุภาชนะ	1 2.2 2.2
ข้าวสาลีและ ผลิตภัณฑ์ จาก ข้าวสาลี	- ควบคุมการแพร่พันธุ์ของแมลงในผลิตภัณฑ์ที่เก็บ รักษา	1
กุ้งแช่แข็ง	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	5
แฮม	- ทำลายพยาธิและจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	4
กระเทียม	- ยับยั้งการงอก	0.15
หมูยอ	- ทำลายพยาธิและจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและยืด อายุเวลาการเก็บรักษา	5
ไส้กรอก	- ลดปริมาณจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค	5

ที่มา: กระทรวงสาธารณสุข (2539)

อนุมูลอิสระ

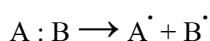
ความหมายของอนุมูลอิสระ (Free radical)

อนุมูลอิสระ คือ อะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไม่เป็นคู่ อยู่ในวงอิเล็กตรอนวงนอกสุด (outer orbital) เนื่องจากการมีอิเล็กตรอนที่โคจรเดี่ยว (unpaired electron) อยู่ในวงโคจรของโมเลกุลทำให้ไม่เสถียร อนุมูลอิสระจึงเป็นสารที่มีความไวในการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นสูงมาก โดยอนุมูลอิสระจะไปแย่งจับหรือดึงเอาอิเล็กตรอนจากโมเลกุลหรืออะตอมสารที่อยู่ข้างเคียงเพื่อให้ตัวมันเสถียร โมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงที่สูญเสียหรือรับอิเล็กตรอนจะกลายเป็นอนุมูลอิสระชนิดใหม่ ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะไปทำปฏิกิริยากับสารโมเลกุลอื่นต่อไป เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ต่อกันไปเรื่อยๆ โดยที่อนุมูลอิสระก็มีสมบัติเหมือนสารต่างๆไปตรงที่ความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอื่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง (pH) และความชื้น เป็นต้น

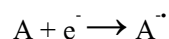
อนุมูลอิสระมีทั้งที่อยู่ในสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้า และอนุมูลในสถานะที่มีประจุไฟฟ้า โดยมีทั้งประจุบวกและประจุลบ สัญลักษณ์ทางเคมีของอนุมูลอิสระ คือ อิเล็กตรอนเดี่ยวของอนุมูลอิสระจะแสดงด้วยจุดในตำแหน่งข้างบนของสัญลักษณ์ทางเคมี เช่น อนุมูล $R^\cdot$ แทนอะตอมหรือโมเลกุลของอนุมูลอิสระที่ไม่จำเพาะเจาะจง ซึ่งอนุมูลอิสระมีทั้งที่เป็นประจุบวก ($R^{+\cdot}$) เช่น อนุมูล pyridinyl ($NAD^{+\cdot}$) และประจุลบ ($R^{\cdot-}$) เช่น อนุมูล superoxide ($O_2^{\cdot-}$) หรือเป็นกลาง เช่น อนุมูล peroxy ($ROO^\cdot$) หรืออนุมูล thiyl ($RS^\cdot$) เป็นต้น ซึ่งจากคำจำกัดความนี้ส่งผลให้อะตอมของธาตุและสารละลายหลายชนิดถูกจัดเป็นอนุมูลอิสระด้วย เช่น คลอรีนอะตอม ($Cl^\cdot$) และซิลเวอร์อะตอม ($Ag^\cdot$) เป็นต้น

อนุมูลอิสระที่มีความสำคัญในทางชีวภาพ ได้แก่ Hydroxyl radical ($HO^\cdot$), Superoxide anionradical ($O_2^{\cdot-}$) เป็นต้น อนุมูลเหล่านี้จัดเป็นอนุมูลที่ไวในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นสูงมาก การเกิดอนุมูลอิสระมีได้หลายกลไกที่แตกต่างกัน ดังนี้

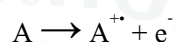
ก. การแตกของพันธะโควาเลนต์แบบโฮโมไลซิส (Homolysis)



ข. การเพิ่มอิเล็กตรอน 1 ตัว ให้แก่อะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า



ค. การสูญเสียอิเล็กตรอน 1 ตัว จากอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้า



อนุมูลอิสระและสารที่เกี่ยวข้องต่างๆในทางชีววิทยาที่สามารถเป็นตัวตั้งต้นที่ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระได้อีกหลายชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือกลุ่มที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive oxygen species, ROS) กลุ่มที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive nitrogen species, RNS) และกลุ่มที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบสำคัญ (reactive chlorinespecies, RCS)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation)

หมายถึงปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนจากวงโคจรให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เรียกสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และเรียกสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน นอกจากนี้ออกซิเดชันยังหมายถึงการเสียไฮโดรเจน อะตอมออกจากโมเลกุลอีกด้วย ปฏิกิริยาออกซิเดชันและอนุมูลอิสระนั้นมีความเกี่ยวข้อง เนื่องจากปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดอนุมูลอิสระของสารต่างๆได้มากมายหลายชนิด และอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอื่นๆเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อไป

ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระจะเกิดปฏิกิริยาที่เป็นแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกเป็นขั้นที่อนุมูลอิสระถูกสร้างหรือผลิตขึ้น เรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนอินิทิเอชัน (initiation step) ขั้นที่สองเป็นขั้นที่อนุมูลอิสระถูกเปลี่ยนไปเป็นอนุมูลอิสระตัวอื่นต่อๆกันไป เรียกว่าขั้นการแพร่ขยาย (propagation step) และขั้นสุดท้าย เรียกว่า ขั้นการเลิก (termination step) เป็นขั้นหยุดปฏิกิริยาของ

อนุมูลอิสระเป็นขั้นตอนที่มีการรวมกันของอนุมูลอิสระ 2 อนุมูล ได้เป็นสารที่มีความเสถียร โดยทั่วไปการที่โมเลกุลหรืออะตอมของสารที่มีอิเล็กตรอนเข้าคู่กันครบจะเสียอิเล็กตรอนไป กลายเป็นอนุมูลอิสระได้นั้น ต้องอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง แต่ก็มีโมเลกุลอีกหลายชนิดที่กลายเป็น อนุมูลอิสระได้เมื่ออยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งรวมถึงสารชีวโมเลกุลต่างๆที่พบในสิ่งมีชีวิตด้วย โดย ปฏิกิริยาของอนุมูลอิสระที่มักพบในสภาวะปกติของสิ่งมีชีวิตมีดังนี้

ขั้นอินิทิเอชัน (initiation step)

อนุมูลอิสระเกิดมาจากกลไกต่าง ๆ กันได้หลายวิธี คือ การแตกพันธะของโมเลกุลที่เรียกว่า Homolysis หรือการแยกสลายด้วยแสง (photolysis) หรือแยกสลายด้วยรังสี (radiolysis) หรือมาจาก ปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) ซึ่งปฏิกิริยาทั้ง 4 จัดเป็นกลไกพื้นฐานในการสร้างอนุมูลอิสระจาก สารอินทรีย์

ก. Bond homolysis

โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีอิเล็กตรอนวงนอกสุด (valence electron) เป็นจำนวนคู่แล้ว ในทางทฤษฎีสามารถแยกออกจากกันให้ผลลัพธ์เป็นอนุมูลอิสระได้ โดยในสภาวะที่อุณหภูมิปกติ การที่อิเล็กตรอนคู่ในพันธะโควาเลนต์สามารถแยกจากกันไปให้อะตอมแต่ละตัวได้นั้น ต้องเป็น โมเลกุลที่มีพลังงานระหว่างพันธะที่อ่อนมาก เช่น disulfide และการเกิดปฏิกิริยาจะมีอัตราที่ช้ามาก จึงคาดว่าไม่น่าจะเกิดในระบบของสิ่งมีชีวิตได้ ตัวอย่าง Bond homolysis แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้



ข. การแยกสลายด้วยแสง

เป็นการแตกพันธะของโมเลกุลจากการดูดพลังงานแสง เช่น แสงอัลตราไวโอเลต ทำให้ เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ที่พบบ่อยคือการแตกพันธะของ hydrogen peroxide (H_2O_2) กลายเป็นอนุมูล hydroxyl ($\text{HO}^{\cdot}$) โดยในสิ่งมีชีวิตพลังงานแสงจะถูกดูดโดยโมเลกุลที่มีความไวต่อแสง เช่น รงควัตถุ และสารอะโรมาติกคาร์บอนบางชนิด หลังดูดพลังงานแสงแล้วจะทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะที่ ตื่นตัว (excited state) จึงต้องมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเพื่อให้โมเลกุลกลับเข้าสู่สถานะพื้น

(ground state) ดังเดิมและวิธีหนึ่งของการคายพลังงาน คือ การแตกพันธะของโมเลกุลเกิดเป็นอนุมูลอิสระ 2 ตัว ดังนี้



ค. การแยกสลายด้วยรังสี

พลังงานจากรังสีชนิดต่างๆ เช่น รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ และอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงสามารถทำให้เกิดการแตกพันธะโคเวเลนต์ของโมเลกุลสารได้ โดยเฉพาะโมเลกุลน้ำจะให้อนุมูลประจุบวก (H_2O^+) และอนุมูล hydroxyl ($\text{HO}^\bullet$) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านี้เป็นตัวที่มีความไวในการเข้าทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์สูง ทำให้เกิดอนุมูลอิสระออกมามากมาย นอกจากนี้รังสียังทำให้เกิดอนุมูลอิสระได้โดยตรงจากสารประกอบเคมีของเซลล์อีกด้วย โดยเฉพาะสามารถก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันไม่อิ่มตัวในร่างกายสิ่งมีชีวิต ซึ่งปฏิกิริยานี้นับเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ

ง. ปฏิกิริยารีดอกซ์

ปฏิกิริยารีดอกซ์หรือเรียกอีกอย่างว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั่วไปในระบบทางชีววิทยา ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันบางชนิดมีประโยชน์ แต่มีปฏิกิริยาออกซิเดชันบางชนิดก่อให้เกิดความเสียหาย โดยสามารถก่อให้เกิดอนุมูลอิสระได้ ที่สำคัญคือโมเลกุลของอนุมูล superoxide ($\text{O}_2^\bullet$) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนในไมโทคอนเดรียและเยื่อหุ้มนิวเคลียส นอกจากนี้ปฏิกิริยารีดอกซ์ของไอออนโลหะในร่างกาย ก็จัดเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการเกิดอนุมูลอิสระเช่นกัน โดยเฉพาะเหล็ก (Fe^{2+}) และทองแดง (Cu^{2+}) โดยไอออนโลหะเปรียบเสมือนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์

ขั้นการแพร่ขยาย (propagation step)

เป็นขั้นที่อนุมูลอิสระมีการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนเป็นอนุมูลอิสระของสารอื่น ซึ่งปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ได้อนุมูลอิสระชนิดใหม่ออกมาตลอดเวลา จัดเป็นการเปลี่ยน

ตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่ไม่เข้าคู่ (unpaired electron) ซึ่งสามารถแบ่งกลไกของปฏิกิริยาในขั้นการแพร่ขยายได้ 3 ชนิด ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบทางชีววิทยาที่เกี่ยวกับสิ่งมีชีวิต คือ

ก. การถ่ายทอดอะตอมหรือกลุ่มของอะตอม (atom or group transfer)

จัดเป็นกลไกที่เกิดขึ้นมากที่สุดในลำดับของการแพร่ขยาย โดยปฏิกิริยาจะเกี่ยวข้องกับการดึงไฮโดรเจนดังสมการ



ข. การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (electron transfer)

เป็นการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากอนุมูลอิสระที่เป็นกลางหรือมีประจุลบไปให้โมเลกุลที่ไม่ใช่อนุมูลอิสระ (non-radical molecule) ซึ่งเป็นกลไกที่สำคัญของปฏิกิริยาออกซิเดชันไขมันในสิ่งมีชีวิต (Lipid peroxidation)

ค. การเติมอนุมูลอิสระ (addition of radicals)

เป็นการเติมกลุ่มอนุมูลอิสระเข้าไปในโมเลกุลต่างๆดังสมการ

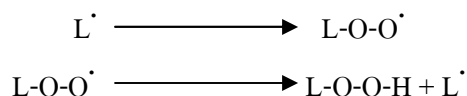


ตัวอย่างของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ การเติมอนุมูลอิสระของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ปฏิกิริยาออกซิเดชันโมเลกุลของไขมัน (Lipid peroxidation) แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันแสดงได้ดังสมการ

Initiation step :



Propagation step :



Termination step :

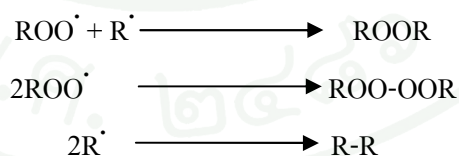


ขั้นการเลิก (termination step)

เป็นขั้นหยุดปฏิกิริยาลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ ประกอบด้วย กลไกหลัก 3 ชนิด คือ

ก. การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ (Homolinking and cross-linking of radicals)

เป็นการรวมตัวกันของอนุมูลอิสระ 2 โมเลกุล โดยการนำอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ของแต่ละโมเลกุลอนุมูลอิสระมาสร้างพันธะกัน ได้เป็นสารโมเลกุลใหม่ที่มีพันธะร่วมกัน หากเป็นการรวมตัวกันระหว่างอนุมูลอิสระ 2 โมเลกุลที่เป็นชนิดเดียวกัน เรียกโมเลกุลสารใหม่ที่ได้ว่า homodimer แต่ถ้าเป็นการรวมตัวของอนุมูลอิสระต่างชนิดกันเรียก heterodimer ซึ่งกลไกนี้เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการสร้างสารชีวโมเลกุลที่มีความเสถียรขึ้นมาใหม่ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก และไขมัน เป็นต้น การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระแสดงได้ดังนี้



ข. การกำจัดอนุมูลอิสระ (Radical scavenging)

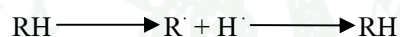
คำว่า Scavenge หมายถึงการกำจัดเอาขยะและสิ่งที่ไม่ต้องการออกไป ซึ่งในกรณีนี้เปรียบอนุมูลอิสระได้กับสิ่งที่ไม่ต้องการ การกำจัดออกจะกระทำโดยสารกลุ่มหนึ่งที่เรียกว่า scavengerหรือสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant) เช่น สารประกอบฟีนอลิกซึ่งจัดเป็น radical scavenger ที่มีประสิทธิภาพ รวมทั้งวิตามินซี วิตามินอี วิตามินเอ เป็นต้น

ค. การถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transfer)

เป็นการถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่ไม่ได้จับคู่ของอนุมูลอิสระออกจากโมเลกุล หรือเป็นการรับเอาอิเล็กตรอน 1 ตัวจากภายนอกมาเข้าคู่กับอิเล็กตรอนเดิมที่ยังมีที่ว่างอยู่ในโมเลกุล ทำให้สถานะการเป็นอนุมูลอิสระหมดไป เช่น อนุมูล superoxide ($O_2^{\cdot -}$) เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนกลายเป็นโมเลกุลออกซิเจนปกติ (O_2) เป็นต้น (จิติกานต์, 2551)

ปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลอิสระ 2 ตัว อาจรวมกันโดยเอาอิเล็กตรอนที่ขาดเข้ามาเข้าคู่กัน การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระเป็นไปได้ 2 ทาง คือ

1. การรวมตัวกันเกิดเป็นผลผลิตแบบเดิม ผลของการรวมตัวจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆในระบบนั้น



2. การรวมตัวกันกับอนุมูลอิสระตัวอื่นที่มีอยู่ในบริเวณนั้น ผลของการรวมตัวเกิดผลผลิตใหม่ๆ



นอกจากอนุมูลอิสระจะรวมตัวกันเองแล้ว ยังสามารถรวมตัวกับโมเลกุลปกติต่างๆไปได้ เช่น เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับ โมเลกุลของออกซิเจน เกิดเป็นเปอร์ออกซิลแรดิคัล



เปอร์ออกซิลแรดิคัล จะค่อนข้างเสถียร และมีอายุยาวกว่าอนุมูลอิสระทั่วไป เปอร์ออกซิลแรดิคัลจะไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีอีกมาก เปอร์ออกซิลแรดิคัลเพียง 1 โมเลกุลอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามมามากหลายชนิด

อนุมูลอิสระและโลหะทรานซิชันมีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก (Paramagnetism) อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของอนุมูลอิสระคือมีอิเล็กตรอนเดี่ยวไว้คู่ โดยอิเล็กตรอนจะสปินหรือหมุนรอบตัวเองให้ค่า magnetic moment หากอิเล็กตรอนเดี่ยวไว้คู่และหมุนสปินในทิศทางตรงกันข้ามจะไม่มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กนี้ในการตรวจวัดอนุมูลอิสระ จากสเปกตรัม ESR สามารถคำนวณในเชิงปริมาณได้ โดยใช้ความสูงของพีคหรือพื้นที่ (ริงตันต์, 2551)

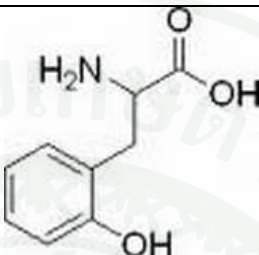
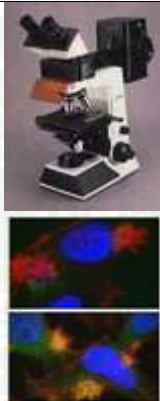
การตรวจวัดอาหารฉายรังสี

การตรวจวัดอาหารฉายรังสีและไม่ฉายรังสี สามารถทำได้ด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อพิสูจน์ทราบได้ว่า อาหารนั้นๆผ่านการฉายรังสีมาแล้วหรือไม่ การตรวจพิสูจน์มีได้หลายวิธี เช่น การวิเคราะห์จากการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะต่างๆภายในของอาหารฉายรังสีเทียบกับอาหารไม่ฉายรังสี ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ ทางเคมี และชีววิทยา ดังตารางที่ 3 (เสาวพงศ์ และ สุรศักดิ์, ม.ป.ป.)

ตารางที่ 3 แสดงวิธีการตรวจพิสูจน์อาหารฉายรังสีแบบต่างๆ

วิธีการ / หลักการ	รูปประกอบ	อาหารที่เหมาะสมจะใช้วัด
การวิเคราะห์ทางฟิสิกส์		
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance) – ESR โดยอนุมูลอิสระ ที่เกิดจากการฉายรังสี ถูกจับไว้ในพาหะ ที่มีในองค์ประกอบของอาหาร เช่น crystalline sugars หรือ bone เมื่อทำการผ่าน คลื่นไมโครเวฟ และสนามแม่เหล็ก วัดออกมา ในรูปของสเปกตรัมจาก Spectrophotometer		อาหารเนื้อสัตว์ที่มี ส่วนประกอบของกระดูก เครื่องเทศ ผักผลไม้แห้ง
การเปล่งแสงเหตุความร้อน (Thermoluminescence) - TL โดยพลังงานที่ถูกจับไว้ในพาหะที่มีแร่ธาตุเช่น ซิลิกาในอาหารฉายรังสีจะถูกปลดปล่อย หลังจากกระตุ้นด้วยความร้อน		อาหารที่มีส่วนประกอบ ของแร่เช่นซิลิกา หอย กุ้ง ปู เครื่องเทศ สมุนไพร แห้ง เมล็ดธัญพืช
โฟโตสตีมูเลตลูมิเนสเซนส์ (Photo stimulated luminescence) - PSL โดยพลังงานที่ถูกจับไว้ในพาหะ ที่มีแร่ธาตุ เช่น silicates หรือ calcites ในอาหารฉายรังสี จะถูกปลดปล่อยออกมา หลังจากกระตุ้นด้วยแสง เช่น อินฟราเรด		สมุนไพร สัตว์น้ำ จำพวก มีเปลือกเช่นหอย กุ้ง ปู
การวัดความหนืด (Viscosity) โดยวัดความหนืดของอาหารที่ cell wall มีการเปลี่ยนแปลง การซึมผ่าน ของสารละลาย เข้าไปในเซลล์ หลังฉายรังสี		พริกไทย อบเชย กุ้ง

ตารางที่ 3 (ต่อ)

วิธีการ / หลักการ	รูปประกอบ	อาหารที่เหมาะสมจะใช้วัด
การวิเคราะห์ทางชีววิทยาและจุลชีววิทยา		
การวัดปริมาณ o-tyrosine ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่เซลล์ใช้สังเคราะห์โปรตีนในอาหาร		เนื้อสัตว์ ไก่ ปลา อาหารทะเล
DNA Comet Assay โดยตรวจวัด DNA ภายในอาหารฉายรังสีโดยใช้ Microgel electrophoresis		ไก่ หมู ปลา ผัก ผลไม้
Direct epifluorescent / aerobic plate count (DEFT/APC) โดยตรวจวัดจุลินทรีย์ในอาหารหลังการฉายรังสี		เครื่องเทศ ไก่ สมุนไพร

ที่มา: เสาวพงศ์ และ สุรศักดิ์ (ม.ป.ป.)

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

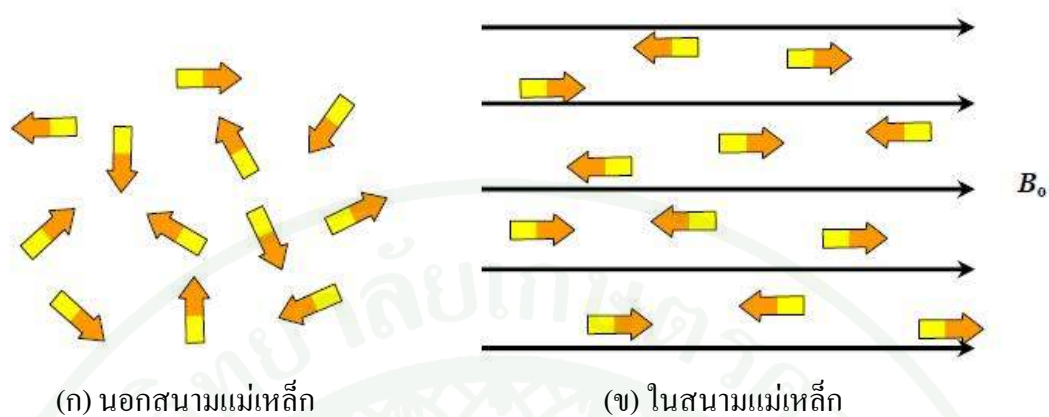
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance, ESR) หรืออิเล็กตรอนพาราแมกเนติกเรโซแนนซ์ (electron paramagnetic resonance, EPR) สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคการวัดการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงไมโครเวฟอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนเดี่ยว (unpair electron) อยู่ในสนามแม่เหล็ก สารหรือไอออนที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยว ได้แก่ อนุมูลอิสระ (free radical) โมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคี่ (odd electron molecule) ไอออนเชิงซ้อน (complex ions) สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชัน (transition-metal complexes) แลนทาไนด์ไอออน (lanthanide ions) โมเลกุลที่มีสถานะทริฟเลต (triplet-state molecule) และสารที่เป็นพาราแมกเนติก (paramagnetic molecule) เช่น O_2 , NO , NO_2 และ ClO_2 เป็นต้น

อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบและมีการเคลื่อนที่ นอกจากจะหมุนรอบนิวเคลียสแล้วยังหมุนรอบแกนตัวเองด้วย การหมุนรอบแกนตัวเองทำให้มีโมเมนต์เชิงมุมเกิดขึ้น เลขควอนตัมที่ใช้กำหนดค่าโมเมนต์ดังกล่าวเรียกว่า เลขควอนตัมเชิงสปิน (spin quantum number, m_s) ค่า m_s จะบอกถึงการหมุนของอิเล็กตรอนรอบแกนตัวเอง ซึ่งสามารถหมุนตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา m_s จึงกำหนดไว้ 2 ค่าคือ $+\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ (นิพนธ์, 2547)

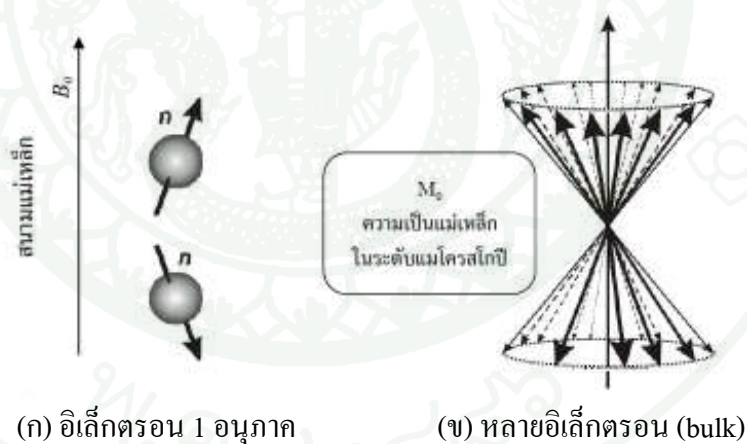
เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุของอิเล็กตรอนเองในอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนมีแมกเนติกโมเมนต์เกิดขึ้นเช่นเดียวกับค่าแมกเนติกโมเมนต์ของนิวเคลียส โดยสปินโมเมนต์เชิงมุมของอิเล็กตรอนจะมีสองค่าคือ $m_s = +\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$ เมื่อไม่มีอิทธิพลของสนามแม่เหล็กโมเมนต์ของอิเล็กตรอนจะจัดเรียงตัวแบบสุ่มไม่เป็นระเบียบ (orient randomly) ดังภาพที่ 1

ซึ่งถือได้ว่า สภาวะทางสปิน (spin state) ของอิเล็กตรอนทั้งสองแบบมีพลังงานเท่ากัน (doubly degenerate) แต่เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนทั้งหลายจะจัดวางตัวอยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยมีทิศทางของโมเมนต์บางส่วนวางตัวตรงข้ามกับทิศทางของสนามแม่เหล็ก และบางส่วนจัดเรียงอยู่ในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก กล่าวได้ว่าอิเล็กตรอนมีสภาวะทางสปินได้สองแบบซึ่งบ่งด้วยค่าสปินโมเมนต์เชิงมุมทั้งสอง ($m_s = +\frac{1}{2}$ และ $-\frac{1}{2}$) สปินของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 1 การจัดเรียงตัวของโมเมนต์ของอิเล็กตรอน (ก) นอกสนามแม่เหล็กและ (ข) ในสนามแม่เหล็ก

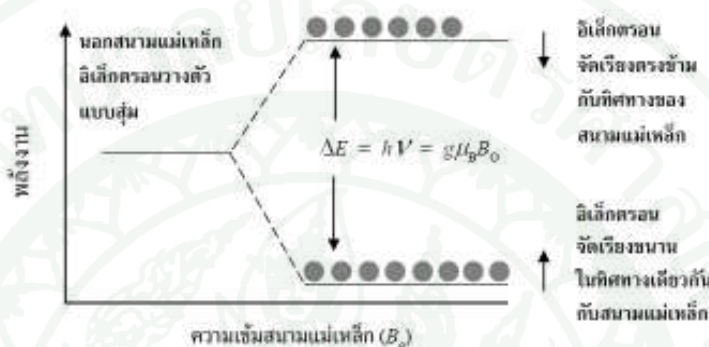
ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)



ภาพที่ 2 สถานะทางสปินของอิเล็กตรอนภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก (ก) สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยวหนึ่งอนุภาค (ข) สำหรับสารตัวอย่างทั้งก้อน ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนหลายอนุภาค

ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)

ซึ่งแสดงทั้งระดับจุลทรรศน์ (microscopic level) สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยว 1 อนุภาค และระดับมหทรรศน์ (macroscopic level) สำหรับสารตัวอย่างทั้งก้อน (bulk sample) ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอนหลายอนุภาคและเป็นระดับที่มองเห็นได้ และภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กนี้ ทำให้สถานะทางสปินของอิเล็กตรอนทั้งสองแบบมีพลังงานไม่เท่ากันดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ผลของอันตรกิริยาซีมานทำให้การจัดเรียงตัวทั้งสองแบบของอิเล็กตรอนเดี่ยวมีระดับพลังงานไม่เท่ากัน

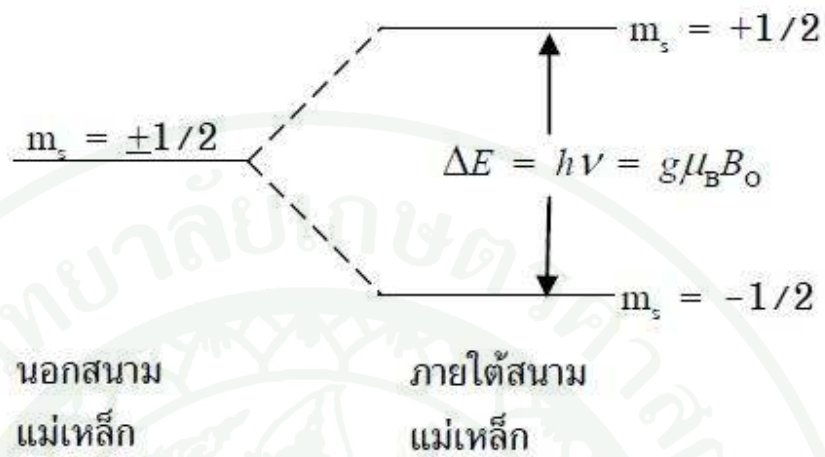
ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)

สถานะทางสปินที่มีทิศทางเดียวกัน กับทิศทางของสนามแม่เหล็ก ($m_s = -\frac{1}{2}$) จะมีพลังงานต่ำกว่าสถานะทางสปินที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก ($m_s = +\frac{1}{2}$) ผลของสนามแม่เหล็กต่อทิศทางการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนหรือที่มีผลต่อการแยกของระดับพลังงานทั้งสองนี้เรียกว่า **อันตรกิริยาซีมาน** (Zeeman interaction) ความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างสถานะทางสปินสองแบบดังกล่าวมีค่าเท่ากับ

$$\Delta E = h\nu = g\mu_B B_0 \quad (1)$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์, ν คือความถี่ของรังสี, μ_B คือค่าบอร์แมกเนตอนของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าเท่ากับ $9.274 \times 10^{-24} \text{ J.T}^{-1}$, B_0 คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field strength) และ g คือแฟกเตอร์การแยกลองเด (Lande' splitting factor) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.00232 สำหรับอิเล็กตรอนอิสระ (อิเล็กตรอนที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับออร์บิทัลใดๆ ในโมเลกุล) โดยมาก

อิเล็กตรอนในเรดิคัลอินทรีย์จะมีค่า g อยู่ระหว่าง 1.99-2.01 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของอิเล็กตรอนอิสระ แต่สำหรับสารเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันจะมีค่ากว้างกว่า และเนื่องจากระบบเหล่านี้มักมีสมบัติแม่เหล็กแบบพาราแมกเนติก (เป็นระบบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวและอีพาร์แทรนซิชันจะเกิดได้เฉพาะระบบที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวตั้งแต่ 1 อนุภาคขึ้นไปเท่านั้น) ปัจจุบันจึงนิยมเรียกเทคนิคนี้ว่า อิเล็กตรอนพาราแมกเนติกเรโซแนนซ์ (EPR) หรือ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR) ผลของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในเทอมของค่า m_s แสดงดังภาพที่ 4 ฉะนั้นถ้ามีพลังงานรังสีที่เหมาะสมซึ่งปกติอยู่ในช่วงคลื่นไมโครเวฟ อิเล็กตรอนจะสามารถเปลี่ยนสถานะทางสปินจากค่า m_s เท่ากับ $-\frac{1}{2}$ ไปยังสถานะที่มี m_s เท่ากับ $+\frac{1}{2}$ ได้โดยการดูดกลืนพลังงานรังสีดังกล่าว สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มปกติ (ประมาณ 350 mT) นั้น ความถี่ของการเกิดเรโซแนนซ์จะอยู่ในย่าน X-แบนด์ของคลื่นรังสีไมโครเวฟ ซึ่งมีค่าประมาณ 10^4 MHz และเป็นย่านปกติที่ใช้กันมากที่สุดสำหรับเครื่องอีพาร์สเปกโตรมิเตอร์ ความถี่ในการเกิดเรโซแนนซ์นี้จะสอดคล้องกับค่า ΔE ซึ่งการดูดกลืนจะเกิดขึ้น เมื่อความถี่ของรังสีมีค่าพอดีกับความแตกต่างของระดับพลังงานในภาพที่ 4 และ 5 รังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟจะกระตุ้นอิเล็กตรอนที่มีสถานะทางสปินวางตัวขนานในทิศทางเดียวกันกับสนามแม่เหล็ก ($m_s = -\frac{1}{2}$ สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยว) ไปสู่สถานะทางสปินที่มีทิศทางตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก ($m_s = +\frac{1}{2}$ สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยว) ดังนั้นในการทำให้เกิดเรโซแนนซ์ดังกล่าวทำได้โดยกำหนดให้สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่แล้วสแกนค่าความถี่ของรังสี และความถี่ของรังสีที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์นี้จะสัมพันธ์โดยตรงกับความแตกต่างของระดับพลังงาน (ΔE) ดังภาพที่ 6 หรืออาจกำหนดให้ความถี่ของรังสีมีค่าคงที่แล้วสแกนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กก็ได้ แต่โดยมากเครื่องอีพาร์สเปกโตรมิเตอร์จะถูกออกแบบให้ทำงานโดยกำหนดให้เป็นกรณีหลัง โดยสัญญาณของอีพาร์จะแสดงผลในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืนพล็อตกับความเข้มสนามแม่เหล็กดังแสดงในภาพที่ 7



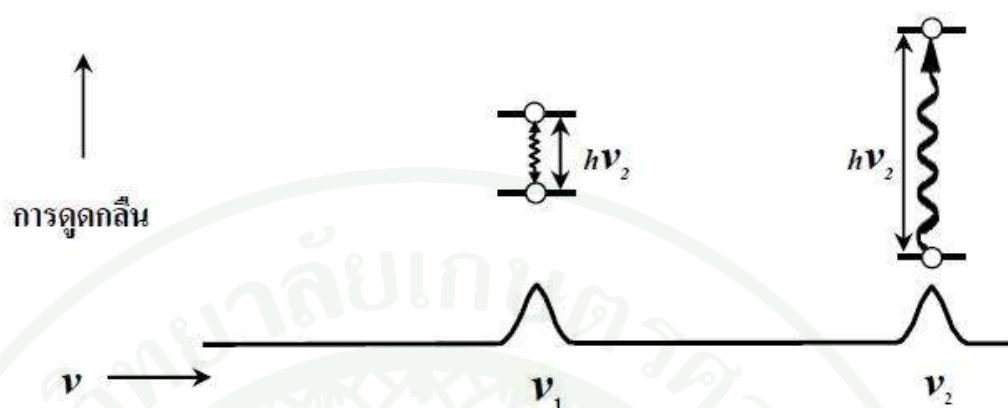
ภาพที่ 4 ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเดี่ยวในสนามแม่เหล็ก

ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)



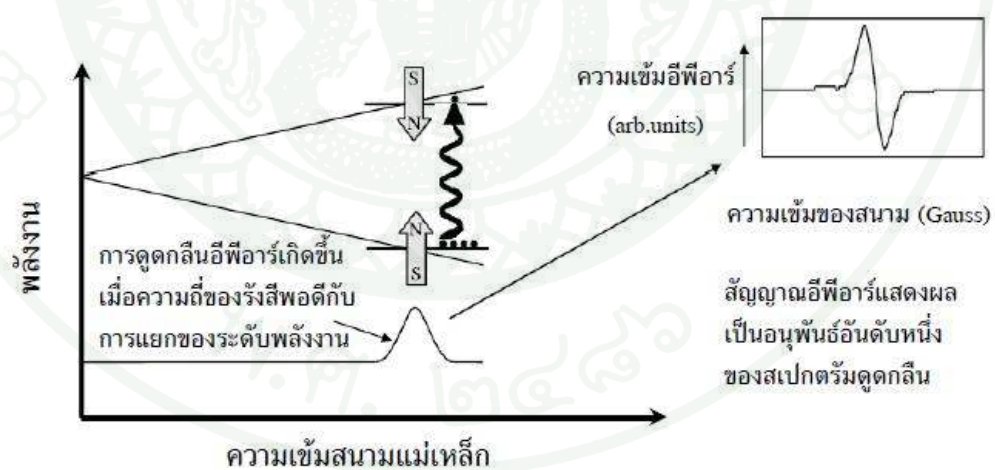
ภาพที่ 5 การเกิดเรโซแนนซ์การดูดกลืน เมื่อความถี่ของรังสีมีค่าพอดีกับความต่างของระดับพลังงาน

ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของรังสีที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์กับความแตกต่างของระดับพลังงาน

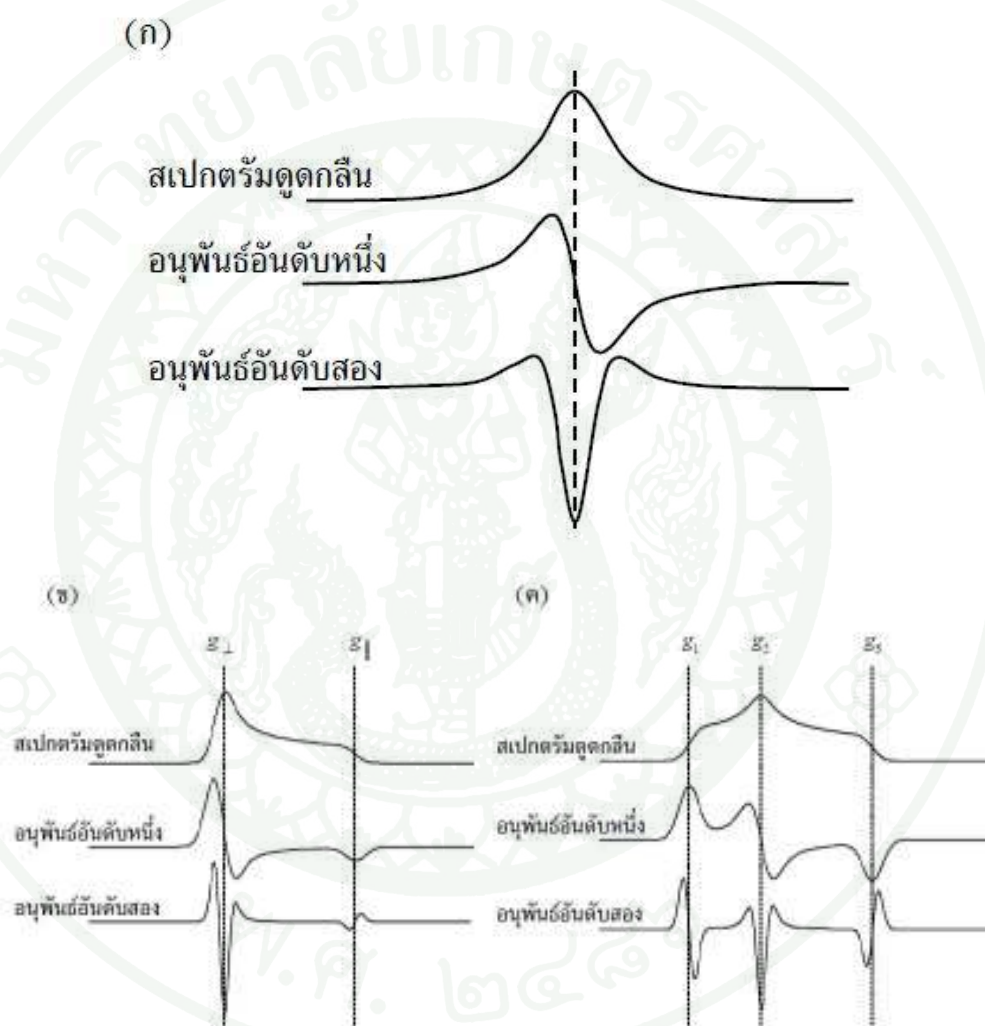
ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเรโซแนนซ์การดูดกลืนกับสัญญาณฮิฟอาร์ที่แสดงผลในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืน

ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)

แบบของสเปกตรัมดูดกลืนรวมทั้งอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสเปกตรัมดูดกลืน สำหรับไอโซทรอปิกสเปกตรัม (ก) และแอนไอโซทรอปิกสเปกตรัมแบบแอกเซียล (ข) และแบบรอมบิก (ค) แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แบบของสเปกตรัมดูดกลืน รวมทั้งอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของสเปกตรัมดูดกลืนสำหรับ (ก) ไอโซทรอปิกสเปกตรัม (ข) แอนไอโซทรอปิกสเปกตรัมแบบแอกเซียล ($g_{\perp} > g_{\parallel}$) และ (ค) แอนไอโซทรอปิกสเปกตรัมแบบรอมบิก

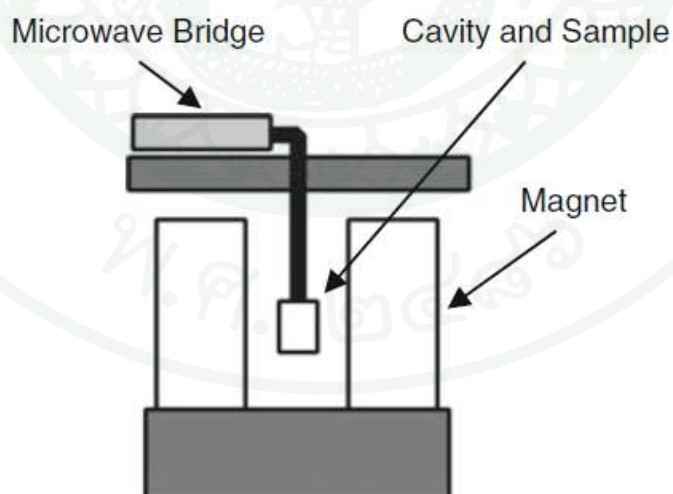
ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)

ข้อมูลเบื้องต้นโดยทั่วไปที่ได้จากอีพอาร์สเปกตรา ได้แก่

1. ทำให้เราทราบว่ามียูเล็กตรอนอิสระหรืออิเล็กตรอนเดี่ยว เช่น เรดักัลอิสระในสารตัวอย่าง
2. ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลและสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้อิเล็กตรอนเดี่ยว
3. ทราบข้อมูลทางพลวัตของโมเลกุล (molecular dynamics) ได้แก่ ขนาดหรือปริมาณของการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (degree of molecular motion) และผลของการผ่อนคลาย (relaxation effect)

ระบบการทำงานของเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์นั้นโดยทั่วไปมีองค์ประกอบด้วยกัน 3 ส่วนหลัก คือ ส่วน Microwave bridge ส่วน Cavity and Sample และ ส่วน Magnet ดังที่แสดงในภาพที่ 9



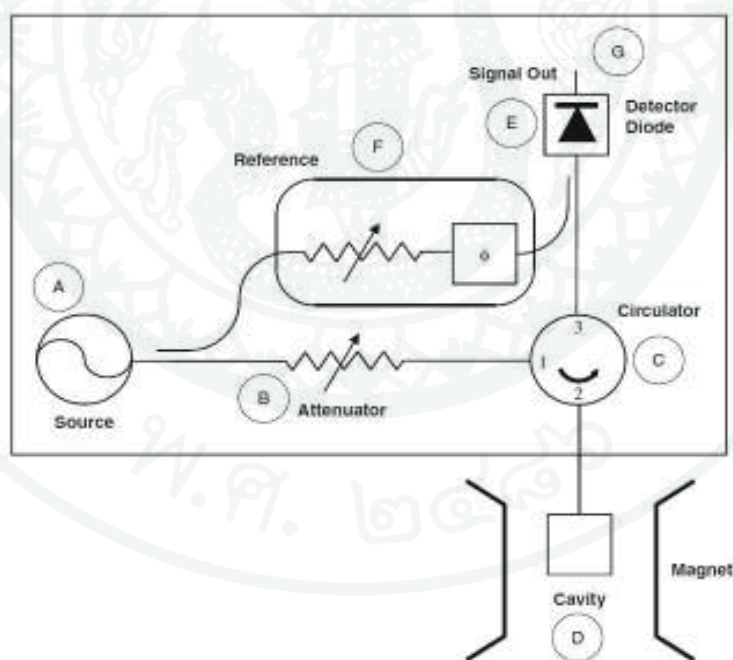
ภาพที่ 9 แผนภาพแสดงส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

ที่มา: Eaton (2010)

Microwave bridge ดังภาพที่ 10 เป็นส่วนที่มีหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟซึ่งก็คือจุด A และมี detector หรือก็คือจุด E ซึ่งใช้วัดสัญญาณ ESR ภายใน microwave bridge นอกจากนั้นยังมีอุปกรณ์ต่างๆหลากหลายชนิด ที่ร่วมกันทำงาน

Cavity and Sample เป็นส่วนที่ใช้บรรจุตัวอย่างซึ่งต้องการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปรี-โซแนนซ์ โดย cavity นั้นถูกออกแบบมาให้สะท้อนคลื่นไมโครเวฟที่ไม่ถูกสารตัวอย่างดูดกลืนกลับไปยัง microwave bridge

Magnet คือส่วนที่มีหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กให้กับสารตัวอย่างทำให้เกิด Zeeman effect ขึ้น โดยสนามแม่เหล็กนั้นจะถูกสร้างขึ้นจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดตัวนำ 2 ขดซึ่งอยู่ภายในบริเวณสี่เหลี่ยมสีขาวในภาพที่ 9 ความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถปรับได้โดยทำการปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดด้วยคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 10 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในของ microwave bridge และเส้นทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟ

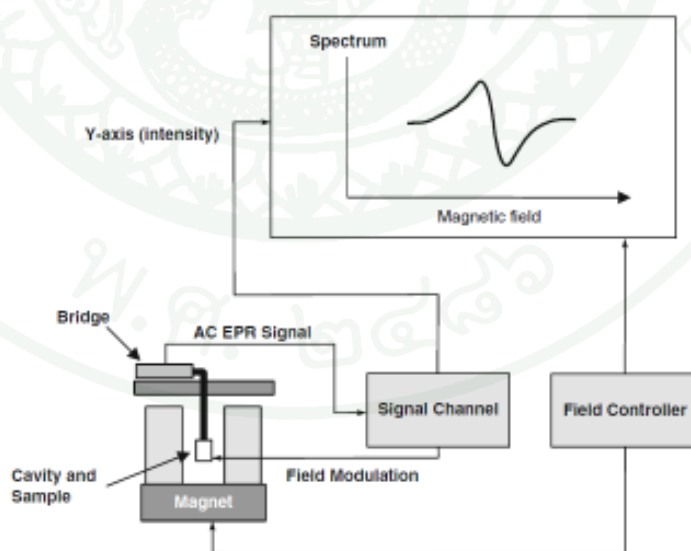
ที่มา: Eaton (2010)

คลื่นไมโครเวฟสร้างขึ้นจากจุด A แล้วถูกแยกออกเป็น 2 เส้นทางเส้นทางที่ 1 ไปกระทบกับสารตัวอย่างที่จุด D และเส้นทางที่ 2 ไปยัง detector diode ที่จุด E เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิง

ในเส้นทางที่ 1 คลื่นไมโครเวฟจะถูกส่งต่อไปยังจุด B ซึ่งเป็น attenuator ทำให้ที่ควบคุมให้กำลังและความถี่ของคลื่นไมโครเวฟคงตัว จากนั้นไปถึงจุด C ซึ่งเป็นอุปกรณ์มีหน้าที่บังคับให้คลื่นไมโครเวฟที่มาจากจุด B เท่านั้นที่ไปถึงยังจุด D ได้ อีกทั้งยังบังคับให้คลื่นส่วนที่สะท้อนกลับออกมาจาก cavity ที่จุด D ไปยังจุด E เท่านั้น

ส่วนเส้นทางที่ 2 ข้อมูลของคลื่นไมโครเวฟจะถูกเก็บที่จุด F เพื่อใช้เปรียบเทียบกับคลื่นที่ไปกระทบสารตัวอย่าง

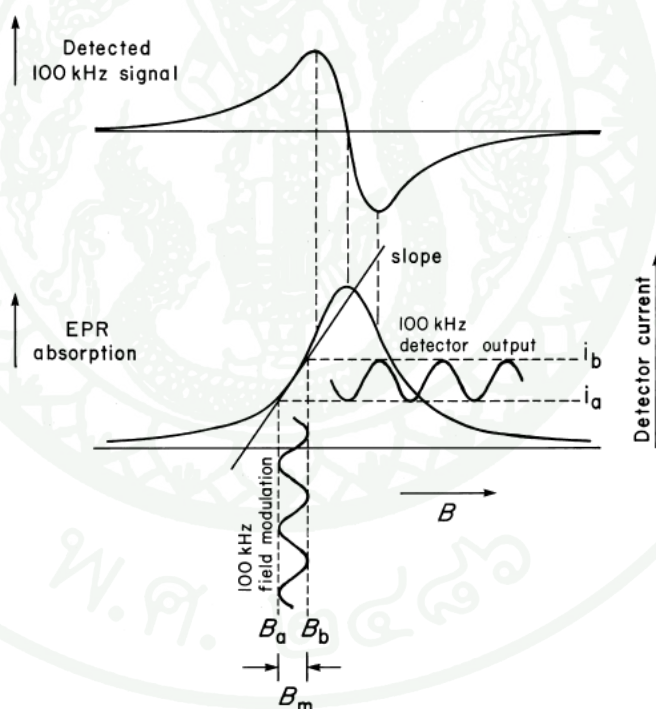
Detector diode ที่จุด E จะเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าของแต่ละเส้นทางให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากทั้งสองเส้นทางจะถูกนำไปเปรียบเทียบส่วนต่างเพื่อวิเคราะห์คลื่นไมโครเวฟที่ถูกสารตัวอย่างดูดกลืนไป แล้วแสดงผลของข้อมูลที่ได้ในรูปของกราฟเส้น ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แผนภาพการทำงานโดยรวมของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

ที่มา: Eaton (2010)

สำหรับการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ เนื่องจากอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะคำนึงถึงผลของสัญญาณรบกวน (noise) ทำการกำจัดผลของสัญญาณรบกวนทำได้โดยกำหนดให้ค่าสนามแม่เหล็กมีการสั่นด้วยแอมพลิจูดค่าต่ำซึ่งเรียกว่า modulation amplitude และมีความถี่ในการสั่นที่เรียกว่า modulation frequency เมื่อค่าสนามแม่เหล็กมีการสั่น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ซึ่งแปลงมาจากกำลังของคลื่นไมโครเวฟเกิดการสั่นด้วยความถี่ที่เท่ากันไปด้วย ดังนั้นเมื่อเลือกเก็บค่ากระแสไฟฟ้าที่มีความถี่ตรงกับ modulation frequency จึงยืนยันได้ว่าเป็นผลของการทดลองที่ปราศจากผลของสัญญาณรบกวน ส่วนแอมพลิจูดของกระแสที่วัดได้นั้นสามารถประมาณได้ว่ามีค่าเท่ากับความชันของสเปกตรัมดูดกลืนที่ตำแหน่งค่าสนามแม่เหล็กนั้นๆ ดังนั้นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์จึงแสดงผลออกมาในรูปของเส้นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืน ดังตัวอย่างในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การแสดงผลของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืนจากการสั่นของสนามแม่เหล็กด้วย modulation frequency (100 kHz) และ modulation amplitude (B_m)

ที่มา: Weil (2007)

แฟกเตอร์ g (g-factor)

ค่า g ที่ได้จากอีพ็อร์สเปกตร้าของสารตัวอย่าง จะบ่งถึงตำแหน่งของสนามแม่เหล็ก (ที่ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟนั้น) ที่ทำให้เกิดอีพ็อร์แทรนซิชัน โดย g มีค่าเท่ากับ

$$g = hv/(\mu_B B_o) \quad (2)$$

แฟกเตอร์ g เป็นค่าคงที่อัตราส่วน (proportionality constant) ซึ่งสารส่วนใหญ่มีค่าโดยประมาณ g ประมาณ 2 แต่ค่าจะแตกต่างกันไปขึ้นกับโครงแบบอิเล็กตรอน (electron configuration) ของเรดิคัลหรือไอออนโลหะนั้นๆ ถ้ากำหนดให้แฟกเตอร์ g มีค่าคงที่เท่ากับ 2 จะพบว่าความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์นั้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของรังสีไมโครเวฟที่เปลี่ยนไปดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการเกิดเรโซแนนซ์ B_{res} เมื่อ $g = 2$ ที่ความถี่ต่างๆ บางความถี่ของรังสีไมโครเวฟ

ไมโครเวฟแบนด์	ความถี่ (GHz)	B_{res} (mT)
L	1.1	39
S	4.0	143
X	9.75	348
Q	34.0	1210
W	94.0	3350

ที่มา: สุจิตรา (ม.ป.ป.)

ดังนั้นค่าของแฟกเตอร์ g จึงช่วยในการวิเคราะห์ชนิดของสารตัวอย่างได้ เช่น สามารถระบุหรือจำแนกชนิดของไอออนโลหะ เลขออกซิเดชัน สภาวะทางสปิน และสิ่งแวดล้อมที่โคออร์ดิเนตล้อมรอบไอออนโลหะ ตัวอย่างเช่น ไซโตโครมออกซิเดสซึ่งเป็นเมทัลโลโปรตีนตัวหนึ่งที่มีศูนย์กลางโลหะมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง จึงใช้ค่า g ในการจำแนกและพิสูจน์เอกลักษณ์ของศูนย์กลางโลหะแต่ละแบบที่แตกต่างกันได้

ปัจจัยโดยทั่วไปที่มีผลต่อรูปร่างของอีพาร์สเปกตรา ได้แก่

1. กรณีที่อิเล็กตรอนในสารตัวอย่างนั้นเกิดการผ่อนคลายอย่างรวดเร็ว (rapid relaxation) จะให้เส้นสเปกตรัมที่กว้าง ขณะที่สารตัวอย่างที่มีการผ่อนคลายของอิเล็กตรอนช้ากว่าก็จะให้เส้นสเปกตรัมที่แคบกว่า

2. ระบบที่มีอันตรกิริยาไฮเพอร์ไฟน์แบบอ่อน (weak hyperfine interaction) และ/หรือมีสมบัติ แอนไอโซทรอป (มีออร์บิทัลโมเมนต์) ร่วมด้วย จะทำให้สัญญาณของอีพาร์มีความกว้างแบบไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneous broadening)

3. กรณีที่สารตัวอย่างที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นของอิเล็กตรอนเดี่ยวสูง (high concentration of unpaired electrons) จะทำให้ได้สเปกตรัมที่กว้าง เนื่องจากมีอันตรกิริยาระหว่างสปิน (spin-spin interaction) เกิดขึ้นและการผ่อนคลาย (relaxation) ของ “สปิน-สปิน” ก็เกิดขึ้นได้เร็ว ขณะที่สารตัวอย่างที่มีปริมาณของอิเล็กตรอนเดี่ยวต่ำจะให้สเปกตรัมที่แคบ (สุจิตรา, ม.ป.ป.)

สเปกตรัมจากเครื่อง ESR เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่ปฏิสัมพันธ์หรือมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม ต่างๆ ได้แก่

1. สนามแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กการสปินของอิเล็กตรอนจะหมุนในทิศทางที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวและขนานกับสนามแม่เหล็ก และเมื่อให้พลังงานจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีแมน โดยอิเล็กตรอนเดี่ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับพลังงาน มีการสปินตรงกันข้าม คือระดับกระตุ้นและระดับพื้น โดยอิเล็กตรอนที่ดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนทิศทางการสปินไปในทางตรงข้ามกับการสปินที่ระดับพื้น

2. ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนอื่นๆ วิ่งเป็นรอบวงออร์บิต และการสปินหมุนรอบตัวเอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าจี (g หรือ g – factor)

3. ปฏิกิริยาระหว่างการสปินของอิเล็กตรอนและการสปินของอิเล็กตรอนและการสปินของนิวเคลียส หรือปฏิกิริยาไฮเพอร์ไฟน์ (hfi) ทำให้เกิดการแยกออกสัญญาณ ESR

4. ปฏิบัติระหว่างสปินของอิเล็กตรอนเดี่ยวไว้คู่กรณีที่อิเล็กตรอนเดี่ยวไว้คู่มากกว่าหนึ่งหรือค่าสปินออร์บิเตอร์มีค่ามากกว่า $\frac{1}{2}$ ($S > \frac{1}{2}$)

อนุมูลอิสระซึ่งมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับอุบัติการณ์ของโรคต่างๆ อนุมูลอิสระจะไม่คงตัวมีความไวสูงจะไปทำปฏิกิริยากับชีวโมเลกุลเกิดเป็นอนุมูลที่มีความคงที่มีความคงตัวมากขึ้นสามารถตรวจวัดด้วยเครื่อง ESR แต่มีสัญญาณอ่อนและเป็นสัญญาณที่ broad การตรวจวัดจึงนิยมใช้เทคนิคสปินแทร็ปและสัญญาณ ESR จะวัดเป็นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ในแกน X ส่วนแกน Y เป็นค่าการดูดกลืนพลังงานจากแสง ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ค่าการดูดกลืนแสงในแกน Y จะใช้ first derivative แทนค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งจะทำให้สัญญาณเป็นพิกที่แหลมและสามารถแยกพิกซ้อนกันให้เห็นชัดเจนขึ้น แต่จะทำให้ความสูงลดลง ค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามแกน X จะมีหน่วยเป็น Gauss (G) หรือ miliTesla (mT)

การวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกในค.ศ.1945 โดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อ Zaboisky โดยวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ใน Mn^{2+} และ Cu^{2+} หลังจากนั้นเป็นต้นมา อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้างของวัสดุมากมายทั้งวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นก๊าซ ของแข็ง และของเหลว การวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์เป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์ และยังเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์เป็นอย่างมากด้วย เช่น ช่วยวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดมะเร็งในร่างกาย โดยการวัดหาอนุมูลอิสระในเนื้อเยื่อหรือเม็ดเลือดจำพวก $O_2^{\cdot-}$, $O^{\cdot-}$, $OOH^{\cdot}$, $OH^{\cdot}$ เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จาก ESR นั้นโดยทั่วไปจะใช้ยังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ส่วนมากคือคลื่นไมโครเวฟ:GHz กำลังประมาณ 1 mW) ที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่งเข้าสู่วัสดุและสแกนหรือเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วจึงวัดปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นสเปกตรัม ESR ในแนวแกนนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก และในแนวแกนตั้ง คือ ปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัติ นิยมพล็อตกราฟในรูป differential curve ดังนั้นสเปกตรัม ESR แกนในแนวนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เช่น สแกน จาก 300-350 mT) และแกนในแนวตั้งคือปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ จาก Spectrum ESR เราได้ข้อมูลที่สำคัญๆ คือ

1. จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนไว้คู่ในวัสดุ

2. จากตำแหน่งของยอด curve จะได้ค่า g ของวัสดุซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอน ไร้คู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอม หรือ แรดิคัล

3. จากค่า Line width จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับ interaction ของ spin ข้างเคียงตลอดจนระยะห่าง ของ spin แต่ละตัว

4. จาก hyperfine structure (สเปกตรัมที่มี peak จำนวนมาก) จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุหรือ อะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าคืออะไร

วัสดุที่จะใช้วัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้นั้นต้องมีอิเล็กตรอนไร้คู์ และปรากฏการณ์ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์นี้ สามารถนำไปใช้ตรวจวัด เพื่อหาว่าในวัสดุมีอนุมูลอิสระหรือมี อิเล็กตรอนเดี่ยวหรือไม่ ถ้ามีจะมีจำนวนมากน้อยเท่าไร และจากรูปร่างของสเปกตรัมของ อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ก็สามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลได้หลายอย่าง เช่น หาโครงสร้างของ โมเลกุลตรวจหาความเร็วของปฏิกิริยา กลไกของปฏิกิริยาต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุที่จะวัด อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้นั้น อาจจะไม่ได้อิเล็กตรอนไร้คู์ตั้งแต่เริ่มแรก แต่อาจใช้วิธีการทาง ฟิสิกส์ หรือ เคมี เพิ่มเข้าไปเพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนไร้คู์ขึ้นมาก็ได้ ทั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ การศึกษาค้นคว้าการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหรือปฏิกิริยาของวัสดุก็ได้ด้วยดังนั้นวัสดุที่ใช้วัด ESR ได้ คือ

- 1) เป็นวัสดุที่มีอิเล็กตรอนไร้คู์อยู่ตั้งแต่แรก
- 2) เป็นวัสดุที่เริ่มแรกไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู์ แต่ต่อมาถูกทำให้เกิดอิเล็กตรอนไร้คู์ด้วยวิธีทาง ฟิสิกส์ หรือเคมี

สำหรับค่า g เนื่องจากอนุมูลอิสระหรืออิเล็กตรอนไร้คู์ ส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ตามลำพังแต่อยู่ เป็นอะตอมหรือโมเลกุล ดังนั้นอิเล็กตรอนไร้คู์จะหมุนหรือสปินทั้งรอบตัวเองและหมุนรอบ นิวเคลียสเป็นวงออร์บิทพร้อมกัน การหมุนของอิเล็กตรอนไร้คู์เป็นวงออร์บิทรอบนิวเคลียสทำให้ สนามแม่เหล็กภายในเกิดขึ้นนอกเหนือจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสปินรอบตัวเอง ซึ่ง สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองกลไกมีทั้งต้านกันหรือเสริมกัน มีผลทำให้ค่า g จากอิเล็กตรอนไร้คู์ ของอะตอมหรือโมเลกุลมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 2 ซึ่งค่า g ของอิเล็กตรอนไร้คู์ที่อยู่ตามลำพังมีค่า

เท่ากับ 2.00232 ดังนั้นการหมุนของอิเล็กตรอนเป็นวงออร์บิตรอบนิวเคลียสทำให้ค่า g เปลี่ยนไป (ริงสันต์, 2551)

เมื่ออิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในอะตอมหรือโมเลกุลต่างๆเช่นสารประกอบของโลหะทรานซิชัน และอนุมูลอิสระ เป็นต้น นิวเคลียสของอะตอมหรือโมเลกุลที่อิเล็กตรอนเดี่ยวไปอยู่ด้วยจะสร้างสนามแม่เหล็ก ΔB ขึ้นมานอกเหนือจากสนามแม่เหล็กที่เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ให้กับสารตัวอย่าง ในสถานการณ์เช่นนี้ สนามแม่เหล็กที่ส่งผลต่ออิเล็กตรอนเดี่ยวจะมีทั้ง B_0 และ ΔB จึงได้สมการ (1) ในรูปแบบใหม่คือ

$$h\nu = g_e \mu_B (B_0 + \Delta B) \quad (3)$$

โดย g_e คือค่า g ของอิเล็กตรอนอิสระซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.00232 แต่ในการทดลองจริงนั้น มีเพียงค่าสนามแม่เหล็ก B_0 ที่เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ให้กับสารตัวอย่างเท่านั้นที่ทราบค่า ส่วน ΔB ที่เป็นผลจากนิวเคลียสรอบอิเล็กตรอนเดียวนั้น ไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง สิ่งที่ได้จึงเป็นการเปลี่ยนมุมมองการรบกวนของนิวเคลียสที่เกิดจากการรบกวนสนามแม่เหล็กไปเป็นการรบกวนค่า g แทนจึงได้สมการต่อไปนี้

$$h\nu = (g_e + \Delta g) \mu_B B_0 \quad (4)$$

จากความสัมพันธ์นี้ ในโมเลกุลที่แตกต่างกันก็จะมีค่า Δg แตกต่างกันไปด้วยตามลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ค่า Δg จึงสามารถใช้เพื่อแยกแยะโมเลกุลต่างชนิดออกจากกันได้ หรือง่ายกว่าก็คือการใช้ค่า $g = g_e + \Delta g$ เป็นค่าเฉพาะของสารแต่ละชนิดนั่นเอง

ผลของภาวะอิ่มตัว (Effect of saturation)

ในการวัดสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ค่าของกำลังของคลื่นไมโครเวฟ (microwave power) เป็นค่าที่สำคัญ เนื่องจากความเข้มของสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์นั้นแปรผันตามแบบเชิงเส้นกับรากที่สองของค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟ แต่กฎการแปรผันนี้ใช้ได้ในช่วงที่จำกัดไปจนถึงค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟค่าหนึ่ง เมื่อกำลังไมโครเวฟผ่านค่าที่กำหนดนั้น

ไป ผลของสภาวะอึดตัวก็จะปรากฏขึ้น ผลของสภาวะอึดตัวก็คือเมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์จะแปรผันตามแบบไม่เป็นเชิงเส้น และเพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าสูงสุด จากนั้นก็จะค่อยๆ ลดลงในขณะที่กำลังของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีและมีความเข้มสูง จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงผลของสภาวะอึดตัวนี้ โดยการใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟในช่วงที่ไม่มีผลของสภาวะอึดตัวเกิดขึ้น (Yordanov *et al.*, 2005)

การใช้อิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ในการศึกษาอาหารฉายรังสี

การใช้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (ESR) เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบอาหารรวมไปถึงผลไม้ชนิดต่างๆ อย่างแพร่หลาย วิธีการนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยหลายกลุ่มทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีของผลไม้และพืชชนิดต่างๆ

ในปี ค.ศ. 1989 Raffi *et al.* (1989) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของผลไม้ฉายรังสีหลากหลายชนิด เช่น สตรอเบอรี่ โดยศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ส่วนต่างๆ ของผล เช่น เมล็ด และก้าน ซึ่งพบว่าวิธีการนี้สามารถใช้เพื่อตรวจสอบสตรอเบอรี่ฉายรังสีได้ และมากไปกว่านั้นยังสามารถชะลอระยะเวลาเน่าเสียได้อีกด้วย

ในปี ค.ศ. 1992 Maloney *et al.* (1992) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ขององุ่นขาวและองุ่นดำที่ทำการปลูกในดินและสภาพอากาศที่แตกต่างกัน ผลของการศึกษาก็คือสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ไม่ขึ้นกับดินและสภาพอากาศที่ปลูก และยังได้ผลแบบเดียวกันทั้งในองุ่นขาวและองุ่นดำที่ฉายรังสีในช่วง 2 ถึง 10 กิโลเกรย์

ในปี ค.ศ. 1992 Stachowicz *et al.* (1992) ศึกษาการใช้อิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีที่อุณหภูมิห้องในอาหาร 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) กระจุกไก่อ่ และครีบกี้ด กับกระจุกของปลาการ์ฟ (2) เมล็ดของผลไม้ชนิดต่างๆ เช่น ลูกแพร์ อินทผลัม มะนาว แอปเปิ้ล และลูกเกดดำ เป็นต้น (3) เห็ดแห้ง (4) เครื่องเทศและสมุนไพรชนิดต่างๆ ได้แก่ มัสตาร์ดขาว พริกขี้หนู และพริก เป็นต้น สำหรับกระจุกของไก่อ่และปลาการ์ฟนั้น สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ได้เสถียร (ยังคงตรวจพบได้ในสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ได้ในช่วง 3 เดือนหลังจากฉาย

รังสี) ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้กระดูกของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในครีปและเกล็ดของปลาการ์ฟก็เช่นกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ค่อนข้างเสถียร โดยครีปให้ความเข้มของสัญญาณมากกว่าเกล็ดถึง 5 เท่า สำหรับผลไม้ เมล็ดลูกแพร์ฉายรังสี 3 kGy นั้นมีความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์มากกว่าก่อนฉายรังสี 2 เท่า แม้ว่าเมล็ดอิมพลัมจะถูกฉายรังสีเพียง 0.5 kGy ผลที่ได้พบว่าเมล็ดอินทผลัมฉายรังสีให้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์หลายฟีก ซึ่งแตกต่างจากเมล็ดที่ไม่ฉายรังสีที่พบเพียงฟีกเดียว ในส่วนผลการทดลองจากเห็ดแห้งฉายรังสี 3 kGy นั้นก็ได้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์หลายฟีกเช่นกัน มัสตาร์ดขาว พริกขี้หนู และพริกนั้น ก่อนฉายรังสีไม่มีฟีกเกิดขึ้นเลย แต่เมื่อฉายรังสีก็จะมีฟีกเกิดขึ้น และแม้ว่าจะผ่านการฉายรังสีไปแล้วมากกว่า 3 เดือน ผลการทดลองที่ได้ก็ยังคงเสถียรอยู่ นอกจากนี้ยังพบว่าพริกไทยดำฉายรังสีที่ไม่ผ่านการอบแห้งมีปริมาณอนุมูลอิสระต่ำกว่าพริกไทยดำที่ผ่านอบแห้งถึง 10 เท่า ดังนั้นการทดลองกับอาหารจำพวกเดียวกับพริกไทยดำจึงควรทำตัวอย่างให้แห้งก่อนวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ จากผลการทดลองทั้งหมด สามารถอธิบายได้ว่าอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์สามารถใช้เพื่อตรวจสอบอาหารฉายรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพในอาหารบางประเภท อาหารบางชนิด เช่น กระดุกไก่ กระดุกปลาการ์ฟ และเมล็ดอินทผลัม สามารถทดลองเพื่อหาค่าปริมาณรังสีที่ฉายได้ ซึ่งใช้ตรวจว่ามีการฉายรังสีเกินเกณฑ์ที่กำหนดหรือไม่ การใช้อิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์เพื่อตรวจการฉายรังสีกับอาหารแต่ละชนิดนั้นก็จะมีวิธีการแตกต่างกันไป ไม่มีกฎที่ตายตัว เพราะอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการฉายรังสีมีคุณสมบัติและที่มาแตกต่างกันไปตามชนิดอาหารที่แตกต่างกัน

ในปีค.ศ. 1999 De Jesus *et al.* (1999) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของส่วนเนื้อของผลกีวี มะละกอ และมะเขือเทศ พบว่าสามารถประมาณค่าปริมาณการฉายรังสีจากส่วนเนื้อของผลไม้ได้โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 15 ถึง 82 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากฉายรังสีไปแล้ว 12 สัปดาห์ สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของกีวีที่เก็บในอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงไป 48 เปอร์เซ็นต์

ในปี ค.ศ. 2000 Raffi *et al.* (2000) พบว่าสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของพืชที่มีเมล็ดและเปลือกแข็ง เช่น อัลมอนด์ พิสตาชิโอ และวอลนัท สามารถใช้เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีได้หลังจากที่ฉายรังสีไปแล้วมากกว่า 1 ปี และสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของสมุนไพรและเครื่องเทศ สามารถใช้เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีได้ภายใน 70 ถึง 90 วันหลังจากฉายรังสีแล้วเท่านั้น

ในปี ค.ศ. 2005 Yordanov *et al.* (2005) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพืชแห้งฉายรังสี โดยนำตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาทีหลังจากฉายรังสีพบว่าค่า microwave power มีผลต่อความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ความเข้มของสัญญาณเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ microwave power ที่มีค่าสูง (100 mW) และความเข้มของสัญญาณลดลงเมื่อใช้ microwave power ที่มีค่าต่ำ (1 mW)

ในปี ค.ศ. 2006 Yordanov *et al.* (2006) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของผลไม้แห้ง ชนิดที่มีน้ำตาลอยู่มาก เช่น ลูกเกด และลูกพีช พบว่าสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สามารถใช้ประมาณระยะเวลาที่ผลไม้ถูกฉายรังสีมาแล้วได้ โดยพิจารณาจากสัดส่วนของความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป

ในปี ค.ศ. 2009 Yordanov *et al.* (2009) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของมะเขือเทศก่อนและหลังการฉายรังสี โดยใช้วิธีการสกัดน้ำออกที่แตกต่างกันออกไป พบว่าไม่ว่าใช้วิธีการสกัดน้ำออกวิธีใดก็ตาม สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ก็ยังสามารถใช้ตรวจสอบการฉายรังสีของมะเขือเทศได้

ในปี ค.ศ. 2011 Kikuchi *et al.* (2011) ศึกษาสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของมะละกอล้างรังสี โดยใช้ 2 วิธี คือ วัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์จากตัวอย่างมะละกอสอดที่อุณหภูมิเท่ากับไนโตรเจนเหลว (77 K) และวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์จากตัวอย่างมะละกอที่ผ่านกระบวนการทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (freeze-dry) พบว่าการเกิดฟิลข้างสามารถยืนยันว่ามะละกอผ่านการฉายรังสีได้ในทั้ง 2 วิธี และการเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธี freeze-dry เหมาะสมที่จะใช้มากกว่าการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ไนโตรเจนเหลว

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสี Co-60 รุ่น Gamma Cell 220



ภาพที่ 13 เครื่องฉายรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดรังสี Co-60 รุ่น Gamma Cell 220

2. เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ESR รุ่น Bruker A300 Research



ภาพที่ 14 เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ESR รุ่น Bruker A300 Research

3. ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven)



ภาพที่ 15 ตู้อบแห้ง (Hot Air Oven)

4. กลัวยหอมทองดิบ

5. โกร้งบดยา

6. เครื่องชั่งน้ำหนัก

วิธีการ

การตั้งค่าเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ใช้ในการทดลอง

ใช้ค่าต่างๆที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ มีดังต่อไปนี้
Centre field 350.00 mT, Sweep width 30 mT, Microwave frequency 9.85 GHz, Modulation frequency 100 kHz, Modulation amplitude 0.2 mT, Time constant 163.84 ms and Sweep time 20.48 s, Number of scans 3.

Centre field คือ ค่ากึ่งกลางของความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ใช้ในการทดลอง

Sweep width คือ ช่วงค่าของความเข้มสนามแม่เหล็กของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ใช้ในการทดลอง

Microwave frequency คือ ค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนเดี่ยวให้เปลี่ยนระดับพลังงาน

Modulation frequency คือ ค่าความถี่ในการสั่นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้เพื่อแปลงสัญญาณ ESR ในรูปของสเปกตรัมดูดกลืนให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืน

Modulation amplitude คือ ช่วงค่าการสั่นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้เพื่อแปลงสัญญาณ ESR ในรูปของสเปกตรัมดูดกลืนให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของสเปกตรัมดูดกลืน

Time constant คือ ช่วงเวลาที่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ใช้เพื่อเก็บค่าสัญญาณ ESR ในแต่ละค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

Sweep time คือ ช่วงเวลาที่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ใช้ในการวัดสัญญาณ ESR ในช่วง Sweep width

Number of scans คือ จำนวนรอบที่เครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ทำการวัดสัญญาณ ESR ในช่วง Sweep width

ตอนที่ 1 ทดลองเพื่อหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมกับการทดลอง

1. นำกล้วยหอมทองดิบไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.3 kGy ด้วยเครื่องฉายรังสีแกมมา จากแหล่งกำเนิดรังสี Co-60 รุ่น Gamma Cell 220 ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
2. นำกล้วยหอมทองที่ฉายรังสีแล้ว ปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปอบแห้งด้วยตู้อบแห้ง (Hot Air Oven) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งคือ 4 ชั่วโมง
3. หลังจากอบแห้ง นำกล้วยหอมทองมาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดยา ก่อนจะนำไปชั่ง โดยปริมาณที่ใช้นำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ คือ 100 มิลลิกรัม ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ลูกบรจุกล้วยหอมทองปริมาณ 100 มิลลิกรัม ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

4. นำกล้วยหอมทองไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ESR รุ่น Bruker A300 Research ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ บันทึกข้อมูลของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟต่างๆ โดยเปลี่ยนค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟเป็น 0.50, 1.00, 1.59, 2.00, 2.52, 3.18, 4.00 และ 5.03 มิลลิวัตต์

5. นำข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ค่าของกำลังของคลื่นไมโครเวฟต่างๆ มาวิเคราะห์เพื่อหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมจะใช้ในการทดลอง

ตอนที่ 2 ทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะใช้อบแห้งกล้วยหอมทองในการทดลอง

1. นำกล้วยหอมทองดิบมาแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1,2,3 และ 4 นำส่วนที่ 2,3 และ 4 ไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.3 kGy

2. นำกล้วยหอมทองทั้ง 4 ส่วน มาอบแห้งโดยเวลาในการอบแห้งคือ 4 ชั่วโมง ดังนี้

ส่วนที่ 1 (ไม่ได้ฉายรังสี) อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ส่วนที่ 2 อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ส่วนที่ 3 อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ส่วนที่ 4 อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส

3. นำกล้วยหอมทองแต่ละส่วนมาบดให้ละเอียดชั่ง 100 มิลลิกรัม เพื่อนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 17 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 ไม่ผ่านการฉายรังสีแกมมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 18 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 19 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 20 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 4 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

4. นำกล้วยหอมทองทั้ง 4 ส่วนไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

5. นำข้อมูลสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปิเรโซเนนซ์ที่ได้ มาเปรียบเทียบกับ เพื่อดูผลของ อุณหภูมิของการอบแห้งกล้วยหอมทองที่มีต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปิเรโซเนนซ์ และเลือกใช้อุณหภูมิการอบแห้งที่เหมาะสมในการทดลองต่อไป

ตอนที่ 3 ทดลองเพื่อตรวจสอบว่าวิธีการเตรียมกล้วยหอมทองก่อนวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปิเรโซเนนซ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อสัญญาณหรือไม่

1. นำกล้วยหอมทองดิบมาแบ่งเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1,2,3 และ 4 แล้วส่วนที่ 1 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งคือ 4 ชั่วโมง
2. นำส่วนที่ 1,2,3 และ 4 ไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.3 kGy
3. นำส่วนที่ 2 มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำส่วนที่ 1 และ 2 ไปบดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม ก่อนจะนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปิเรโซเนนซ์



ภาพที่ 21 กล้วยบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปิเรโซเนนซ์

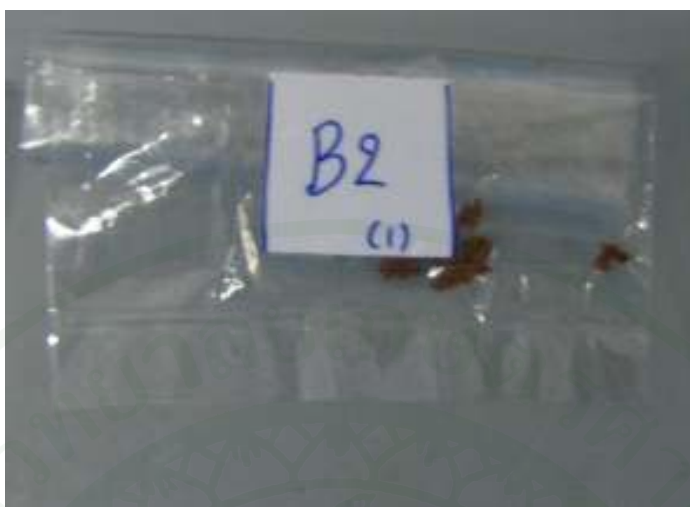


ภาพที่ 22 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัตถุดิบอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์

4. (3 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 3 มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม แล้วนำส่วนที่ 1, 2 และ 3 มาวัตถุดิบอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์



ภาพที่ 23 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัตถุดิบอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ (อบแห้งและฉายรังสีมาแล้ว 3 วัน)



ภาพที่ 24 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว ออบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัตถุดิบอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีและอบแห้งมาแล้ว 3 วัน)



ภาพที่ 25 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัตถุดิบอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีมาแล้ว 3 วัน และอบแห้งในวันที่จะวัดสัญญาณอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์)

5. (10 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 4 มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม แล้วนำส่วนที่ 1,2 และ 4 มาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 26 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (อบแห้งและฉายรังสีมาแล้ว 10 วัน)



ภาพที่ 27 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัตถุดิบอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีและอบแห้งมาแล้ว 10 วัน)



ภาพที่ 28 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 4 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัตถุดิบอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ฉายรังสีมาแล้ว 10 วัน และอบแห้งในวันที่จะวัตถุดิบอเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์)

6. นำสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ที่ได้ทั้งหมด มาวิเคราะห์ผลของวิธีการเตรียมตัวอย่างทั้ง 3 วิธี ต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ (วิธี A, วิธี B และ วิธี C) กล่าวคือ

วิธี A นำกล้วยหอมทองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก่อน แล้วจึงฉายรังสี 0.3 kGy จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี

วิธี B นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสี 0.3 kGy ก่อน แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี

วิธี C นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสี 0.3 kGy ก่อน แล้วเมื่อต้องการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี จึงนำกล้วยหอมทองมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นถึงนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์

ตอนที่ 4 ทดลองเพื่อตรวจสอบว่าการสุกของกล้วยหอมทองมีผลต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์หรือไม่

1. นำกล้วยหอมทองดิบมาแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1, 2 และ 3
2. นำส่วนที่ 1 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เวลาในการอบแห้งคือ 4 ชั่วโมงแล้วนำไปบดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม ก่อนจะนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ปืนเรโซแนนซ์



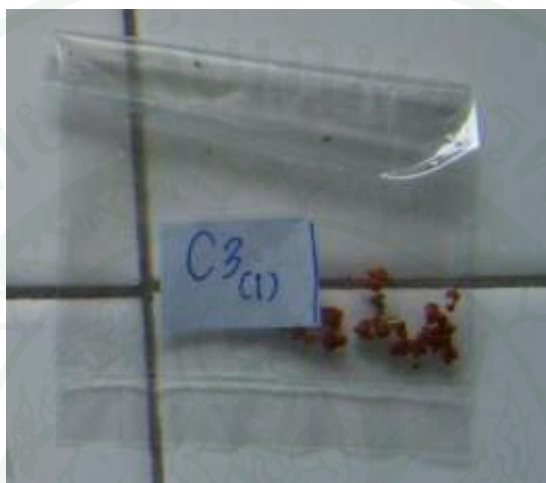
ภาพที่ 29 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัด
สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์

3. (3 วันหลังจากวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ส่วนที่ 1) นำส่วนที่ 2 มาอบแห้ง
ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม แล้วนำไปวัด
สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์



ภาพที่ 30 ถุงบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัด
สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ (3 วันหลังจากวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเร-
โซแนนซ์ส่วนที่ 1)

4. (10 วันหลังจากวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ส่วนที่ 1) นำส่วนที่ 2 มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง 100 มิลลิกรัม แล้วนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 31 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 อบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (10 วันหลังจากวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ส่วนที่ 1)

5. นำสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ได้ทั้งหมด มาวิเคราะห์ผลของการสุกของกล้วยหอมทอง ต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

ตอนที่ 5 ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ ESR กับระยะเวลาหลังจากการฉายรังสีของกล้วยหอมทอง

1. นำกล้วยหอมทองดิบไปฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0.3 kGy แล้วแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ ส่วนที่ 1, 2, 3, 4 และ 5

2. นำส่วนที่ 1 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด

ซึ่ง แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์
 ทรอนสปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 32 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 1 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ
 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทรอนสปินเรโซแนนซ์

3. (1 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 2 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา
 4 ชั่วโมง บดละเอียด ซึ่ง แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไป
 วัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทรอนสปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 33 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 2 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ
 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ทรอนสปินเรโซแนนซ์ (หลังฉายรังสี 1 วัน)

4. (2 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 3 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 34 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 3 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (หลังฉายรังสี 2 วัน)

5. (3 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 4 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 35 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 4 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (หลังฉายรังสี 3 วัน)

6. (8 วันหลังจากฉายรังสี) นำส่วนที่ 5 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง บดละเอียด ชั่ง แบ่งเป็นกลุ่มย่อย 3 กลุ่ม กลุ่มละ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

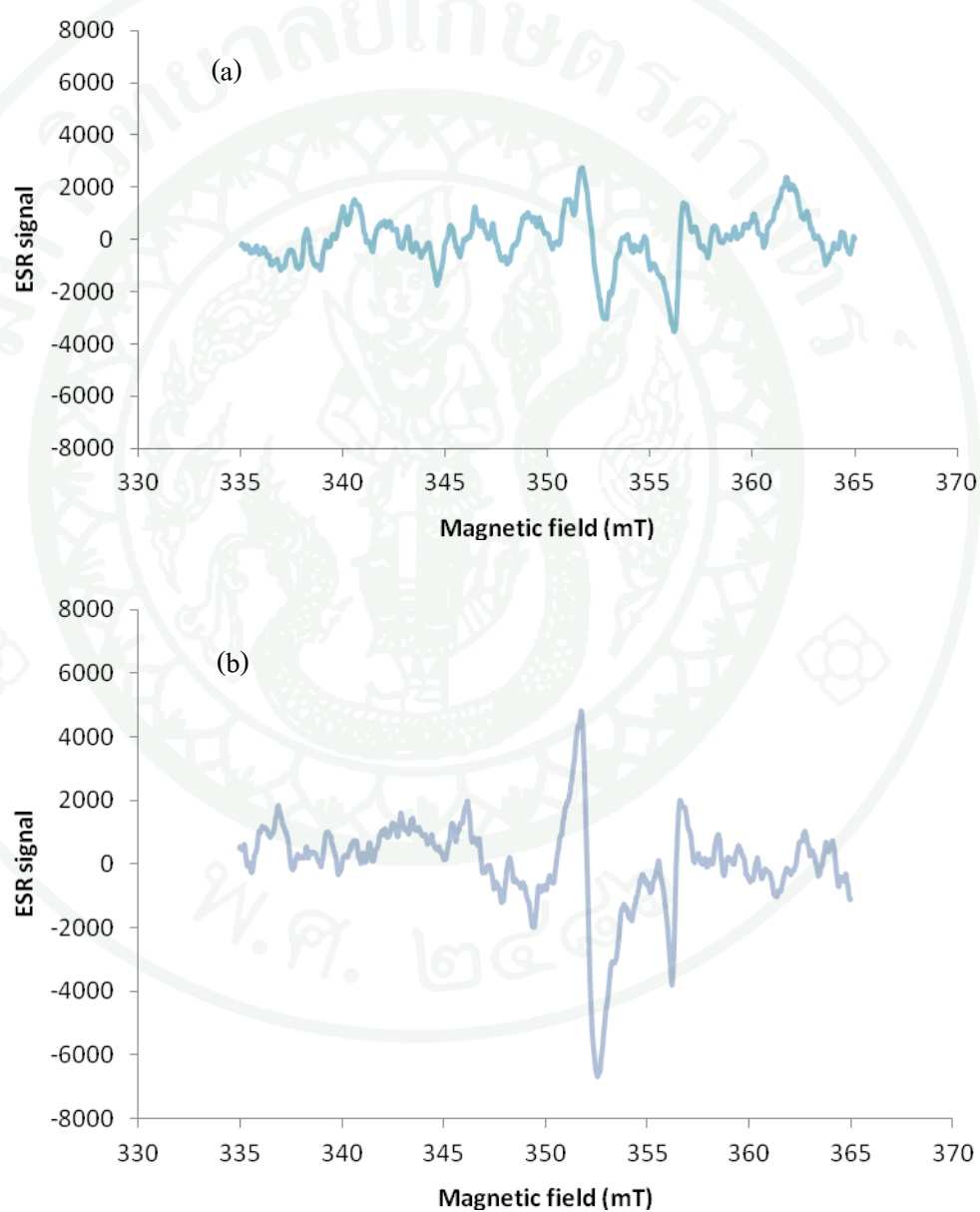


ภาพที่ 36 ถูบบรรจุกล้วยหอมทองส่วนที่ 5 ผ่านการฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เตรียมวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (หลังฉายรังสี 8 วัน)

7. นำสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ได้ทั้งหมด มาวิเคราะห์ผล

ผลและวิจารณ์

จากการทดลองได้สัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองก่อนฉายรังสี กับหลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy ดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 แสดงสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทอง (a) ก่อนฉายรังสี (b) หลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ในภาพที่ 37 แสดงให้เห็นว่ากลัวยหอมทองหลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy นั้น มีค่าความเข้มของสัญญาณ สูงกว่ากลัวยหอมทองก่อนฉายรังสี ส่วนแนวโน้มของพีกมีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือมี 2 พีก คือพีกตรงกลาง และพีกทางด้านขวา เมื่อพิจารณาค่าหนึ่งของพีกจากภาพที่ 37 จะได้อ่านค่าตามตารางที่ 5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5 แสดงค่าสนามแม่เหล็กในตำแหน่งที่มีค่าสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์สูงสุดและต่ำสุดของพีกที่พบทั้งก่อนและหลังฉายรังสี

การฉายรังสี	ตำแหน่งพีก	ค่าสนามแม่เหล็ก (mT)		
		ที่สัญญาณสูงสุด	ที่สัญญาณต่ำสุด	B_o
ก่อนฉายรังสี	กลาง	351.686	352.771	352.228
	ขวา	356.612	356.143	356.378
หลังฉายรังสี	กลาง	351.774	352.566	352.170
	ขวา	356.612	356.231	356.422

ค่า g ของแต่ละพีกสามารถหาได้จากสมการ (2)

$$g = hv/(\mu_B B_o)$$

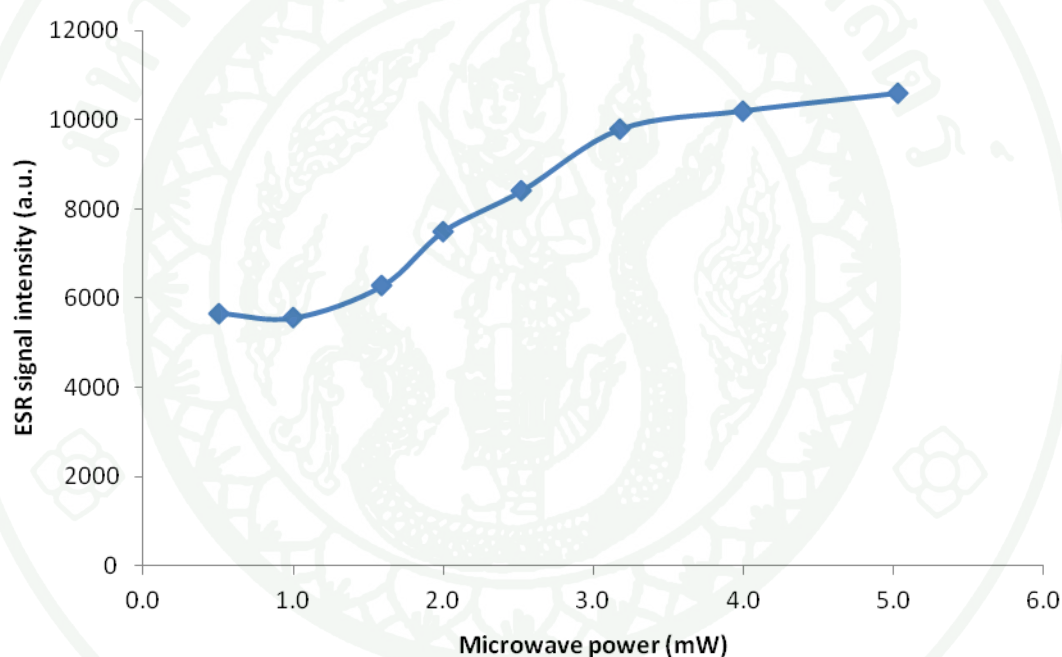
โดย $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $\mu_B = 9.274 \times 10^{-24} \text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$ และ $\nu = 9.85 \text{ GHz}$

ค่า B_o ในสมการคือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งพีกของเส้นสเปกตรัมดูดกลืนซึ่งก็คือค่ากึ่งกลางระหว่างค่าต่ำสุดและสูงสุดของพีกในเส้นอนุพันธ์อันดับหนึ่งของเส้นสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ ดังนั้นเมื่อใช้ค่าคงที่ดังกล่าวและค่า B_o คำนวณค่า g และใช้ค่า modulation amplitude (0.2 mT) ในการคำนวณความคลาดเคลื่อน จะได้อ่านค่าตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงตำแหน่งพีคและค่า g จากทั้งก่อนและหลังฉายรังสี

ตำแหน่งพีค	ค่า g
กลาง	1.998 ± 0.001
ขวา	1.974 ± 0.001

ตอนที่ 1 ทดลองเพื่อหาค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสมกับการทดลอง

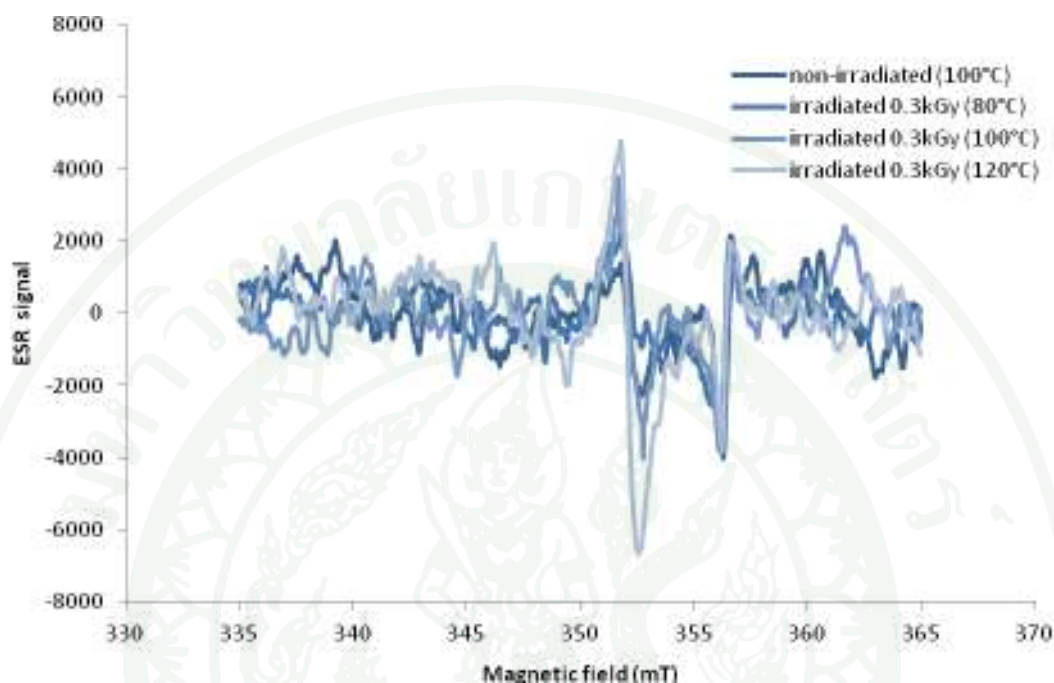


ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นไมโครเวฟกับความเข้มของสัญญาณ

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

จากภาพที่ 38 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นไมโครเวฟกับความเข้มของสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ จะเห็นว่าในงานวิจัยชิ้นนี้ควรเลือกใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟในช่วงประมาณ 1 – 3 มิลลิวัตต์ เพื่อหลีกเลี่ยงผลของสถานะอิ่มตัว (effect of saturation)

ตอนที่ 2 ทดลองเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะใช้อบแห้งกล้วยหอมทองในการทดลอง



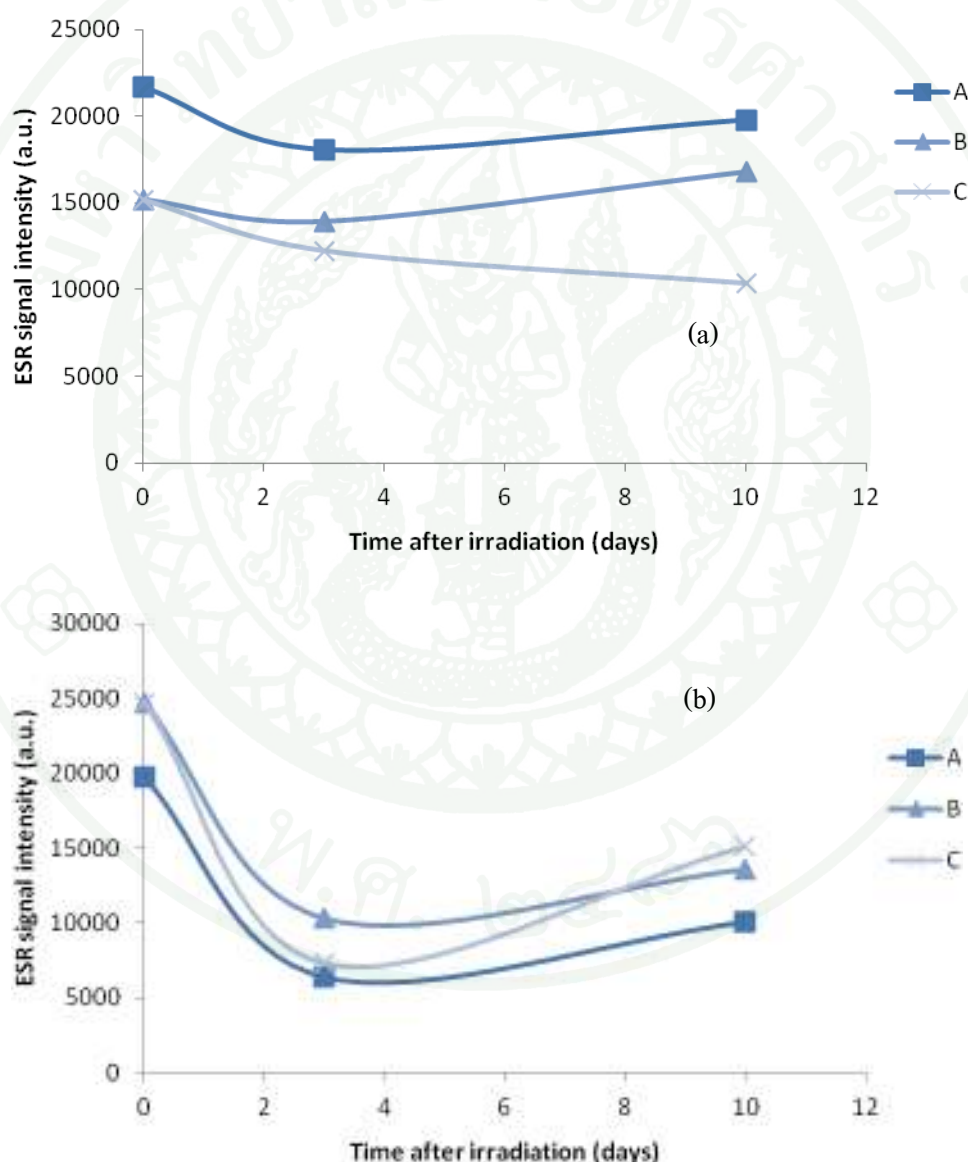
ภาพที่ 39 สัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่อุณหภูมิอบแห้งต่างกัน

จากผลการทดลองในภาพที่ 39 เพื่อหาอุณหภูมิในการอบแห้งกล้วยหอมทองที่เหมาะสมต่อการทดลองนั้น พบว่าเส้นสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ของกล้วยหอมทองมีพิกที่โดดเด่นเกิดขึ้น 2 บริเวณ คือ บริเวณตรงกลาง และบริเวณทางด้านขวา อุณหภูมิของการอบแห้งมีผลต่อสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ สังเกตจากพิกของเส้นที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส พิกจะสูงกว่าเส้นอื่น ซึ่งมีสาเหตุมาจากเมื่อนำกล้วยหอมทองไปอบแห้งที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้โมเลกุลในกล้วยหอมทองได้รับพลังงานจากความร้อนของการอบแห้งที่เพียงพอที่จะทำให้ลายพันธะจนเกิดเป็นอนุมูลอิสระมากขึ้น

ในการทดลองต่อไป เลือกใช้อุณหภูมิอบแห้งที่ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพบว่ากล้วยหอมทองที่อบนั้นยังไม่แห้งดีพอ จะทำให้เกิดปัญหาไปติดกับหลอดทดลองได้เมื่อนำไปวัดสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิที่สูงเกินไป ทำให้มีโอกาที่จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้มากกว่าการ

อบในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (สามารถเลือกใช้อุณหภูมิอื่นได้ตามความเหมาะสม แต่จะต้องใช้ค่าอุณหภูมิเดียวกันตลอดทุกการทดลองต่อไป)

ตอนที่ 3 ทดลองเพื่อตรวจสอบว่าวิธีการเตรียมกล้วยหอมทองก่อนวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่แตกต่างกันมีผลต่อสัญญาณหรือไม่



ภาพที่ 40 ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทอง (a) พืชกลาง (b) พืชขาว บันทึกค่าในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy

จากภาพที่ 40 เส้น A, B และ C คือ แนวโน้มของความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ อันเนื่องมาจากการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีที่ A, B และ C ตามลำดับ กล่าวคือ

วิธี A นำกล้วยหอมทองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงก่อน แล้วจึงฉายรังสี 0.3 kGy จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี

วิธี B นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสี 0.3 kGy ก่อน แล้วอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี

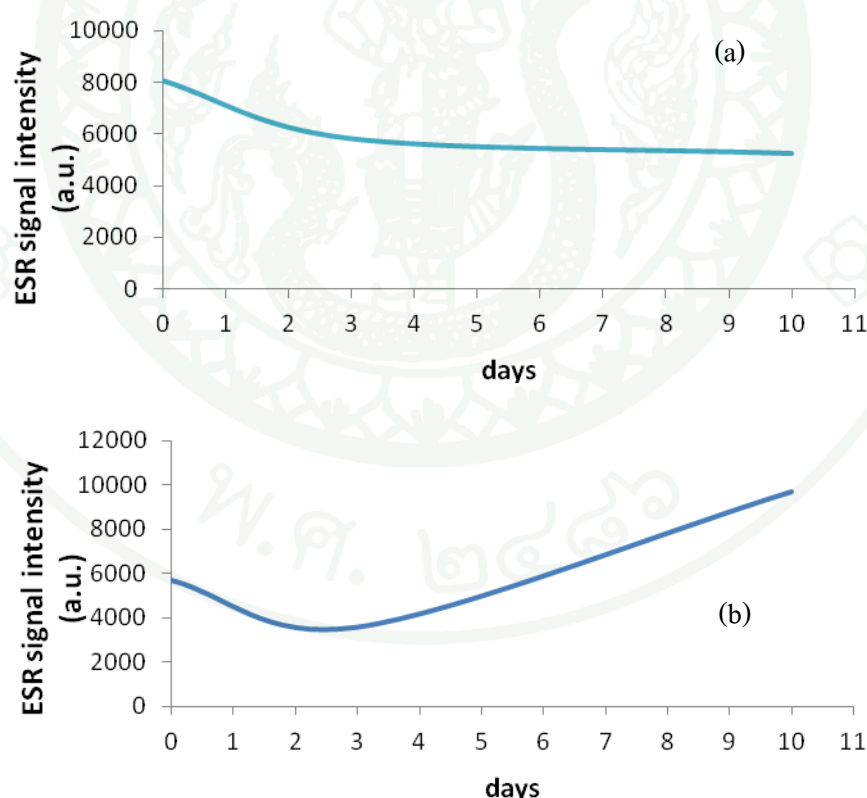
วิธี C นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสี 0.3 kGy ก่อน แล้วเมื่อต้องการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี จึงนำกล้วยหอมทองมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นถึงนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์

จากผลการทดลองจะพบว่าลักษณะแนวโน้มของความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ของวิธี A และ B คล้ายกัน แสดงว่าการอบแห้งกล้วยหอมทองก่อนแล้วนำมาฉายรังสี แกรมมากกับการฉายรังสีแกรมนำมาอบแห้งจะได้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงแค่ค่าความเข้มของสัญญาณเท่านั้น

ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ของพีคกลางในวิธี A และ B มีแนวโน้มคงที่ ส่วนวิธี C จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ซึ่งน่าจะเกิดจากผลของการสุกของกล้วยหอมทอง วิธี A และ B นั้นไม่มีการสุกมาเกี่ยวข้องทำให้ตัวอย่างกล้วยหอมทองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ในขณะที่วิธี C กล้วยหอมทองถูกปล่อยให้เกิดการสุกได้ในช่วงการทดลอง ส่วนประกอบภายในของกล้วยหอมทองจึงเกิดจากเปลี่ยนแปลงได้ตามกระบวนการของการสุก

ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพิกัดด้านขวาในวิธี A และ B มีลักษณะของแนวโน้มเหมือนกัน คือสัญญาณมีค่าลดลงมากในช่วง 3 วันแรกหลังฉายรังสี และหลังจากวันที่ 3 สัญญาณมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนวิธี C ในช่วง 3 วันแรกหลังฉายรังสีมีลักษณะคล้ายกับวิธี A และ B แต่หลังจากวันที่ 3 เป็นต้นไปความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ มีอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่าวิธี A และ B ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสัญญาณจากวิธี C นี้ น่าจะเป็นผลจากการสุกของกล้วยหอมทองที่ทำให้ค่าความเข้มของสัญญาณของพิกัดด้านขวามีค่าเพิ่มขึ้นมาก

ตอนที่ 4 ทดลองเพื่อตรวจสอบว่าการสุกของกล้วยหอมทองมีผลต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์หรือไม่



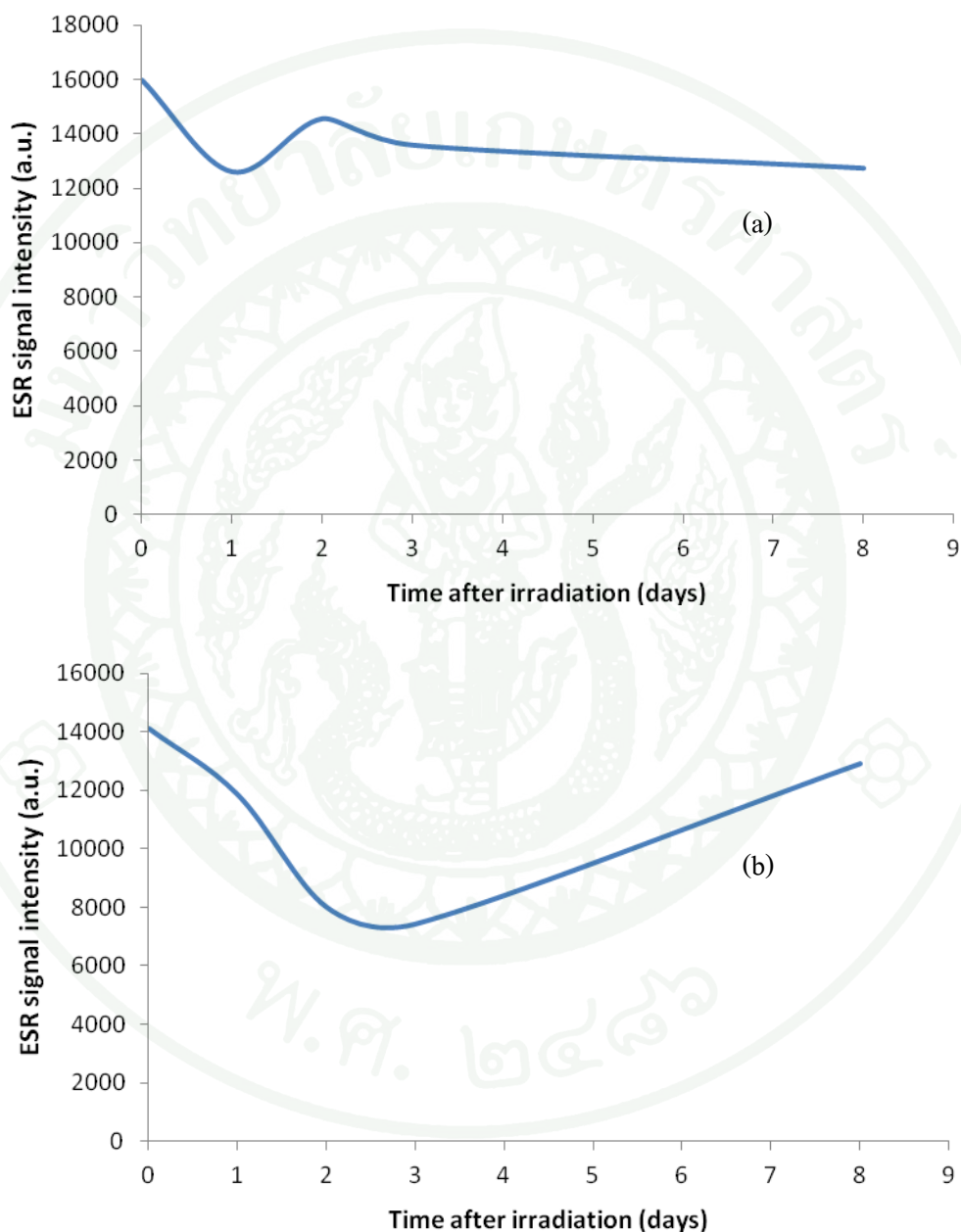
ภาพที่ 41 ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสี

(a) พิกัดกลาง (b) พิกัดขวา บันทึกในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังซื้อกล้วยหอมทองดิบจากตลาด

จากการทดลองวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสีที่แสดงในภาพที่ 41 พบว่าค่าความเข้มของสัญญาณในพีคกลางมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนพีคด้านขวามีค่าสัญญาณลดลงในช่วง 3 วันแรกหลังจากนั้นสัญญาณจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าการสุกของกล้วยหอมทองนั้นส่งผลทำให้ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์บนเรโซแนนซ์ของพีคด้านขวามีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเชื่อมโยงกับการสุกของกล้วยหอมทองแล้ว พีคกลางจะสัมพันธ์กับปริมาณแป้งในผลกล้วยหอมทอง และพีคด้านขวาสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลในผลกล้วยหอมทอง เมื่อเกิดการสุกขึ้น กล้วยหอมทองจะมีกลไกในการเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาลเกิดขึ้น ปริมาณแป้งในผลจึงน้อยลง ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลในผลจะเพิ่มขึ้น

ตอนที่ 5 ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ ESR กับระยะเวลาหลังจากการฉายรังสีของกล้วยหอมทอง



ภาพที่ 42 ความเข้มของสัญญาณอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ผ่านการฉายรังสี
(a) ฟีดกลาง (b) ฟีดขวา บันทึกค่าในวันที่ 0, 1, 2, 3 และ 8 หลังฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy

จากภาพที่ 42 เมื่อกล้วยหอมทองถูกฉายรังสีแกมมา 0.3 kGy ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพืคกลางมีแนวโน้มลดลง และมีค่าสูงกว่ากล้วยหอมทองที่ไม่ถูกฉายรังสี (การทดลองในตอนี่ 4) ประมาณ 2 เท่า แต่ในช่วงวันที่ 2 และ 3 หลังฉายรังสี ค่าความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ มีการกวัดแกว่งเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากสภาพความพร้อมของเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ที่ใช้ทดลอง

สำหรับความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพืคขวามีแนวโน้มลดลงในช่วง 2 วันแรกหลังฉายรังสี และเพิ่มขึ้นในช่วงหลังจากวันที่ 3 เส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับกราฟผลของการสุกของกล้วยหอมทอง (การทดลองในตอนี่ 4) อย่างไรก็ตามกล้วยหอมทองที่ผ่านการฉายรังสีจะมีค่าความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพืคขวาสูงกว่าของผลจากกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสีเช่นเดียวกับพืคกลาง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ปัจจุบันการฉายรังสีอาหารเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก ประโยชน์ของการฉายรังสีมีมากมาย อาทิเช่น ชะลอการสุก เพิ่มอายุการเก็บรักษา หรือฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น ถึงแม้ว่าการฉายรังสีอาหารจะมีประโยชน์มากมายก็ยังมีผู้บริโภคบางกลุ่มที่ยังไม่ยอมรับการฉายรังสีในอาหาร เนื่องจากกังวลถึงผลเสียและผลข้างเคียงของการใช้รังสีและสารกัมมันตรังสี ผู้บริโภคกลุ่มนี้จึงเลือกบริโภคเพียงอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสี ดังนั้นเทคนิคในการตรวจสอบการฉายรังสีอาหารจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการพัฒนาและปรับปรุง เพื่อให้สามารถใช้ตรวจสอบการฉายรังสีของอาหารได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (Electron spin resonance หรือ ESR) ถือได้ว่าเป็นเทคนิคซึ่งถูกพัฒนาและใช้เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีในผักและผลไม้กันอย่างแพร่หลาย เทคนิคนี้ทำงานได้ด้วยการวัดการดูดกลืนแสงในช่วงไมโครเวฟของอิเล็กตรอนเดี่ยวซึ่งอยู่ในสนามแม่เหล็ก เมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็กจะเกิดปรากฏการณ์ซีแมน (Zeeman Effect) ขึ้นทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนแยกออกตามสภาวะทางสปินของอิเล็กตรอน และเมื่ออิเล็กตรอนเดี่ยวได้รับพลังงานที่พอเหมาะในช่วงไมโครเวฟ อิเล็กตรอนก็จะสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นได้ การดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของอิเล็กตรอนนั้นสามารถตรวจวัดได้ เทคนิคนี้จึงสามารถใช้ตรวจสอบการมีอยู่ของอนุมูลอิสระ ซึ่งอนุมูลอิสระก็คืออะตอมหรือโมเลกุลของสารที่มีอิเล็กตรอนเดี่ยวอยู่ในวงนอกสุด และอนุมูลอิสระเหล่านี้เกิดขึ้นได้จากการฉายรังสี ดังนั้นเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์จึงเป็นหนึ่งในวิธีซึ่งสามารถใช้เพื่อตรวจสอบการฉายรังสีในอาหารได้

กล้วยหอมทองขึ้นชื่อว่าเป็นหนึ่งในผลไม้ที่มียอดการส่งออกสูงสุดของประเทศไทย จากการที่กล้วยหอมทองนั้นมีกลิ่นหอม รสชาติดี และน่ารับประทาน เป็นที่ติดอกติดใจของชาวต่างชาติมากมาย ไม่ว่าจะเป็นชาวเอเชียหรือชาวยุโรป และเนื่องจากเป็นผลไม้ที่สำคัญต่อเศรษฐกิจของไทย การขนส่งกล้วยหอมทองจึงจำเป็นต้องใช้การฉายรังสีช่วยยืดระยะเวลาการสุก เพื่อให้ถึงมือผู้บริโภคในต่างประเทศก่อนที่จะสุกเกินไปหรือเน่าเสีย กล้วยหอมทองจึงเป็นหนึ่งในผลไม้ซึ่งเหมาะสมที่จะศึกษาการตรวจสอบการฉายรังสีด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์เป็นอย่างยิ่ง

สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของกล้วยหอมทองก่อนและหลังฉายรังสีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีจำนวนพีคที่เกิดขึ้นเท่ากันและอยู่ในตำแหน่งของพีคที่ใกล้เคียงกันมาก g-factor ที่ได้จากกล้วยหอมทองก่อนและหลังฉายรังสีมีค่าเป็น 1.998 ± 0.001 สำหรับพีคกลาง และ 1.974 ± 0.001 สำหรับพีคขวา แต่ส่วนที่แตกต่างกันระหว่างกล้วยหอมทองก่อนและหลังฉายรังสีนั่นก็คือ กล้วยหอมทองหลังฉายรังสีมีความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์มากกว่ากล้วยหอมทองก่อนฉายรังสี

โดยปกติแล้วค่ารากที่สองของกำลังคลื่นไมโครเวฟกับความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์จะมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น เมื่อค่ากำลังของคลื่นไมโครเวฟเพิ่มขึ้น ความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟไปจนถึงค่าหนึ่ง ผลของสภาวะอิ่มตัวของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์จะเกิดขึ้น ทำให้รากที่สองของกำลังคลื่นไมโครเวฟและความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์ไม่สัมพันธ์กับความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์แบบเชิงเส้น เมื่อเพิ่มกำลังไมโครเวฟ ความเข้มสัญญาณจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่น้อยลง จนกระทั่งมีค่าคงตัวและลดลงในที่สุด เพื่อให้ได้สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์ที่มีความเข้มสูงอย่างพอเหมาะซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ผลต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องเลือกใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่เหมาะสม คือ มีค่ากำลังมากแต่ไม่อยู่ในช่วงที่มีผลของสภาวะอิ่มตัว ในการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้เลือกใช้กำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ 2 mW ซึ่งเป็นค่าที่ทดสอบแล้วว่าไม่ได้รับผลของสภาวะอิ่มตัว

กล้วยหอมทองเป็นผลไม้ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่ในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำออกจากตัวอย่างกล้วยหอมทอง เพื่อให้ง่ายต่อการใส่ตัวอย่างกล้วยหอมทองลงในหลอดทดลองและนำไปวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์ต่อไป การอบแห้งถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้กำจัดน้ำออกจากตัวอย่างกล้วยหอมทองได้สะดวก รวดเร็ว และประหยัด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การเตรียมตัวอย่างกล้วยหอมทองก่อนวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของสปีนเรโซแนนซ์โดยใช้การอบแห้งด้วยเครื่อง air-dry oven จากการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมตัวอย่างกล้วยหอมทอง เนื่องจากการอบแห้งควรใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมไม่สูงและไม่ต่ำเกินไป การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป อาจทำให้อนุมูลอิสระเกิดขึ้นจากการอบแห้งในปริมาณมาก ส่งผลกระทบให้การวิเคราะห์ผลของการฉายรังสีจากปริมาณอนุมูลอิสระซึ่งเกิดจากการฉายรังสีกล้วยหอมทองมีความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาดได้ ส่วนการอบแห้งด้วยอุณหภูมิที่ต่ำเกินไป อาจทำให้ตัวอย่างกล้วยหอมทองที่อบไม่แห้ง ตัวอย่างกล้วยหอมทองดังกล่าวจะติดหลอด

ทดลองที่ใช้ในการวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ส่งผลให้หลอดทดลองที่ใช้นำไปทดลองต่อได้ยาก

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการเตรียมตัวอย่างระหว่าง วิธี A นำกล้วยหอมทองไปอบแห้งแล้วจึงฉายรังสี จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี วิธี B นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสีแล้วอบแห้ง จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี และวิธี C นำกล้วยหอมทองไปฉายรังสี เมื่อต้องการจะวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี จึงนำกล้วยหอมทองมาอบแห้ง จากนั้นนำมาวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ในวันที่ 0, 3 และ 10 หลังฉายรังสี วิธี A และ B นั้นมีลักษณะแนวโน้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์คล้ายกัน ต่างกันเพียงแค่ความเข้มของสัญญาณ แสดงว่าวิธี A และ B สามารถเลือกใช้แทนกันได้ นอกจากนั้นพบว่ากระบวนการสุกของกล้วยหอมทองซึ่งเกิดขึ้นได้ในวิธี C เท่านั้น ส่งผลให้ความเข้มของสัญญาณฟิสิกกลางมีแนวโน้มลดลง และทำให้ความเข้มของสัญญาณฟิสิกขาเพิ่มขึ้นในอัตราที่มากกว่าวิธี A และ B ในช่วงหลังฉายรังสีวันที่ 3 เป็นต้นไป เนื่องจากกระบวนการสุกเกิดขึ้นได้ในช่วงเวลาการขนส่งกล้วยหอมทองทั้งในประเทศและไปยังต่างประเทศ การทดลองวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์โดยคำนึงถึงผลของกระบวนการสุกจึงมีความสำคัญ ดังนั้นการเตรียมตัวอย่างตามวิธี C จึงเป็นการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุด

กระบวนการสุกของกล้วยหอมทองนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารภายในผลกล้วยหอมทองขึ้น ดังนั้นการสุกจึงส่งผลโดยตรงต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ ผลของการสุกต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สามารถศึกษาได้จากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของกล้วยหอมทองที่ไม่ฉายรังสีในช่วงระยะเวลา 10 วันหลังซื้อกล้วยหอมทองดิบจากตลาด ผลการทดลองที่ได้พบว่าความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของฟิสิกกลางมีค่าลดลง ในขณะที่ความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของฟิสิกขามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ผลดังกล่าวน่าจะมีความสัมพันธ์กับกลไกการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล แสดงว่าสัญญาณของฟิสิกกลางสัมพันธ์กับปริมาณแป้งในกล้วยหอมทอง และสัญญาณของฟิสิกขามีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำตาลในกล้วยหอมทอง

ด้านการตรวจสอบการฉายรังสีของกล้วยหอมทอง สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ของฟิสิกกลางสามารถใช้เพื่อตรวจสอบประวัติการผ่านการฉายรังสีของกล้วยหอมทองได้ เนื่องจากกล้วยหอมทองเป็นผลไม้ที่มีอายุค่อนข้างสั้น และการสลายตัวของอนุมูลอิสระที่เกิดจากการฉาย

รังสีแกมมานั้นเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งใช้เวลานานกว่าอายุของกล้วยหอมทอง โดยกล้วยหอมทองที่ผ่านการฉายรังสีแกมมานั้นจะมีค่าความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ มากกว่ากล้วยหอมที่ไม่ผ่านการฉายรังสีถึง 2 เท่าตัวขึ้นไป ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของพริกกลางเพื่อแยกแยะได้อย่างชัดเจนว่ากล้วยหอมทองนั้นผ่านการฉายรังสีหรือไม่ ส่วนสัญญาณของพริกด้านขวานั้นไม่เหมาะที่จะใช้ตรวจสอบการฉายรังสี เพราะการเพิ่มขึ้นของสัญญาณในพริกด้านขวานั้นได้รับผลมาจากทั้งการฉายรังสีและการสุกของกล้วยหอมทอง ดังนั้นถ้าใช้สัญญาณของพริกด้านขวาในการตรวจสอบการฉายรังสี จะทำให้ไม่สามารถแยกแยะผลที่เกิดจากการฉายรังสีแกมมา ออกจากผลของการสุกได้อย่างชัดเจน

ข้อเสนอแนะ

การใช้เครื่องอบแห้งมาทำให้กล้วยหอมทองแห้งเพื่อเป็นการเตรียมตัวอย่างก่อนวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์นั้น อาจมีผลต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวอย่างส่งผลทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ดีการใช้เครื่องอบแห้งในการเตรียมตัวอย่างนั้น เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว ประหยัด จึงเป็นประโยชน์ในการใช้ตรวจประวัติการฉายรังสีของกล้วยหอมทองคร่าวๆ ได้ว่าตัวอย่างกล้วยหอมทองผ่านการฉายรังสีมาหรือไม่ ซึ่งถ้าต้องการตรวจสอบอย่างละเอียดมากขึ้น ควรใช้เครื่องทำให้แห้งแบบแช่แข็ง (freeze-dry) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในการทำให้สารตัวอย่างแห้งโดยรักษาคุณสมบัติเอกลักษณ์ของสารตัวอย่างไว้ เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนของการวิเคราะห์จากอนุมูลอิสระซึ่งเกิดขึ้นจากการอบแห้ง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการฉายรังสีกล้วยหอมทองด้วยรังสีแกมมาปริมาณ 0.3 kGy ซึ่งปริมาณรังสีนี้นิยมใช้เพื่อชะลอการสุกของกล้วยหอม ทำให้กล้วยหอมสุกช้าลงกว่ากล้วยหอมที่ไม่ฉายรังสีประมาณ 3-5 วัน (ยุทธพงศ์, ม.ป.ป.) ถ้าทดลองโดยใช้รังสีในปริมาณที่แตกต่างออกไป อาจได้ผลของการทดลองแตกต่างออกไป ดังนั้นหากต้องการศึกษาผลของการฉายรังสีกล้วยหอมทองเพิ่มเติม ควรทำการทดลองวัดสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณต่างๆ ที่แตกต่างกันทั้งน้อยและมากกว่า 0.3 kGy เพื่อผลของปริมาณการฉายรังสีต่อสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จิตติกานต์ ปัญญาใหญ่. 2551. กิจกรรมด้านออกซิเดชันของสาหร่ายเตา *Spirogyra neglecta*

(Hussall) Kutzing. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. แหล่งที่มา:

http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/biol0451tp_ch2.pdf, 29 มีนาคม 2555.

เทอดพงษ์ ไชยนันทน์. 2529. กำหนดกรรมวิธีการผลิตอาหารซึ่งมีการใช้กรรมวิธีการฉายรังสี.

ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 103 (พ.ศ.2529).

แหล่งที่มา: <http://www.fda.moph.go.th/fda-net/html/product/food/ntfmoph/ntf103.htm>,

27 เมษายน 2555.

นิพนธ์ ตังคนานุรักษ์. 2547. สเปกโทรสโกปีด้านการวิเคราะห์. สำนักพิมพ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ยุทธพงศ์ ประชาสิทธิศักดิ์. ม.ป.ป. การฉายรังสีอาหารและการยอมรับ. กลุ่มวิจัยและพัฒนา

นิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), กรุงเทพฯ. แหล่งที่มา:

<http://www.tint.or.th/nkc/nkc5003/nkc5003o.html>, 25 เมษายน 2555.

รังสันต์ จอมทะรักษ์. 2551. การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริก

แห้งปนฉายรังสีแกมมาโดยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ฉายรังสี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). ม.ป.ป. ศูนย์ฉายรังสี สถาบัน

เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/>

[nkc51/nkc5104/nkc5104w.html](http://www.tint.or.th/nkc/nkc51/nkc5104/nkc5104w.html), 27 เมษายน 2555.

สุจิตรา ย้งมี, ม.ป.ป. หลักฐานการนำผลงานวิจัยมาใช้ประโยชน์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น. แหล่งที่มา: [http://www.ora.kku.ac.th/RES_KKU/ATTACHMENTS_RESAPPLY_PUBLICATION/1788-1-01-เอกสารประกอบการสอน_ส่วนที่1\(ต่อ_EPR\)\[1\].pdf](http://www.ora.kku.ac.th/RES_KKU/ATTACHMENTS_RESAPPLY_PUBLICATION/1788-1-01-เอกสารประกอบการสอน_ส่วนที่1(ต่อ_EPR)[1].pdf), 29 มีนาคม 2555.

สำนักหอสมุดและศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. **ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้ “อาหารฉายรังสี”** มีนาคม 2553. แหล่งที่มา: <http://www.grad.ku.ac.th/thesis/manual/sci53-chapter03.pdf>, 29 มีนาคม 2555.

เสาวพงศ์ เจริญ และสุรศักดิ์ สัจจบุตร. ม.ป.ป. **รู้ได้อย่างไรว่าอาหารนี้ผ่านการฉายรังสีแล้วหรือยัง.** สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน), กรุงเทพฯ. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc5002/nkc5002y.html>, 27 เมษายน 2555

De Jesus, E., A. Rossi and R. Lopes. 1999. An ESR study on identification of gamma-irradiated kiwi, papaya and tomato using fruit pulp. **Int. J. Food Sci. Technol.** 34: 173-178.

Eaton, G.R., S. S. Eaton, D. P. Barr and R. T. Weber. 2010. **Quantitative EPR**. Springer-Verlag, Wien, Germany.

Kikuchi, M., Y. Shimoyama, M. Ukai and Y. Kobayashi. 2011. ESR detection procedure of irradiated papaya containing high water content. **Radiat. Phys. Chem.** 80: 664–667.

Maloney, D. R., B. J. Tabner and V. A. Tabner. 1992. An electron spin resonance study of gamma-irradiated fruits. **Radiat. Phys. Chem.** 39: 309-314.

Monthonwattana, S., A. Vitittheeranon and W. Sudprasert. 2010. Identification of irradiated rice noodles by electron spin resonance spectroscopy. *In* **Proceeding of the 36th Congress on Science and Technology of Thailand**. 26-28 October 2010, Bangkok, Thailand.

Raffi, J. and J. P. L. Agnel. 1989. Electron spin resonance identification of irradiated fruits.

Radiat. Phys. Chem. 34: 891-894.

_____, N. D. Yordanov, S. Chabane, L. Douifi, V. Gancheva and S. Ivanova. 2000.

Identification of irradiated treatment of aromatic herbs and spices by electron paramagnetic resonance and thermoluminescence. **Spectrochim. Acta (A)** 56: 409-416.

Stachowicz, W., G. Strzelczak-Burlinska, J. Michalik, A. Wojtowicz, A. Dziedzic-Goclawskab

and K. Ostrowskia. 1992. Application of electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy for control of irradiated food. **J. Sci. Food Agri.** 58: 407-415.

Weil, J.A. and J.R. Bolton. 2007. **Electron Paramagnetic Resonance Elementary Theory and Practical Applications.** John Wiley & Sons, Inc., Canada.

Yordanov, N. D., K. Aleksieva and I. Mansour. 2005. Improvement of the EPR detection of irradiated dry plants using microwave saturation and thermal treatment. **Radiat. Phys. Chem.** 73: 55-60.

_____, K. Aleksieva, L. Geogieva and E. Tzvetkova. 2009. EPR study on tomatoes before and after gamma-irradiation. **Radiat. Phys. Chem.** 78: 823-825.

_____ and Z. Pachova. 2006. Gamma-irradiated dry fruits. An example of a wide variety of long time dependent EPR spectra. **Spectrochim. Acta (A)** 63: 891-895.



ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 แสดงตัวอย่างข้อมูลดิบที่ใช้ในการวิจัย ความเข้มสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ป็นเรโซแนนซ์ของกล้วยหอมทองก่อนและหลัง ฉายรังสี 0.3 kGy ที่ตำแหน่งค่าความเข้มสนามแม่เหล็กต่างๆ

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก B (mT)	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก B (mT)	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
335.000	-214.664	496.006	335.674	-381.664	-17.994
335.029	-136.664	544.006	335.704	-274.664	150.006
335.059	-200.664	499.006	335.733	-246.664	268.006
335.088	-168.664	444.006	335.762	-225.664	311.006
335.117	-193.664	541.006	335.792	-357.664	344.006
335.147	-285.664	496.006	335.821	-358.664	440.006
335.176	-354.664	437.006	335.850	-437.664	476.006
335.205	-348.664	554.006	335.880	-547.664	653.006
335.235	-315.664	614.006	335.909	-529.664	835.006
335.264	-263.664	511.006	335.938	-451.664	949.006
335.293	-212.664	297.006	335.968	-403.664	1036.006
335.323	-219.664	152.006	335.997	-445.664	971.006
335.352	-249.664	3.006	336.026	-501.664	1056.006
335.381	-349.664	-77.994	336.056	-373.664	1066.006
335.411	-430.664	-54.994	336.085	-292.664	1131.006
335.440	-490.664	41.006	336.114	-313.664	1180.006
335.469	-515.664	27.006	336.144	-343.664	1136.006
335.499	-440.664	-11.994	336.173	-423.664	1119.006
335.528	-383.664	-110.994	336.202	-506.664	1107.006
335.557	-376.664	-232.994	336.232	-537.664	1097.006
335.586	-370.664	-274.994	336.261	-635.664	1141.006
335.616	-482.664	-253.994	336.290	-664.664	1105.006
335.645	-430.664	-146.994	336.320	-660.664	1089.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
336.349	-583.664	1065.006	337.023	-1012.664	1473.006
336.378	-704.664	1025.006	337.053	-1052.664	1461.006
336.408	-769.664	954.006	337.082	-1061.664	1312.006
336.437	-957.664	893.006	337.111	-1034.664	1215.006
336.466	-944.664	889.006	337.141	-1015.664	1237.006
336.496	-918.664	827.006	337.170	-866.664	1147.006
336.525	-966.664	878.006	337.199	-682.664	1109.006
336.554	-914.664	931.006	337.229	-593.664	1032.006
336.584	-820.664	937.006	337.258	-591.664	992.006
336.613	-825.664	951.006	337.287	-533.664	1003.006
336.642	-798.664	960.006	337.317	-430.664	888.006
336.672	-841.664	1067.006	337.346	-407.664	834.006
336.701	-852.664	1123.006	337.375	-390.664	725.006
336.730	-772.664	1287.006	337.405	-404.664	612.006
336.760	-736.664	1394.006	337.434	-376.664	480.006
336.789	-881.664	1476.006	337.463	-388.664	279.006
336.818	-906.664	1546.006	337.493	-462.664	87.006
336.848	-989.664	1687.006	337.522	-462.664	-25.994
336.877	-1065.664	1791.006	337.551	-449.664	-122.994
336.906	-1088.664	1840.006	337.581	-537.664	-148.994
336.935	-1172.664	1737.006	337.610	-675.664	-189.994
336.965	-1057.664	1656.006	337.639	-774.664	-134.994
336.994	-1059.664	1588.006	337.669	-946.664	-117.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
337.698	-1029.664	-88.994	338.372	-267.664	180.006
337.727	-1066.664	75.006	338.402	-434.664	278.006
337.757	-1044.664	170.006	338.431	-581.664	267.006
337.786	-1066.664	196.006	338.460	-610.664	368.006
337.815	-1120.664	247.006	338.490	-761.664	341.006
337.845	-1058.664	306.006	338.519	-819.664	370.006
337.874	-969.664	297.006	338.548	-891.664	329.006
337.903	-1047.664	165.006	338.578	-955.664	354.006
337.933	-992.664	185.006	338.607	-930.664	367.006
337.962	-831.664	196.006	338.636	-992.664	355.006
337.991	-646.664	199.006	338.666	-1020.664	354.006
338.021	-482.664	197.006	338.695	-1006.664	331.006
338.050	-172.664	242.006	338.724	-952.664	290.006
338.079	101.336	222.006	338.754	-970.664	310.006
338.108	182.336	193.006	338.783	-1022.664	254.006
338.138	266.336	188.006	338.812	-1092.664	180.006
338.167	314.336	188.006	338.842	-1119.664	133.006
338.196	419.336	259.006	338.871	-1158.664	93.006
338.226	403.336	333.006	338.900	-1105.664	43.006
338.255	279.336	484.006	338.930	-1015.664	21.006
338.284	171.336	538.006	338.959	-853.664	47.006
338.314	75.336	405.006	338.988	-593.664	-91.994
338.343	-97.664	281.006	339.018	-392.664	-47.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
339.047	-341.664	101.006	339.721	369.336	209.006
339.076	-246.664	152.006	339.751	508.336	116.006
339.106	-149.664	343.006	339.780	572.336	-48.994
339.135	-19.664	491.006	339.809	671.336	-225.994
339.164	-194.664	606.006	339.839	772.336	-338.994
339.194	-255.664	822.006	339.868	924.336	-293.994
339.223	-278.664	875.006	339.897	1042.336	-209.994
339.252	-264.664	977.006	339.927	1038.336	-255.994
339.282	-257.664	946.006	339.956	1259.336	-201.994
339.311	-220.664	980.006	339.985	1286.336	-185.994
339.340	-245.664	1008.006	340.015	1230.336	-26.994
339.370	-197.664	962.006	340.044	1011.336	78.006
339.399	-3.664	935.006	340.073	955.336	178.006
339.428	144.336	862.006	340.103	834.336	220.006
339.457	156.336	871.006	340.132	672.336	217.006
339.487	217.336	865.006	340.161	616.336	262.006
339.516	156.336	656.006	340.191	585.336	263.006
339.545	113.336	614.006	340.220	645.336	280.006
339.575	116.336	583.006	340.249	691.336	210.006
339.604	39.336	488.006	340.279	742.336	236.006
339.633	85.336	385.006	340.308	890.336	221.006
339.663	128.336	370.006	340.337	1007.336	322.006
339.692	268.336	291.006	340.367	1059.336	355.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
340.396	1278.336	445.006	341.070	203.336	232.006
340.425	1329.336	423.006	341.100	-53.664	129.006
340.455	1385.336	593.006	341.129	-98.664	64.006
340.484	1491.336	479.006	341.158	-46.664	48.006
340.513	1530.336	577.006	341.188	-17.664	48.006
340.543	1560.336	677.006	341.217	-77.664	132.006
340.572	1486.336	707.006	341.246	-62.664	246.006
340.601	1413.336	717.006	341.276	-150.664	386.006
340.630	1411.336	731.006	341.305	-177.664	452.006
340.660	1364.336	700.006	341.334	-286.664	566.006
340.689	1376.336	695.006	341.364	-312.664	665.006
340.718	1321.336	724.006	341.393	-409.664	643.006
340.748	1271.336	708.006	341.422	-464.664	528.006
340.777	1327.336	555.006	341.452	-388.664	275.006
340.806	1191.336	390.006	341.481	-211.664	114.006
340.836	1102.336	215.006	341.510	1.336	86.006
340.865	1026.336	239.006	341.540	144.336	155.006
340.894	922.336	217.006	341.569	241.336	88.006
340.924	807.336	83.006	341.598	322.336	167.006
340.953	616.336	8.006	341.628	416.336	223.006
340.982	375.336	97.006	341.657	468.336	413.006
341.012	281.336	209.006	341.686	469.336	455.006
341.041	241.336	343.006	341.716	550.336	472.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี
	341.745	500.336	476.006	342.419	399.336	1060.006
	341.774	527.336	532.006	342.449	384.336	1130.006
	341.804	598.336	603.006	342.478	408.336	1261.006
	341.833	662.336	679.006	342.507	402.336	1279.006
	341.862	588.336	856.006	342.537	398.336	1255.006
	341.892	559.336	909.006	342.566	406.336	1268.006
	341.921	640.336	909.006	342.595	415.336	1224.006
	341.950	657.336	979.006	342.625	267.336	1239.006
	341.979	708.336	1031.006	342.654	147.336	1134.006
	342.009	725.336	902.006	342.683	-43.664	1012.006
	342.038	655.336	944.006	342.713	-162.664	928.006
	342.067	569.336	1067.006	342.742	-245.664	854.006
	342.097	513.336	1076.006	342.771	-261.664	850.006
	342.126	491.336	1104.006	342.801	-285.664	881.006
	342.155	546.336	1078.006	342.830	-311.664	1074.006
	342.185	642.336	999.006	342.859	-314.664	1286.006
	342.214	640.336	892.006	342.889	-329.664	1449.006
	342.243	710.336	832.006	342.918	-256.664	1600.006
	342.273	632.336	836.006	342.947	-61.664	1536.006
	342.302	689.336	835.006	342.977	7.336	1445.006
	342.331	597.336	909.006	343.006	83.336	1377.006
	342.361	484.336	890.006	343.035	85.336	1223.006
	342.390	372.336	950.006	343.065	256.336	1150.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		B (mT)	หลังฉายรังสี
343.094	370.336	1160.006	343.768	-644.664	1087.006
343.123	508.336	1052.006	343.798	-679.664	1150.006
343.152	516.336	1067.006	343.827	-576.664	1096.006
343.182	486.336	1087.006	343.856	-552.664	1074.006
343.211	292.336	1062.006	343.886	-507.664	1001.006
343.240	58.336	1045.006	343.915	-410.664	969.006
343.270	-204.664	1026.006	343.944	-441.664	918.006
343.299	-373.664	932.006	343.974	-418.664	878.006
343.328	-377.664	1005.006	344.003	-328.664	885.006
343.358	-417.664	1194.006	344.032	-305.664	879.006
343.387	-467.664	1283.006	344.062	-284.664	914.006
343.416	-419.664	1378.006	344.091	-142.664	908.006
343.446	-363.664	1372.006	344.120	-145.664	920.006
343.475	-378.664	1409.006	344.150	-100.664	794.006
343.504	-239.664	1431.006	344.179	-112.664	760.006
343.534	-104.664	1281.006	344.208	-190.664	652.006
343.563	-132.664	1154.006	344.238	-282.664	614.006
343.592	-185.664	1066.006	344.267	-419.664	647.006
343.622	-265.664	1074.006	344.296	-587.664	654.006
343.651	-331.664	1102.006	344.326	-738.664	747.006
343.680	-374.664	1111.006	344.355	-824.664	772.006
343.710	-421.664	1036.006	344.384	-1017.664	763.006
343.739	-486.664	1093.006	344.414	-1093.664	855.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี
344.443	-1160.664	922.006	345.117	158.336	140.006	
344.472	-1281.664	806.006	345.147	343.336	236.006	
344.501	-1471.664	675.006	345.176	491.336	340.006	
344.531	-1561.664	592.006	345.205	543.336	455.006	
344.560	-1699.664	562.006	345.235	566.336	560.006	
344.589	-1739.664	507.006	345.264	504.336	645.006	
344.619	-1553.664	491.006	345.293	495.336	707.006	
344.648	-1468.664	482.006	345.323	464.336	800.006	
344.677	-1494.664	445.006	345.352	416.336	995.006	
344.707	-1368.664	456.006	345.381	324.336	1126.006	
344.736	-1226.664	480.006	345.411	108.336	1227.006	
344.765	-1154.664	541.006	345.440	-54.664	1277.006	
344.795	-1092.664	539.006	345.469	-137.664	1252.006	
344.824	-959.664	397.006	345.499	-288.664	1222.006	
344.853	-844.664	371.006	345.528	-306.664	1057.006	
344.883	-650.664	371.006	345.557	-289.664	924.006	
344.912	-453.664	392.006	345.586	-475.664	821.006	
344.941	-217.664	307.006	345.616	-516.664	701.006	
344.971	-146.664	221.006	345.645	-527.664	762.006	
345.000	-67.664	201.006	345.674	-617.664	959.006	
345.029	-23.664	126.006	345.704	-653.664	962.006	
345.059	42.336	143.006	345.733	-542.664	1080.006	
345.088	77.336	166.006	345.762	-452.664	1045.006	

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
345.792	-367.664	1146.006	346.466	1077.336	738.006
345.821	-213.664	1230.006	346.496	944.336	755.006
345.850	-117.664	1292.006	346.525	858.336	811.006
345.880	37.336	1256.006	346.554	788.336	810.006
345.909	7.336	1273.006	346.584	712.336	760.006
345.938	-34.664	1271.006	346.613	622.336	722.006
345.968	-16.664	1368.006	346.642	562.336	675.006
345.997	-2.664	1540.006	346.672	560.336	593.006
346.026	101.336	1612.006	346.701	516.336	584.006
346.056	121.336	1719.006	346.730	556.336	711.006
346.085	89.336	1796.006	346.760	637.336	802.006
346.114	144.336	1826.006	346.789	750.336	679.006
346.144	120.336	1876.006	346.818	660.336	422.006
346.173	90.336	1970.006	346.848	659.336	195.006
346.202	220.336	1956.006	346.877	539.336	57.006
346.232	265.336	1755.006	346.906	366.336	-191.994
346.261	260.336	1671.006	346.935	356.336	-279.994
346.290	425.336	1540.006	346.965	265.336	-280.994
346.320	689.336	1298.006	346.994	250.336	-235.994
346.349	974.336	996.006	347.023	164.336	-217.994
346.378	1077.336	822.006	347.053	64.336	-273.994
346.408	1240.336	729.006	347.082	39.336	-250.994
346.437	1267.336	674.006	347.111	37.336	-175.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
347.141	78.336	-101.994	347.815	-683.664	-1061.994
347.170	150.336	-58.994	347.845	-655.664	-1170.994
347.199	203.336	-61.994	347.874	-679.664	-1213.994
347.229	363.336	-59.994	347.903	-638.664	-1093.994
347.258	504.336	-31.994	347.933	-780.664	-1120.994
347.287	624.336	-43.994	347.962	-880.664	-1151.994
347.317	629.336	-113.994	347.991	-928.664	-941.994
347.346	396.336	-194.994	348.021	-913.664	-756.994
347.375	251.336	-307.994	348.050	-852.664	-589.994
347.405	120.336	-370.994	348.079	-850.664	-480.994
347.434	-50.664	-508.994	348.108	-843.664	-218.994
347.463	-110.664	-670.994	348.138	-756.664	-125.994
347.493	-123.664	-790.994	348.167	-666.664	-19.994
347.522	-187.664	-729.994	348.196	-506.664	106.006
347.551	-309.664	-678.994	348.226	-391.664	74.006
347.581	-452.664	-561.994	348.255	-317.664	202.006
347.610	-450.664	-615.994	348.284	-254.664	141.006
347.639	-619.664	-612.994	348.314	-206.664	56.006
347.669	-664.664	-679.994	348.343	-158.664	-53.994
347.698	-755.664	-718.994	348.372	-187.664	-150.994
347.727	-787.664	-797.994	348.402	-216.664	-304.994
347.757	-761.664	-782.994	348.431	-156.664	-481.994
347.786	-712.664	-921.994	348.460	-170.664	-561.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
348.490	-59.664	-556.994	349.164	880.336	-1170.994
348.519	-53.664	-507.994	349.194	835.336	-1172.994
348.548	27.336	-463.994	349.223	740.336	-1298.994
348.578	169.336	-567.994	349.252	698.336	-1398.994
348.607	341.336	-548.994	349.282	821.336	-1554.994
348.636	457.336	-597.994	349.311	869.336	-1666.994
348.666	496.336	-577.994	349.340	865.336	-1831.994
348.695	580.336	-589.994	349.370	777.336	-1976.994
348.724	659.336	-640.994	349.399	661.336	-1944.994
348.754	836.336	-602.994	349.428	559.336	-1935.994
348.783	808.336	-712.994	349.457	495.336	-1990.994
348.812	824.336	-758.994	349.487	563.336	-1922.994
348.842	940.336	-701.994	349.516	704.336	-1768.994
348.871	947.336	-656.994	349.545	789.336	-1564.994
348.900	850.336	-583.994	349.575	857.336	-1412.994
348.930	859.336	-588.994	349.604	833.336	-1127.994
348.959	959.336	-704.994	349.633	700.336	-954.994
348.988	996.336	-687.994	349.663	655.336	-734.994
349.018	1055.336	-743.994	349.692	579.336	-684.994
349.047	987.336	-862.994	349.721	480.336	-695.994
349.076	886.336	-970.994	349.751	393.336	-804.994
349.106	911.336	-1029.994	349.780	357.336	-859.994
349.135	838.336	-1115.994	349.809	305.336	-873.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
349.839	231.336	-852.994	350.513	-186.664	-148.994
349.868	282.336	-785.994	350.543	-159.664	-12.994
349.897	250.336	-761.994	350.572	-107.664	186.006
349.927	220.336	-682.994	350.601	9.336	299.006
349.956	252.336	-697.994	350.630	213.336	412.006
349.985	234.336	-742.994	350.660	473.336	468.006
350.015	205.336	-741.994	350.689	775.336	652.006
350.044	136.336	-749.994	350.718	954.336	790.006
350.073	-20.664	-821.994	350.748	1043.336	874.006
350.103	-88.664	-628.994	350.777	1194.336	904.006
350.132	-192.664	-597.994	350.806	1369.336	891.006
350.161	-210.664	-487.994	350.836	1506.336	1069.006
350.191	-325.664	-429.994	350.865	1541.336	1245.006
350.220	-355.664	-363.994	350.894	1482.336	1391.006
350.249	-244.664	-452.994	350.924	1482.336	1432.006
350.279	-225.664	-540.994	350.953	1540.336	1586.006
350.308	-110.664	-571.994	350.982	1549.336	1767.006
350.337	-155.664	-540.994	351.012	1502.336	1770.006
350.367	-105.664	-561.994	351.041	1556.336	1832.006
350.396	-144.664	-602.994	351.070	1467.336	1941.006
350.425	-81.664	-587.994	351.100	1488.336	1920.006
350.455	-60.664	-449.994	351.129	1416.336	2009.006
350.484	-129.664	-278.994	351.158	1223.336	2030.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี
	351.188	1127.336	2150.006	351.862	2043.336	4159.006
	351.217	1067.336	2223.006	351.892	1925.336	3605.006
	351.246	965.336	2397.006	351.921	1753.336	3076.006
	351.276	974.336	2527.006	351.950	1513.336	2512.006
	351.305	1021.336	2598.006	351.979	1240.336	1877.006
	351.334	1128.336	2794.006	352.009	1065.336	1149.006
	351.364	1407.336	2890.006	352.038	866.336	516.006
	351.393	1632.336	3062.006	352.067	698.336	-130.994
	351.422	1874.336	3205.006	352.097	555.336	-875.994
	351.452	2083.336	3371.006	352.126	355.336	-1672.994
	351.481	2235.336	3637.006	352.155	136.336	-2490.994
	351.510	2426.336	3843.006	352.185	-186.664	-3132.994
	351.540	2570.336	4012.006	352.214	-505.664	-3794.994
	351.569	2682.336	4118.006	352.243	-818.664	-4253.994
	351.598	2732.336	4251.006	352.273	-991.664	-4662.994
	351.628	2760.336	4355.006	352.302	-1167.664	-5116.994
	351.657	2763.336	4275.006	352.331	-1297.664	-5433.994
	351.686	2781.336	4354.006	352.361	-1454.664	-5675.994
	351.716	2630.336	4495.006	352.390	-1628.664	-5878.994
	351.745	2520.336	4687.006	352.419	-1731.664	-6026.994
	351.774	2387.336	4803.006	352.449	-1873.664	-6223.994
	351.804	2291.336	4732.006	352.478	-2061.664	-6393.994
	351.833	2156.336	4467.006	352.507	-2254.664	-6528.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี
	352.537	-2248.664	-6579.994	353.211	-1602.664	-3302.994
	352.566	-2415.664	-6675.994	353.240	-1464.664	-3181.994
	352.595	-2680.664	-6625.994	353.270	-1163.664	-3100.994
	352.625	-2758.664	-6550.994	353.299	-838.664	-3059.994
	352.654	-2876.664	-6528.994	353.328	-704.664	-3104.994
	352.683	-2922.664	-6525.994	353.358	-694.664	-3123.994
	352.713	-3020.664	-6414.994	353.387	-650.664	-3106.994
	352.742	-2966.664	-6173.994	353.416	-527.664	-3108.994
	352.771	-3032.664	-6009.994	353.446	-516.664	-3050.994
	352.801	-3002.664	-5840.994	353.475	-522.664	-3001.994
	352.830	-2951.664	-5659.994	353.504	-396.664	-2932.994
	352.859	-3030.664	-5414.994	353.534	-154.664	-2757.994
	352.889	-2853.664	-5221.994	353.563	-33.664	-2628.994
	352.918	-2595.664	-5050.994	353.592	-9.664	-2474.994
	352.947	-2403.664	-4841.994	353.622	78.336	-2338.994
	352.977	-2226.664	-4646.994	353.651	91.336	-2092.994
	353.006	-2010.664	-4500.994	353.680	50.336	-1870.994
	353.035	-1990.664	-4374.994	353.710	62.336	-1604.994
	353.065	-2053.664	-4269.994	353.739	31.336	-1462.994
	353.094	-2111.664	-4112.994	353.768	123.336	-1396.994
	353.123	-2011.664	-3881.994	353.798	46.336	-1402.994
	353.152	-1930.664	-3710.994	353.827	56.336	-1461.994
	353.182	-1730.664	-3493.994	353.856	120.336	-1268.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก			ความเข้ม สนามแม่เหล็ก		
ความเข้ม ESR			ความเข้ม ESR		
B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
353.886	215.336	-1272.994	354.560	-253.664	-888.994
353.915	158.336	-1319.994	354.589	-86.664	-797.994
353.944	-23.664	-1343.994	354.619	-61.664	-696.994
353.974	-70.664	-1378.994	354.648	-50.664	-572.994
354.003	-202.664	-1389.994	354.677	13.336	-480.994
354.032	-275.664	-1416.994	354.707	137.336	-491.994
354.062	-371.664	-1475.994	354.736	103.336	-435.994
354.091	-431.664	-1642.994	354.765	86.336	-335.994
354.120	-416.664	-1697.994	354.795	-11.664	-338.994
354.150	-476.664	-1666.994	354.824	-134.664	-367.994
354.179	-478.664	-1716.994	354.853	-358.664	-517.994
354.208	-334.664	-1710.994	354.883	-609.664	-582.994
354.238	-191.664	-1733.994	354.912	-783.664	-556.994
354.267	-299.664	-1787.994	354.941	-895.664	-486.994
354.296	-270.664	-1633.994	354.971	-1037.664	-542.994
354.326	-310.664	-1558.994	355.000	-1152.664	-659.994
354.355	-387.664	-1410.994	355.029	-1123.664	-576.994
354.384	-302.664	-1304.994	355.059	-1069.664	-701.994
354.414	-265.664	-1273.994	355.088	-999.664	-711.994
354.443	-311.664	-1193.994	355.117	-914.664	-792.994
354.472	-399.664	-1042.994	355.147	-903.664	-846.994
354.501	-433.664	-1019.994	355.176	-941.664	-902.994
354.531	-346.664	-1006.994	355.205	-926.664	-836.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
B (mT)			B (mT)		
355.235	-983.664	-851.994	355.909	-2575.664	-1342.994
355.264	-1081.664	-713.994	355.938	-2693.664	-1550.994
355.293	-1098.664	-585.994	355.968	-2804.664	-1695.994
355.323	-1181.664	-529.994	355.997	-3011.664	-1876.994
355.352	-1258.664	-488.994	356.026	-3173.664	-2089.994
355.381	-1321.664	-410.994	356.056	-3230.664	-2346.994
355.411	-1316.664	-381.994	356.085	-3265.664	-2580.994
355.440	-1322.664	-256.994	356.114	-3411.664	-2817.994
355.469	-1371.664	-209.994	356.144	-3523.664	-3066.994
355.499	-1439.664	-119.994	356.173	-3514.664	-3389.994
355.528	-1444.664	-13.994	356.202	-3474.664	-3657.994
355.557	-1434.664	60.006	356.232	-3361.664	-3801.994
355.586	-1456.664	98.006	356.261	-3176.664	-3554.994
355.616	-1466.664	-39.994	356.290	-2873.664	-3248.994
355.645	-1638.664	-186.994	356.320	-2390.664	-2821.994
355.674	-1702.664	-422.994	356.349	-1853.664	-2205.994
355.704	-1870.664	-492.994	356.378	-1298.664	-1417.994
355.733	-1946.664	-541.994	356.408	-752.664	-700.994
355.762	-1996.664	-688.994	356.437	-237.664	-31.994
355.792	-2095.664	-760.994	356.466	268.336	404.006
355.821	-2226.664	-889.994	356.496	635.336	793.006
355.850	-2357.664	-1046.994	356.525	965.336	1232.006
355.880	-2447.664	-1229.994	356.554	1157.336	1572.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี	B (mT)	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
356.584	1350.336	1849.006	357.258	391.336	229.006
356.613	1429.336	1993.006	357.287	305.336	84.006
356.642	1374.336	1993.006	357.317	181.336	82.006
356.672	1383.336	1947.006	357.346	108.336	36.006
356.701	1381.336	1886.006	357.375	-62.664	114.006
356.730	1370.336	1788.006	357.405	-176.664	224.006
356.760	1362.336	1814.006	357.434	-254.664	204.006
356.789	1318.336	1771.006	357.463	-301.664	210.006
356.818	1135.336	1755.006	357.493	-270.664	262.006
356.848	997.336	1778.006	357.522	-249.664	332.006
356.877	909.336	1749.006	357.551	-258.664	248.006
356.906	848.336	1644.006	357.581	-230.664	135.006
356.935	669.336	1517.006	357.610	-339.664	170.006
356.965	477.336	1398.006	357.639	-402.664	83.006
356.994	337.336	1197.006	357.669	-409.664	16.006
357.023	315.336	1120.006	357.698	-400.664	56.006
357.053	306.336	1065.006	357.727	-418.664	-9.994
357.082	340.336	1049.006	357.757	-505.664	34.006
357.111	393.336	990.006	357.786	-628.664	117.006
357.141	499.336	910.006	357.815	-689.664	123.006
357.170	491.336	812.006	357.845	-547.664	173.006
357.199	505.336	569.006	357.874	-457.664	65.006
357.229	479.336	460.006	357.903	-220.664	-1.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก			ความเข้ม สนามแม่เหล็ก		
B (mT)	ความเข้ม ESR		B (mT)	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
357.933	-30.664	-103.994	358.607	-48.664	486.006
357.962	135.336	-80.994	358.636	15.336	234.006
357.991	210.336	-87.994	358.666	66.336	83.006
358.021	313.336	-3.994	358.695	114.336	-97.994
358.050	479.336	74.006	358.724	211.336	-261.994
358.079	476.336	143.006	358.754	190.336	-322.994
358.108	441.336	139.006	358.783	73.336	-372.994
358.138	547.336	97.006	358.812	73.336	-315.994
358.167	516.336	119.006	358.842	100.336	-210.994
358.196	521.336	26.006	358.871	48.336	-55.994
358.226	449.336	-2.994	358.900	25.336	93.006
358.255	456.336	88.006	358.930	0.336	113.006
358.284	333.336	216.006	358.959	66.336	192.006
358.314	287.336	409.006	358.988	184.336	214.006
358.343	116.336	546.006	359.018	139.336	193.006
358.372	-12.664	686.006	359.047	248.336	170.006
358.402	-64.664	775.006	359.076	450.336	179.006
358.431	-88.664	825.006	359.106	433.336	144.006
358.460	-56.664	855.006	359.135	503.336	113.006
358.490	-95.664	916.006	359.164	404.336	78.006
358.519	-114.664	920.006	359.194	155.336	39.006
358.548	-109.664	813.006	359.223	103.336	-12.994
358.578	-76.664	773.006	359.252	39.336	20.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		B (mT)	หลังฉายรังสี
359.282	145.336	-6.994	359.956	737.336	-407.994
359.311	137.336	105.006	359.985	794.336	-456.994
359.340	212.336	236.006	360.015	965.336	-453.994
359.370	191.336	319.006	360.044	969.336	-515.994
359.399	143.336	385.006	360.073	1008.336	-564.994
359.428	190.336	412.006	360.103	975.336	-508.994
359.457	172.336	480.006	360.132	857.336	-459.994
359.487	267.336	554.006	360.161	782.336	-500.994
359.516	356.336	576.006	360.191	706.336	-519.994
359.545	473.336	465.006	360.220	603.336	-465.994
359.575	578.336	390.006	360.249	421.336	-396.994
359.604	607.336	445.006	360.279	267.336	-257.994
359.633	614.336	379.006	360.308	221.336	-82.994
359.663	594.336	294.006	360.337	202.336	5.006
359.692	488.336	291.006	360.367	229.336	61.006
359.721	474.336	211.006	360.396	181.336	102.006
359.751	470.336	189.006	360.425	197.336	195.006
359.780	469.336	157.006	360.455	180.336	80.006
359.809	458.336	-15.994	360.484	14.336	-2.994
359.839	630.336	-118.994	360.513	-187.664	-164.994
359.868	644.336	-337.994	360.543	-290.664	-228.994
359.897	643.336	-350.994	360.572	-257.664	-268.994
359.927	649.336	-341.994	360.601	-179.664	-405.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก			ความเข้ม สนามแม่เหล็ก		
B (mT)	ความเข้ม ESR		B (mT)	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
360.630	-102.664	-469.994	361.305	1540.336	-991.994
360.660	48.336	-451.994	361.334	1566.336	-986.994
360.689	172.336	-433.994	361.364	1650.336	-1021.994
360.718	415.336	-327.994	361.393	1769.336	-1020.994
360.748	551.336	-296.994	361.422	1921.336	-962.994
360.777	537.336	-207.994	361.452	2000.336	-841.994
360.806	542.336	-146.994	361.481	1987.336	-851.994
360.836	645.336	-185.994	361.510	2046.336	-824.994
360.865	685.336	-191.994	361.540	2059.336	-827.994
360.894	687.336	-228.994	361.569	2132.336	-854.994
360.924	708.336	-222.994	361.598	2258.336	-777.994
360.953	710.336	-253.994	361.628	2380.336	-703.994
360.982	740.336	-255.994	361.657	2415.336	-625.994
361.012	788.336	-273.994	361.686	2397.336	-545.994
361.041	946.336	-297.994	361.716	2276.336	-424.994
361.070	1104.336	-371.994	361.745	2129.336	-369.994
361.100	1152.336	-474.994	361.774	2040.336	-319.994
361.129	1243.336	-530.994	361.804	1915.336	-238.994
361.158	1206.336	-608.994	361.833	1964.336	-179.994
361.188	1245.336	-768.994	361.862	2070.336	-130.994
361.217	1359.336	-898.994	361.892	2135.336	-145.994
361.246	1421.336	-981.994	361.921	2035.336	-198.994
361.276	1520.336	-997.994	361.950	2106.336	-200.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก			ความเข้ม สนามแม่เหล็ก		
B (mT)	ความเข้ม ESR		B (mT)	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี		ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
361.979	2050.336	-237.994	362.654	1102.336	801.006
362.009	2086.336	-273.994	362.683	1057.336	956.006
362.038	1943.336	-213.994	362.713	979.336	919.006
362.067	1889.336	-340.994	362.742	928.336	1010.006
362.097	1944.336	-275.994	362.771	742.336	1024.006
362.126	1862.336	-251.994	362.801	607.336	935.006
362.155	1775.336	-245.994	362.830	418.336	875.006
362.185	1660.336	-221.994	362.859	439.336	696.006
362.214	1539.336	-216.994	362.889	479.336	640.006
362.243	1463.336	-138.994	362.918	381.336	593.006
362.273	1305.336	-99.994	362.947	294.336	512.006
362.302	1218.336	-35.994	362.977	221.336	390.006
362.331	1112.336	13.006	363.006	78.336	250.006
362.361	982.336	190.006	363.035	93.336	273.006
362.390	880.336	345.006	363.065	42.336	360.006
362.419	938.336	440.006	363.094	106.336	344.006
362.449	876.336	572.006	363.123	147.336	420.006
362.478	862.336	668.006	363.152	143.336	344.006
362.507	792.336	691.006	363.182	121.336	263.006
362.537	879.336	704.006	363.211	142.336	276.006
362.566	913.336	713.006	363.240	74.336	213.006
362.595	958.336	705.006	363.270	17.336	80.006
362.625	1037.336	708.006	363.299	-35.664	3.006

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR		ความเข้ม สนามแม่เหล็ก	ความเข้ม ESR	
	B (mT)	ก่อนฉายรังสี		B (mT)	หลังฉายรังสี
363.328	-67.664	-45.994	364.003	-223.664	549.006
363.358	-151.664	-176.994	364.032	-265.664	519.006
363.387	-123.664	-238.994	364.062	-248.664	571.006
363.416	-341.664	-387.994	364.091	-317.664	723.006
363.446	-451.664	-347.994	364.120	-340.664	732.006
363.475	-541.664	-335.994	364.150	-276.664	582.006
363.504	-684.664	-268.994	364.179	-347.664	527.006
363.534	-833.664	-129.994	364.208	-322.664	379.006
363.563	-961.664	-19.994	364.238	-172.664	208.006
363.592	-888.664	-63.994	364.267	-44.664	14.006
363.622	-878.664	4.006	364.296	132.336	-224.994
363.651	-858.664	161.006	364.326	304.336	-344.994
363.680	-757.664	254.006	364.355	285.336	-505.994
363.710	-717.664	342.006	364.384	250.336	-623.994
363.739	-698.664	497.006	364.414	250.336	-717.994
363.768	-559.664	643.006	364.443	273.336	-582.994
363.798	-566.664	682.006	364.472	223.336	-488.994
363.827	-516.664	645.006	364.501	141.336	-441.994
363.856	-510.664	545.006	364.531	-55.664	-404.994
363.886	-487.664	388.006	364.560	-189.664	-471.994
363.915	-361.664	377.006	364.589	-253.664	-447.994
363.944	-205.664	426.006	364.619	-303.664	-472.994
363.974	-120.664	467.006	364.648	-353.664	-544.994

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

ความเข้มสนามแม่เหล็ก B (mT)	ความเข้ม ESR	
	ก่อนฉายรังสี	หลังฉายรังสี
364.677	-451.664	-470.994
364.707	-475.664	-428.994
364.736	-504.664	-402.994
364.765	-542.664	-309.994
364.795	-465.664	-378.994
364.824	-315.664	-555.994
364.853	-290.664	-659.994
364.883	-142.664	-759.994
364.912	18.336	-964.994
364.941	135.336	-1055.994
364.971	31.336	-1123.994
365.000	64.336	-1115.994

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวภัทรา สุขสบาย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 7 กรกฎาคม 2530
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล

