วิทยานิพนธ์

การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นฉายรังสีแกมมาโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

MEASUREMENT AND LONG LIFE STUDY OF FREE RADICALS IN GAMMA IRRADIATED RED CHILLI POWDER BY ELECTRON SPIN RESONANCE SPECTROMETRY

นายรังสันต์ จอมทะรักษ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)

ปริญญา

รังสีประยุกต์และไอโซโทป	รังสีประยุกต์และไอโซโทป
สาขา	**ภาควิชา**

เรื่อง การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นฉายรังสีแกมมาโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

Measurement and Long Life Study of Free Radicals in Gamma Irradiated Red Chilli Powder by Electron Spin Resonance Spectrometry

นามผู้วิจัย นายรังสันต์ จอมทะรักษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์อรุณี วงศ์ปิยะสถิตย์, M.S.)

กรรมการ .....

(อาจารย์ศิริรัตน์ พีรมนตรี, วท.บ.)

กรรมการ .....

(รองศาสตราจารย์อนันต์ชัย เขื่อนธรรม, M.S.)

หัวหน้าภาควิชา .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันวิสา สุดประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... **เดือน**..... **พ.ศ.**.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นฉายรังสีแกมมาโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

Measurement and Long Life Study of Free Radicals in Gamma Irradiated Red Chilli Powder by Electron Spin Resonance Spectrometry

โดย

นายรังสันต์ จอมทะรักษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป)
พ.ศ. 2551

รังสันต์ จอมทะรักษ์ 2551: การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นฉายรังสีแกมมาโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (รังสีประยุกต์และไอโซโทป) สาขารังสีประยุกต์และไอโซโทป ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ อรุณี วงศ์ปิยะสถิตย์, M.S. 48 หน้า

ทำการตรวจวัดปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระ ในพริกแห้งป่นฉายรังสีแกมมา (โดยเครื่องฉายรังสีรุ่น Gamma Cell 220) แล้วใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20 และ 30 กิโลเกรย์ และทำการศึกษาระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระภายหลังการฉายรังสีที่ระยะเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 16, 21, 31, 41, 51 และ 61 วัน

ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณอนุมูลอิสระจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณจะมากที่สุดที่ 30 กิโลเกรย์ สำหรับระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระนั้น พบว่า ในวันที่ 1 หลังฉายรังสีจะมีอนุมูลอิสระมากที่สุด และจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นหลังจากฉายรังสี ซึ่งการลดลงของอนุมูลอิสระจะมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ของวันที่ 16 หลังฉายรังสี เมื่อเปรียบเทียบปริมาณอนุมูลอิสระที่ระดับรังสีต่าง ๆ กันในวันที่ 16 หลังฉายรังสี พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังนั้นควรเก็บรักษาพริกแห้งป่นที่ผ่านการฉายรังสี ก่อนนำไปวางขายในท้องตลาดหรือนำมาบริโภคไว้อย่างน้อย16 วัน หลังจากฉายรังสี

_____ _____ ___/___/___

ลายมือชื่อนิสิต ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Rangsan Jomtarak 2008: Measurement and Long Life Study of Free Radicals in Gamma Irradiated Red Chilli Powder by Electron Spin Resonance Spectrometry. Master of Science (Applied Radiation and Isotopes), Major Field: Applied Radiation and Isotopes, Department of Applied Radiation and Isotopes. Thesis Advisor: Associate Professor Arunee Wongpiyasatid, M.S. 48 pages.

Measurement of free radicals by electron spin resonance in red chilli powder irradiated by gamma rays (Gamma Cell 220) at different doses 0, 5, 10, 15, 20, and 30 kGy and the long life of free radicals at different time 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 16, 21, 31, 41, 51, and 61 days after irradiation was studied.

The result of this experiment showed that ESR signal intensity of irradiated red chilli powder increased whereas radiation doses increased and the highest ESR signal intensity was observed at 30 kGy. The ESR signal intensity was then exponentially decreased with time. For long life study, it was found that free radicals were highest at one day after irradiation. When comparing ESR signal intensity at different doses of radiation at 16 days after irradiation, the result showed no significant differences. Consequently, prior to distribution in the market, irradiated red chilli powder should be stored for at least 16 days.

_____ _____ ___ / ___ / ___

Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จลุล่วงด้วยดีเพราะความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายกลุ่ม ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง รองศาสตราจารย์ อรุณี วงศ์ปิยะสถิตย์ ประธานกรรมการ รอง-ศาสตราจารย์ อนันต์ชัย เขื่อนธรรม กรรมการวิชารอง อาจารย์ศิริรัตน์ พีรมนตรี กรรมการวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นฤปวัจก์ เงินวิจิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษาแนะนำ และ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่ได้กรุณาตรวจทานความถูกต้องของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ต่อการศึกษาวิจัยงานวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณมานพ ติระรัตนสมโภช นักวิทยาศาสตร์ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณอารักษ์ วิฑิตธีรานนท์ นักวิทยาศาสตร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยในครั้งนี้ และ บริษัท เอ็น เอส ที ฟู้ด อินกรีเดียนท์ จำกัด ที่อนุเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิตที่ให้โอกาสในการศึกษา และสนับสนุนทุนการศึกษาในครั้งนี้ และขอบพระคุณพี่ๆเพื่อนๆน้องๆที่ให้ความช่วยเหลือทุกสิ่งอย่าง

ท้ายสุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ประโยชน์ใดอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่บิดา มารดา และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้เมตตาอบรมสั่งสอนให้มีความรู้จนถึงปัจจุบัน และขออุทิศให้คุณยายและน้องชายของข้าพเจ้า

รังสันต์ จอมทะรักษ์

เมษายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	17
อุปกรณ์	17
วิธีการ	17
ผลและวิจารณ์	20
ผล	20
วิจารณ์	27
สรุปและข้อเสนอแนะ	30
สรุป	30
ข้อเสนอแนะ	30
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	31
ภาคผนวก	33
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	48

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เครื่อง ESR แบ่งตามคามถี่ของคลื่นที่ให้พลังงาน	9
2	ปริมาณอนุมูลอิสระต่อมิลลิกรัมในพริกป่นฉายรังสีที่ระดับ 0 5 10 15 20 และ 30 กิโลเกรย์	23
3	แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ด้วยวิธี Fisher's least significant difference. (LSD)	25

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลของปริมาณอนุมูลอิสระ	47

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	Magnetic moment	7
2	Zeeman effect	7
3	การเกิดสปินในอิเล็กตรอน	11
4	ตัวอย่างอะตอมที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ก) และที่ไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ข)	11
5	แสดงถุงพลาสติกบรรจุพริกเพื่อเตรียมฉายรังสี	17
6	แสดงหลอดแก้วควอตซ์บรรจุพริกเพื่อเตรียมวัดปริมาณอนุมูลอิสระโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	18
7	แสดง ESR Spectrum ของพริกป่นที่อ่านได้โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	22
8	แสดง ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสีปริมาณต่างๆในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
1	เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์รุ่น Bruker A300 Research	34
2	แผนภาพเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์รุ่น Bruker A300 Research	34
3	ESR Signal Intensity ของพริกที่ไม่ได้ฉายรังสีในระยะเวลาต่างๆ	35
4	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	36
5	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	37
6	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	38
7	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	39
8	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี	40
9	ESR Signal Intensity ของพริกที่ไม่ฉายรังสี	41
10	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์	42
11	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์	43
12	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์	44
13	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์	45
14	ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์	46

การศึกษาปริมาณและระยะเวลาการคงอยู่ของอนุมูลอิสระในพริกแห้งป่นฉายรังสี แกมมาโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

Measurement and Long Life Study of Free Radicals in Gamma Irradiated Red Chilli Powder by Electron Spin Resonance Spectrometry

คำนำ

อาหารเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการดำรงชีพของมนุษย์ ในการผลิตและเก็บรักษาอาหารไว้เพื่อบริโภค มนุษย์มีวิธีการผลิตและเก็บรักษาที่มากมาย เช่น การตากแห้ง การรมควัน การอบแห้ง การย่าง การพาสเจอไรเซชัน (pasteurization) การรมด้วยสารเคมี การแช่แข็ง ใช้คลื่นไมโครเวฟ การฉายรังสี เป็นต้น ความเหมาะสมของวิธีการผลิตและเก็บรักษาอาหาร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของอาหารนั้นๆ ในปัจจุบันวิธีการผลิตและเก็บรักษาอาหารที่ได้รับความนิยมอีกวิธีหนึ่งก็คือการฉายรังสีอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันตามประเภทของอาหาร เช่น เพื่อยืดอายุการวางตลาดของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสุขอนามัย โดยใช้รังสีทำลายหรือควบคุมจุลินทรีย์และพยาธิที่ก่อให้เกิดโรค เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการทางด้านการค้าระหว่างประเทศว่าด้วยการกักกัน (quarantine) ในผลิตผลทางการเกษตรและเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเทคนิคของอาหารทำให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น เมื่อนำอาหารไปผ่านการฉายรังสี รังสีจะทำปฏิกิริยากับอาหารทำให้มีปริมาณอนุมูลอิสระ (free radicals) เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับอาหารที่ไม่ผ่านการฉายรังสี อนุมูลอิสระสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ เช่น กระบวนการปรุงอาหาร วิธีที่ใช้ในการถนอมอาหาร ได้แก่ การบด การให้ความร้อน การใช้รังสีอุลตราไวโอเลต การใช้คลื่นไมโครเวฟ การฉายรังสีอาหาร เป็นต้น อนุมูลอิสระจะก่อให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ในร่างกายและช่วยเสริมปฏิกิริยาเปอร์ออกซิเดชัน (peroxidation) และอาจเป็นสาเหตุก่อให้เกิดโรคมากมาย เช่น โรคหัวใจ โรคเบาหวาน โรคภูมิแพ้ การแก่ก่อนวัย และโรคมะเร็ง เป็นต้น แต่ปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะลดลงตามระยะเวลาในการเก็บรักษา (อรุณี, 2546)

การฉายรังสีอาหารในเชิงพาณิชย์และกึ่งอุตสาหกรรมได้กระทำกันใน 32 ประเทศจาก 40 กว่าประเทศที่มีกฎหมายอนุญาตให้ฉายรังสีได้ นอกจากนี้ โครงการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศของเอฟเอโอ/ดับบลิวเอชโอ (โคเด็กซ์) ซึ่งมีสมาชิกมากกว่า 150 ประเทศ ก็มีการประกาศรับรองมาตรฐานอาหารฉายรังสี ชนิดของอาหารที่ได้รับความนิยมนำมาฉายรังสีในประเทศต่างๆ

ถึง 26 ประเทศ ได้แก่ เครื่องเทศและเครื่องปรุงรส มีการฉายปีละกว่า 90,000 ตัน รองลงมาคือ มันฝรั่ง กระเทียม หอมหัวใหญ่ เนื้อสัตว์ อาหารทะเล ธัญพืชและผลไม้ (โกวิทย์, 2547)จาก ข้อมูลการฉายรังสีพริกของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติตั้งแต่ พ.ศ.2545 – 2547 พบว่ามีการนำพริก มาฉายรังสี 164,671.57 148,564.43 42,304.13 กิโลกรัม ตามลำดับ (ศูนย์ฉายรังสีอาหารและ ผลิตผลทางการเกษตร, 2547) จากข้อมูลการส่งออกและนำเข้าพริกของกรมศุลกากรตั้งแต่ พ.ศ. 2544 - 2547 พบว่าการส่งออกมีมูลค่า 104,505,645 บาท 106,154,888 บาท 110,653,415 บาท และ 126,171,945 บาท ตามลำดับ และข้อมูลนำเข้าตั้งแต่ พ.ศ. 2544 - 2547 มีมูลค่า 323,923,320 บาท 448,195,037 บาท 523,933,089 บาท และ559,384,640 บาท ตามลำดับ (กรมศุลกากร, 2547) ซึ่ง จากข้อมูลถือว่ามีการบริโภคพริกในปีหนึ่งๆเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการศึกษาปริมาณและการลดลง ของอนุมูลอิสระในพริกที่ผ่านการฉายรังสีเทียบกับระยะเวลาการเก็บรักษา โดยการใช้เครื่อง อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์(ESR) ในการตรวจหาปริมาณอนุมูลอิสระของพริกแห้งป่นที่ผ่านการ ฉายรังสีแกมมา และเปรียบเทียบปริมาณอนุมูลอิสระของพริกแห้งป่นที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาใน ปริมาณที่แตกต่างกัน และระยะเวลาการคงอยู่ของปริมาณอนุมูลอิสระของพริกแห้งป่นที่ผ่านการ ฉายรังสีแกมมาในปริมาณที่แตกต่างกันจะเป็นข้อมูลเชิงวิชาการในการเก็บรักษาพริกที่ผ่านการฉาย รังสี ก่อนวางขายในท้องตลาด หรือนำมาบริโภค เพื่อเป็นข้อมูลช่วยส่งเสริมการบริโภคผลิตภัณฑ์ อาหารฉายรังสี และลดความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดโรคต่างๆในผู้บริโภคได้ระดับหนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณอนุมูลอิสระของพริกแห้งป่นที่ฉายรังสีแกมมาในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์
2. ศึกษาระยะเวลาการคงอยู่ของปริมาณอนุมูลอิสระ ของพริกแห้งป่นฉายรังสีในปริมาณที่แตกต่างกัน

การตรวจเอกสาร

การฉายรังสีอาหาร

การฉายรังสีอาหาร (food irradiation) หมายถึง การนำอาหารที่บรรจุภาชนะหรือหีบห่อที่เหมาะสมไปผ่านการฉายรังสีแกมมา หรือรังสีเอกซ์ซึ่งเป็นรังสีประเภทคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรืออิเล็กตรอนซึ่งเป็นรังสีประเภทอนุภาคในปริมาณที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการฉายรังสี เช่น ยืดอายุการวางตลาดของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร ได้แก่ เนื้อสัตว์ ผักและผลไม้ เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านสุขอนามัยโดยใช้รังสีทำลายหรือควบคุม จุลินทรีย์และพยาธิที่ก่อให้เกิดโรค ได้แก่ เนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ อาหารทะเลและผลิตภัณฑ์ เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการทางด้านการค้าระหว่างประเทศว่าด้วยการกักกัน (quarantine) ได้แก่ ผลิตผลทางการเกษตร เพื่อลดการสูญเสียอาหารและผลิตผลทางการเกษตรภายหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่ ผักและผลไม้สด ถั่วต่างๆ ธัญพืช ผักแห้ง อาหารแห้ง อาหารจากเนื้อสัตว์ เครื่องปรุงรส เครื่องเทศ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเทคนิคของอาหารทำให้ได้ผลผลิตสูงขึ้น อาหารที่ผ่านการฉายรังสีแล้ว เรียกว่า อาหารฉายรังสี (irradiated food) หมายถึงอาหารที่ผ่านการฉายรังสีในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดสารกัมมันตรังสี (radioactive substance) หรือมีรังสีตกค้างแต่ประการใด (อรุณี, 2546; กองวิชาการสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2532)

การฉายรังสีโดยใช้ปริมาณรังสีต่ำไม่เกิน 1 กิโลเกรย์ สามารถยับยั้งการงอกของมันฝรั่ง หอมหัวใหญ่ กระเทียม และขิงเป็นต้น กำจัดแมลงในธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าวสาร และถั่วเขียว ผลิตภัณฑ์ประมงแห้ง เช่น ปลาเค็ม และ ปลารมควัน ผลิตภัณฑ์ธัญพืช เช่นแป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด รวมทั้งสามารถทำลายตัวอ่อนหรือดักแด้ของแมงวันผลไม้ที่ติดไปในผลไม้ต่างๆ เพื่อป้องกันการแพร่พันธุ์นอกจากนี้ การฉายรังสีปริมาณต่ำ สามารถทำลายพยาธิต่างๆ ในเนื้อสัตว์และทำให้ชะลอกระบวนการทางชีววิทยาภายในผักสดและผลไม้โดยช่วยยืดอายุการวางตลาดได้นานขึ้น เช่น ผักสดต่างๆ และชะลอการสุกของผลไม้บางชนิด เช่น กล้วย มะม่วง และมะละกอ เป็นต้น

การฉายรังสีโดยใช้ปริมาณรังสีปานกลางระหว่าง 1 -10 กิโลเกรย์ ทำให้ยืดอายุการเน่าเสียของอาหารและผลิตผลการเกษตร เช่น ปลาสด ผลสตรอเบอรี่ ทั้งนี้เนื่องจากรังสีจะเข้าไปทำลายจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดการเน่าเสีย ทำให้จำนวนจุลินทรีย์ดังกล่าวลดน้อยลง นอกจากนี้รังสียังสามารถ

ทำลายเชื้อโรคต่างๆ โดยเฉพาะเชื้อโรคที่เกี่ยวกับโรคท้องร่วง ทำให้อาหารและผลิตผลการเกษตรที่ผ่านการฉายรังสี สะอาดและปลอดภัยต่อการบริโภค เช่น อาหารทะเล และเนื้อสัตว์ทั้งสดและแช่แข็ง เป็นต้น การฉานรังสีด้วยรังสีด้วยปริมาณรังสีปานกลางยังมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณภาพอาหารหรือผลิตผลการเกษตร เช่น ผลองุ่นที่ผ่านการฉายรังสีสามารถคั้นน้ำออกมาได้มากกว่าปกติ เนื่องจากส่วนประกอบในเนื้อองุ่นเกิดการแตกตัว และในทำนองเดียวกัน อาหารจำพวกผักแห้งเมื่อผ่านกการฉายรังสีจะทำให้เส้นยุ่ย สามารถดูดน้ำกลับคืนสู่สภาพเดิมได้รวดเร็วจึงช่วยประหยัดเวลาในการปรุงอาหาร

การฉายรังสีโดยใช้ปริมาณรังสีสูง ระหว่าง 10 -50 กิโลเกรย์ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตอาหารและผลิตผลการเกษตรปลอดเชื้อและกึ่งปลอกเชื้อ โดยการฉายรังสีร่วมกับความร้อนสามารถผลิตอาหารปลอดเชื้อในทางอุตสาหกรรม เช่น อาหารสำเร็จรูป อาหารผู้ป่วย อาหารผู้ป่วยหรือการฉายรังสี เพื่อทำลายจุลินทรีย์ให้มีจำนวนลดลงในลักษณะกึ่งปลอดเชื้อ เช่น ในผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องเทศเอ็นไซม์ที่ใช้ในการผลิตยาและการปรุงอาหารที่ช่วยให้เนื้อเปื่อยเร็วขึ้น(โอภา และคณะ, 2549)

อนุมูลอิสระ

อนุมูลอิสระ (free radicals) หมายถึง อะตอมหรือโมเลกุลที่มีประจุไฟฟ้า มีอิเล็กตรอนขาดคู่อยู่ในวงโคจรนอกสุด ทำให้จะไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีมาก ใช้สัญลักษณ์แทนอนุมูลอิสระดังนี้ $A^{\cdot}$ ปฏิกิริยาทางเคมีของอนุมูลอิสระ 2 ตัว อาจรวมกันโดยเอาอิเล็กตรอนที่ขาดคู่มาเข้าคู่กัน การรวมตัวกันของอนุมูลอิสระเป็นไปได้ 2 ทาง คือ

1. การรวมตัวกันเกิดเป็นผลผลิตแบบเดิม ผลของการรวมตัวจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆในระบบนั้น

$$RH \longrightarrow R^{\cdot} + H^{\cdot} \longrightarrow RH$$

2. การรวมตัวกันกับอนุมูลอิสระตัวอื่นที่มีอยู่ในบริเวณนั้น ผลของการรวมตัวเกิดผลผลิตใหม่ๆ

$$R^{\cdot} + S^{\cdot} \longrightarrow RS$$

นอกจากอนุมูลอิสระจะรวมตัวกันเองแล้ว ยังสามารถรวมตัวกับโมเลกุลปกติทั่วๆไปได้ เช่น เข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับโมเลกุลของออกซิเจน เกิดเป็นเปอร์ออกซิลแรดิคอล

$$R^{\cdot} + O_2 \longrightarrow RO_2^{\cdot}$$

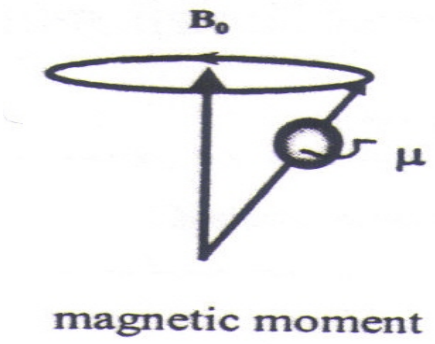
เปอร์ออกซิลแรดิคอล จะค่อนข้างเสถียร และมีอายุยาวกว่าอนุมูลอิสระทั่วไป เปอร์ออกซิลแรดิคอลจะไวต่อการเข้าทำปฏิกิริยาทางเคมีอีกมาก เปอร์ออกซิลแรดิคอลเพียง 1 โมเลกุลอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามมาอีกหลายชนิด (ดุสิตและวิโรจน์, 2536)

อนุมูลอิสระและโลหะทรานซิชันมีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก (Paramagnetism) อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของอนุมูลอิสระคือมีอิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่ โดยอิเล็กตรอนจะสปินหรือหมุนรอบตัวเองให้ค่า magnetic moment หากอิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่และหมุนสปินในทิศทางตรงกันข้ามจะไม่มีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติการเป็นแม่เหล็กนี้ในการตรวจวัดอนุมูลอิสระ จากสเปคตรัม ESR สามารถคำนวณในเชิงปริมาณได้ โดยใช้ความสูงของพีคหรือพื้นที่ (โอภาและคณะ, 2549)

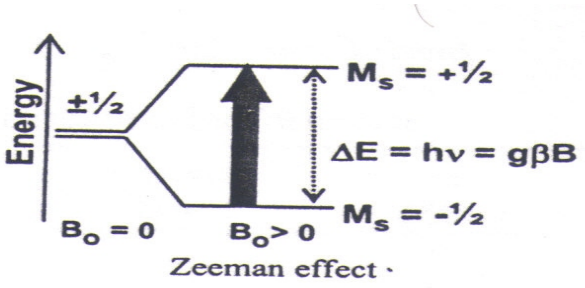
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดอนุมูลอิสระเรียก อี พี อาร์ หรือ อี เอส อาร์ (electron paramagnetic resonance, EPR หรือ electron spin resonance , ESR) นับเป็นเครื่องมือชนิดเดียวที่ใช้ตรวจหาอนุมูสอิสระโดยตรง เครื่อง ESR ตรวจหาสารที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กซึ่งอนุมูลอิสระมีอิเล็กตรอนทำให้มีคุณสมบัติแม่เหล็กจึงสามารถใช้เครื่อง ESR ตรวจวัดได้ ESR สเปกโตรสโคปีเป็นการตรวจวัดค่าพลังงานที่เกิดในปรากฏการณ์ซีแมน (Zeeman effect) ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนอยู่ในสนามแม่เหล็ก อิเล็กตรอนมีประจุลบเมื่อหมุนรอบตัวเองหรือสปินจะมีคุณสมบัติของแม่เหล็กมีค่า magnetic moment ทำตัวเหมือนแม่เหล็กที่เป็นเข็มชี้ในเข็มทิศที่วางตัวขนานกับสนามแม่เหล็กโลก

วิธีการตรวจวัดอิเล็กตรอนเดี่ยวโดยนำสารตัวอย่างไปไว้ในสนามแม่เหล็ก และให้แสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงไมโครเวฟผ่านสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนเดี่ยวจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ ณ ค่าความเข้มของสนาม แม่เหล็กค่าหนึ่งเฉพาะตัวตามคุณสมบัติของโครงสร้างทางเคมีของอนุมูลอิสระหรือโลหะทรานซิชั่นนั้นๆ เมื่อดูดกลืนพลังงานแล้วอิเล็กตรอนจะอยู่ในภาวะกระตุ้นหมุนกลับทิศทางเกิดเรโซแนนซ์เป็นสัญญาณที่ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเฉพาะตัวของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดและโลหะทรานซิชั่นแต่ละชนิดจะเรียกว่า ค่าจี (g value) ค่าจีของอิเล็กตรอนเดี่ยวตามลำพังจะมีค่าเกือบเท่ากับ 2 แต่ในโครงสร้างของอนุมูลอิสระต่างๆ จะประกอบด้วยอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของอะตอมต่างๆ ในโครงสร้าง ดังนั้นการหมุนของอิเล็กตรอนจะให้ค่า g แตกต่างจาก 2 โดยจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น อิเล็กตรอนอื่นๆ ของอะตอมและนิวเคลียส ซึ่งนิวเคลียสมีการหมุนสปินเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 1 Magnetic moment
ที่มา: โอภาและคณะ (2549)



ภาพที่ 2 Zeeman effect
ที่มา: โอภาและคณะ (2549)

ภาวะปกติอิเล็กตรอนที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก(B_o หรือ H_o) จะหมุนรอบตัวเองในทิศทางที่เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางเดียวและขนานกับสนามแม่เหล็ก B_o ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านในความถี่ไมโครเวฟ อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน ทำให้เปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในภาวะถูกกระตุ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจะแยกออกเป็น 2 ระดับพลังงาน อิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงจากการกระตุ้นจะเปลี่ยนการสปินโดยจะหมุนรอบตัวตรงกันข้ามกลับกันการหมุนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานระดับพื้น ซึ่งการหมุนรอบตัวในทิศทางตรงกันข้ามจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ขนานกับ B_o แต่มีทิศทางตรงกันข้าม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าปรากฏการณ์ Zeeman ในทฤษฎีควอนตัมพื้นฐานค่าพลังงานที่แตกต่างกัน ($\triangle E$) จะคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta E = hv = g \mu_b B_o$$

B_o หรือ H_o คือความเข้มของสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น Gauss (G) หรือ tesla(T) โดย1T มีค่าเท่ากับ 10^4 G

μ_B หรือ B_e คือ Bohr magneton constant มีค่าเท่ากับ 46.69 x 10^{-6} $cm^{-1}G^{-1}$ หรือ 9.2741 x 10 -21 $erg.Gauss^{-1}$

g, g-factor, g-value หรือ Zeeman splitting constant คือ ค่าคงที่ใกล้เคียง 2 ค่าจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอิเล็กตรอนและนิวเคลียสที่อยู่ใกล้เคียง ค่า g ของอิเล็กตรอนเดี่ยวโดยไม่มีนิวเคลียส (g_e) มีค่าเท่ากับ 2.0023

ตามหลักการแล้วจะให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเป็นค่าคงที่ และให้พลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ไมโครเวฟจากน้อยไปมาก เมื่อพลังงานมีความถี่ที่ตรงกับค่าเฉพาะตัวทางควอนตัมของอิเล็กตรอนนั้น ๆ อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนจากสภาพพื้นขึ้นไปอยู่ในภาวะถูกกระตุ้นมีพลังงานเพิ่มขึ้นทำให้การสปินของอิเล็กตรอนเปลี่ยนทิศทางการสปินไปในทางตรงกันข้ามกับการสปินเดิม เกิดเป็นสเปคตรัมของการดูดกลืนพลังงาน แต่ในทางเทคนิคเครื่อง ESR เพื่อให้สะดวกในการผลิต และให้ได้สเปคตรัมมีค่ารบกวนต่ำ การผลิตเครื่อง ESR จึงทำกลับกันคือ ให้พลังงานไมโครเวฟที่ความถี่คงที่ เช่น เครื่องโดยทั่วไปจะเรียกว่า X-band ESR จะให้พลังงานที่คลื่นความถี่ 9-10 GHz และปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ผ่านสารตัวอย่างที่จะตรวจวิเคราะห์เครื่อง ESR มีหลายชนิดแบ่งตามพลังงานจากคลื่นในย่าน

ไมโครเวฟที่ให้คงที่ โดยใช้ค่าความถี่ของคลื่นคงที่ดังแสดงในคอลัมน์ที่สองของตารางที่ 1 ชนิดของเครื่องจะแบ่งเป็นตามตัวอักษรในคอลัมน์แรก เครื่อง ESR ที่นิยมใช้ส่วนใหญ่จะเป็นชนิด X-band Q- band และ L- band

ตารางที่ 1 เครื่อง ESR แบ่งตามความถี่ของคลื่นที่ให้พลังงาน

Band – microwave	ความถี่ V(GHz)	ความยาว λ (cm)	B (Tesla)
L	1.5		0.535
S	3.0	10	0. 107
X	9.5	3.15	0.339
K	23	1.30	0.82
Q	35	0.86	1.25
W	95	0.315	3.3

$Hv = g\beta B$, $v=(g\beta /h)B =2.8024xB$ MHz

ที่มา: โอภาและคณะ (2549)

สเปคตรัมจากเครื่อง ESR เกิดจากการที่อิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่ปฏิสัมพันธ์หรือมีปฏิกิริยากับสิ่งแวดล้อม ต่างๆได้แก่

1. สนามแม่เหล็ก เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กการสปินของอิเล็กตรอนจะหมุนในทิศทางที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในทิศทางเดี่ยวและขนานกับสนามแม่เหล็ก และเมื่อให้พลังงานจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ซีแมน โดยอิเล็กตรอนเดี่ยวจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับพลังงาน มีการสปินตรงกันข้าม คือระดับกระตุ้นและระดับพื้น โดยอิเล็กตรอนที่ดูดกลืนพลังงานและเปลี่ยนทิศทางการสปินไปในทางตรงข้ามกับการสปินที่ระดับพื้น

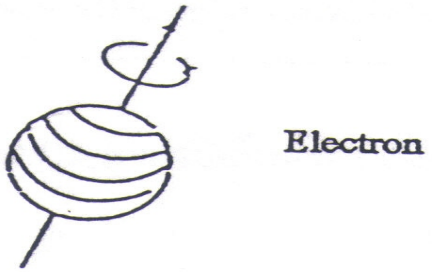
2. ปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนอื่นๆ วิ่งเป็นรอบวงออร์บิท และการสปินหมุนรอบตัวเอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าจี (g หรือ g – factor)

3. ปฏิกิริยาระหว่างการสปินของอิเล็กตรอนและการสปินของอิเล็กตรอนและการสปินของนิวเคลียส หรือปฏิกิริยาไฮเปอร์ไฟน์ (hfi) ทำให้เกิดการแยกออกสัญญาณ ESR

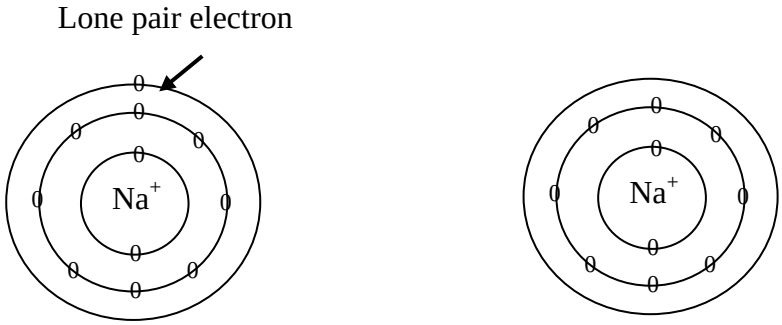
4. ปฏิบัติระหว่างการสปินของอิเล็กตรอนเดี่ยวไร้คู่กรณีที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่มากกว่าหนึ่งหรือค่าสปินออร์เปอเรเตอร์มีค่ามากกว่า $^{1}/2$ ($S > {}^{1}/2$)

อนุมูลอิสระซึ่งมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับอุบัติการณ์ของโรคต่างๆ อนุมูลอิสระจะไม่คงตัวมีความไวสูงจะไปทำปฏิกิริยากับชีวโมเลกุลเกิดเป็นอนุมูลที่มีความคงที่มีความคงตัวมากขึ้นสามารถตรวจวัดด้วยเครื่อง ESR แต่มีสัญญาณอ่อนและเป็นสัญญาณที่ broad การตรวจวัดจึงนิยมใช้เทคนิคสปินแทร็บและสัญญาณ ESR จะวัดเป็นค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กอยู่ในแกน X แกน Y เป็นค่าการดูดกลืนพลังงานจากแสง ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ค่าการดูดกลืนแสงในแกน Y จะใช้ first derivative แทนค่าการดูดกลืนแสง ซึ่งจะทำให้สัญญาณเป็นพีคที่แหลมและสามารถแยกพีคซ้อนกันให้เห็นชัดเจนขึ้น แต่จะทำให้ความสูงลดลง ค่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามแกน X จะมีหน่วยเป็น Guass (G) หรือ miliTesla (mT) (โอภา และคณะ, 2549)

อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ เกิดจากอิเล็กตรอนมีการหมุนรอบตัวเอง (ภาพที่ 3) การหมุนรอบตัวเองเช่นนี้ทำให้เกิดโมเมนต์แม่เหล็กขึ้นอาจแทนขนาดและทิศทางของโมเมนต์แม่เหล็กด้วยสัญลักษณ์เป็นลูกศรชี้ขึ้น ถ้าในวงโคจรหนึ่งมีอิเล็กตรอน 2 ตัว และมีสปินที่มีทิศทางตรงข้ามกัน อิเล็กตรอนตัวหนึ่งหมุนตามเข็มนาฬิกา และอีกตัวหนึ่งหมุนทวนเข็มนาฬิกา โมเมนต์แม่เหล็กก็จะหักล้างกันกลายเป็นศูนย์ ในวงโคจรที่มีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวเรียกอิเล็กตรอนตัวนี้ว่า อิเล็ก-ตรอนไร้คู่ (lone pair electron) และเรียกอะตอมหรือโมเลกุลที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ว่าอนุมูลอิสระ (free radical) (ภาพที่ 4) ต่อจากนั้นถ้าป้อนสนามแม่เหล็กเข้าสู่วัสดุที่มีอนุมูลอิสระ จะทำให้ระดับ-พลังงานของอิเล็กตรอนไร้คู่ถูกแยกออกเป็น 2 ระดับ เรียกว่า ปรากฏการณ์ซีแมน ขณะเดียวกันถ้ายิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานดังกล่าว อิเล็กตรอนไร้คู่เหล่านั้นจะดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี เรียกการดูดกลืนพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยอิเล็กตรอนไร้คู่เช่นนี้ว่า อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์



ภาพที่ 3 การเกิดสปินในอิเล็กตรอน ซึ่งเกิดจากการหมุนรอบตัวเองของอิเล็กตรอน
ที่มา : ดุสิตและวิโรจน์ (2536)



ภาพที่ 4 ตัวอย่างอะตอมที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ก) และที่ไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (ข)
ที่มา : ดุสิตและวิโรจน์ (2536)

ตัวอย่างอะตอมในภาพที่ 4 (ก) มีอิเล็กตรอนไร้คู่ วัสดุนี้จึงเกิดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้ แต่ในภาพที่ 4 (ข) ไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ จึงไม่เกิดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ดังนั้นวัสดุที่จะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้นั้น จึงต้องมีอิเล็กตรอนไร้คู่เสมอ

การวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ประสบผลสำเร็จเป็นครั้งแรกในค.ศ.1945โดยนักฟิสิกส์ชาวรัสเซียชื่อ Zaboisky โดยวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ใน Mn^{2+} และ Cu^{2+} หลังจากนั้นเป็นต้นมา อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์สมบัติและโครงสร้าง

ของวัสดุมากมายทั้งวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ ทั้งที่เป็นก๊าซ ของแข็ง และของเหลว การวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ เป็นประโยชน์ต่อวงการวัสดุศาสตร์ และยังเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์เป็นอย่างมากด้วย เช่น ช่วยวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดมะเร็งในร่างกาย โดยการวัดหาอนุมูลอิสระในเนื้อเยื่อหรือเม็ดเลือดจำพวก O_2^{---} , O^{---}, OOH , OH เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จาก ESR นั้น โดยทั่วไปจะใช้ยิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ส่วนมากคือคลื่นไมโครเวฟ:GHz กำลังประมาณ 1 mW) ที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่งเข้าสู่วัสดุและสแกน หรือเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก แล้วจึงวัดปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นสเปกตรัม ESR ในแนวแกนนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก และในแนวแกนตั้ง คือ ปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัติ นิยมพลอตกราฟในรูป differential curve ดังนั้นสเปกตรัม ESR แกนในแนวนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เช่น สแกน จาก 3000-3500 Gauss) และแกนในแนวตั้งคือปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัตินิยม plot กราฟในรูป differential curve จากSpectrum ESR เราได้ข้อมูลที่สำคัญๆ คือ

1. จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนไร้คู่ในวัสดุ

2. จากตำแหน่งของยอดcurveจะได้ค่า g ของวัสดุซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอนไร้คู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอม หรือ แรดดิคอล

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

4. จาก hyperfine structure (สเปกตรัมที่มี peakจำนวนมากๆ) จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าคืออะไร

ลักษณะเด่นของ ESR

การวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์กระทำได้ง่ายมาก เพียงแต่นำตัวอย่างชิ้นงานปริมาณไม่มากประมาณ 0.1 – 1 มิลลิลิตรบรรจุในหลอดทดลอง และใส่เข้าเครื่องวัดได้ทันที อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์มีสมบัติของวัสดุและลักษณะเด่นดังแสดงต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้วัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ต้องเป็นวัสดุที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ (lone pair - electron)

2. เป็นการตรวจวัดโดยไม่มีการทำลาย (non - destructivc) ปกติการวัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์จะมีการป้อนสนามแม่เหล็กระหว่าง 0.5 – 1 Tesla (1Tesla = 10,000 Gauss) เข้าสู่ชิ้นงานและป้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่าน Microwave (GHz) คลื่นเหล่านั้นไม่ทำลายชิ้นงาน และสามารถตรวจวัดวัสดุซ้ำ ๆ ได้

3. อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์มีความไวสูง (sensitivity) โดยหลักการแล้วมีความไวสูงกว่าเอ็นเอ็มอา (Nuclear Magnetic Resonance ; NMR) ถึงกว่า 700 เท่า ดังนั้นสามารถวัดอิเล็กตรอนไร้คู่ที่มีจำนวนเพียง 10^9 ตัวได้ด้วย และมีความไวสูงในการสปิน 10^{10-11} spin/10^{-4} Tesla

4. วัดได้ทั้งวัสดุชนิดของแข็ง ของเหลว ก๊าซ มีลักษณะเป็นก้อน และผง รวมทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

5. ขณะกำลังวัดสามารถ เปลี่ยนอุณหภูมิ ส่องแสงเข้าสู่วัสดุ ผสมวัสดุอื่นเข้าไปได้(ดุสิตและวิโรจน์, 2536)

ปริมาณสารตัวอย่างที่นำมาศึกษานั่นจะใช้ในปริมาณที่น้อย หลอดภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก (วัดเป็นมิลลิเมตร) ความสูงของสารตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในหลอดภาชนะไม่เกิน 2-3 ซม. หรือน้อยกว่า เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวสูงมากจึงต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้สารพาราแมกเนติกไปรบกวนสารตัวอย่าง ดังนั้น จึงนิยมใช้หลอดซิลิกาบรรจุสารตัวอย่างมากกว่าแก้ว (องค์ประกอบของแก้วมี Fe(III)อยู่ด้วย) ในทำนองเดียวกันจะต้องกำจัดอากาศออกจากหลอดภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างของแข็งที่เป็นผง และสารตัวอย่างที่เป็นสารละลายเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความกว้างของอีเอสอาร์สเปกตรัม สารตัวอย่างที่เป็นอนุมูลอิสระจะให้อีเอสอาร์สเปกตรัมที่แหลมคมและแคบ แต่สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแทรนซิชันไม่จำเป็นต้องกำจัดอากาศ เนื่องจากอีเอสอาร์สเปกตรัมของสารดังกล่าวโดยทั่วๆ ไปจะมีความกว้างของพีคซึ่งเป็นผลมาจากการผ่อนคลายระหว่างสปิน ของอิเล็กตรอน (spin-spin relaxation) สารละลายตัวอย่างที่เจือจางเข้มข้นประมาณ 5 mmol/dm^3 หรือน้อยกว่าจะให้พีคที่คมชัดและแคบ สารอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่า g ของสารตัวอย่าง คือ อนุมูลอิสระ

1,1 –Diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH) ที่มีค่า g เท่ากับ 2.0036 และ pitch มี g เท่ากับ 2.0028 ดังนั้นการบันทึกอีเอสอาร์สเปกตรัมจะมีอีเอสอาร์สเปกตรัมของสารอ้างอิงด้วย ถ้าสัญญาณ (ESR-spectrum) อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าของสารอ้างอิง ค่า g จะมากกกว่า 2.0036 หรือมากกว่า 2.0028 ค่า g ที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ได้จะวัดที่เกิดเรโซแนนซ์ (นิพนธ์และคณิตา ,2547)

วัสดุที่ใช้วัด อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ได้

วัสดุที่จะใช้วัดอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้นั้นต้องมีอิเล็กตรอนไร้คู่ และปรากฏการณ์อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์นี้ สามารถนำไปใช้ตรวจวัด เพื่อหาว่าในวัสดุมีอนุมูลอิสระหรือมีอิเล็กตรอนไร้คู่หรือไม่ ถ้ามีจะมีจำนวนมากน้อยเท่าไร และจากรูปร่างของสเปกตรัมของอิเล็ก-ตรอนสปินเรโซแนนซ์ก็สามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลได้หลายอย่าง เช่น หาโครงสร้างของโมเลกุล ตรวจหาความเร็วของปฏิกิริยา กลไกของปฏิกิริยาต่างๆ เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุที่จะวัดอิเล็ก-ตรอนสปินเรโซแนนซ์ได้นั้น อาจจะไม่ได้มีอิเล็กตรอนไร้คู่ตั้งแต่เริ่มแรก แต่อาจใช้วิธีการทางฟิสิกส์ หรือ เคมี เพิ่มเข้าไปเพื่อให้เกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ขึ้นมาก็ได้ ทั้งนี้อาจจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาค้นคว้าดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างหรือปฏิกิริยาของวัสดุก็ได้ด้วยดังนั้นวัสดุที่ใช้วัด ESR ได้ คือ 1) เป็นวัสดุที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่อยู่ตั้งแต่แรก

2) เป็นวัสดุที่เริ่มแรกไม่มีอิเล็กตรอนไร้คู่ แต่ต่อมาถูกทำให้เกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ด้วยวิธีทางฟิสิกส์ หรือเคมี (ดุสิตและวิโรจน์, 2536)

ค่าจี (g - factor หรือ electronic splitting factor) เนื่องจากอนุมูลอิสระหรืออิเล็กตรอนไร้คู่ส่วนใหญ่ไม่ได้อยู่ตามลำพังแต่อยู่เป็นอะตอมหรือโมเลกุล ดังนั้นอิเล็กตรอนไร้คู่จะหมุนหรือสปินทั้งรอบตัวเองและหมุนรอบนิวเคลียสเป็นวงออร์บิทพร้อมกัน การหมุนของอิเล็กตรอนไร้คู่เป็นวงออร์บิทรอบนิวเคลียสทำให้สนามแม่เหล็กภายในเกิดขึ้นนอกเหนือจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสปินรอบตัวเอง ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองกลไกมีทั้งไปต้านกันหรือไปเสริมกัน มีผลทำให้ค่าจีจากการสปินรอบตัวเองซึ่งสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสองกลไกมีทั้งไปต้านกันหรือไปเสริมกัน มีผลทำให้ค่าจีจากอิเล็กตรอนไร้คู่ของอะตอมหรือโมเลกุลจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า 2 ค่าจีของอิเล็กตรอนไร้คู่ที่อยู่ตามลำพัง ซึ่งค่าจีของอิเล็กตรอนไร้คู่ที่อยู่ตามลำพังมีค่าเท่ากับ 2.0023 ดังนั้นการหมุนของอิเล็กตรอนเป็นวงออร์บิทรอบนิวเคลียสมีผลทำให้ค่าจีเปลี่ยนไป เปรียบได้กับค่า

chemical shift ใน NMR ดังนั้น ค่าจีจึงเป็นค่าเฉพาะตามโครงสร้างทางเคมี ค่าจีของอะตอมที่มีนำหนักโมเลกุลต่ำ และโลหะทรานซิชันในแถวที่ 1 ของตารางธาตุที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่จำนวน 1 อิเล็กตรอนจะมีค่าจีใกล้เคียง 2 ส่วน อะตอมที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือโมเลกุลและอะตอมที่มีอิเล็กตรอนไร้คู่มากกกว่า 1 อิเล็กตรอน จะมีค่าจีต่างจาก 2 (นิพนธ์และคณิตา,2547)

การใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ในการตรวจหาปริมาณอนุมูลอิสระ ในอาหารที่ได้รับการฉายรังสี

Desrosiers and McLaughlin (1989) ใช้วิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ตรวจผลของการฉายรังสีแกมมากับผักและผลไม้ โดยใช้เมล็ดพืช เมล็ดของผลไม้ เปลือกของผลไม้ ได้สเปกตรัมของอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ที่แตกต่างกันระหว่างการฉายรังสีและไม่ได้ฉายรังสี รวมถึงความเข้มของสเปกตรัมของผัก และผลไม้ที่ทำการทดลอง

Dodd and Swallow (1989) ฉายรังสี ปู กบ ห่าน เป็ด ไก่ ไก่งวง เนื้อวัว กุ้งนาง และหอย-สองฝา แล้วทำการวัดผลที่เกิดขึ้น พบว่า อิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ สามารถวัดปริมาณอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นกับอาหารที่ผ่านการฉายรังสี

H.Murrieta *et al*. (1996) ทำการทดลองศึกษาปริมาณรังสี ระยะเวลาการเก็บรักษาและอุณหภูมิที่มีต่อ ESR signal ของข้าวโอ๊ต ข้าวโพด และข้าวสาลีที่ฉายรังสี ด้วยวิธีอิเล็คตรอนสปินเรโซแนนซ์ พบว่าความเข้มของอิเลคตรอนสปินเรโซแนนซ์ แปรผันตรงกับปริมาณการดูดกลืนรังสีในช่วง 10 – 50 กิโลเกรย์ และอัตราการลดลงของอนุมูลอิสระเป็นฟังก์ชันของระยะเวลา

กำพล (2540) ประยุกต์ใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ ในการตรวจพิสูจน์ธัญพืช-บางชนิดที่ฉายรังสีแกมมา พบว่า ธัญพืชที่มีลักษณะแห้ง มีปริมาณอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นมากที่สุดในวันแรกหลังการฉายรังสี และลดปริมาณลงเรื่อยๆเมื่อผ่านไปจนถึงประมาณ 30 วันก็จะใกล้เคียงกับค่าปกติ การใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ จะได้ผลดีกับธัญพืชที่มีลักษณะแห้งและนำมาตรวจวัดภายใน 30 วัน หลังฉายรังสี

ธนาวิทย์ (2543) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในธัญพืช เครื่องเทศและสมุนไพร-บางชนิด (ข้าว ถั่วเขียว พริกไทยขาวเม็ด พริกไทยขาวป่น และชาเขียว) ที่ฉายรังสีแกมมา เมื่อนำมาตรวจด้วยอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโตรเมตรี พบว่าปริมาณอนุมูลอิสระในเครื่องเทศและสมุนไพรบางชนิด ที่ฉายรังสีสูงกว่าเครื่องเทศและสมุนไพรที่ไม่ฉายรังสี ตลอดช่วงเวลา 58 วัน ปริมาณอนุมูลอิสระสูงมากในวันแรกหลังฉายรังสีจากนั้นจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล หลัง 15 วัน ปริมาณอนุมูลอิสระจะลดช้าลงจนเริ่มคงที่

ศิริวัฒนา และสุมิตรา (2547) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในถั่วเหลือง ถั่วแดง ลูก-เดือย และเม็ดบัวที่ฉายรังสี ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ พบว่า ปริมาณอนุมูลอิสระแปรผันตรงกับปริมาณรังสี ปริมาณอนุมูลอิสระสูงสุดหลังจากฉายรังสีเสร็จสิ้น และจะลดลงแบบเอกซ์-โพเนนเชียลภายใน 15 วัน ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนถึงวันที่ 6 หลังจากนั้น จะเริ่มคงที่

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. พริกแห้งป่น (จาก บริษัท เอ็น เอส ที ฟู้ด อินกรีเดียนท์ จำกัด)
2. เครื่องชั่งน้ำหนัก
3. เครื่องกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 รุ่น Gamma Cell 220 ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
4. หลอดแก้วควอตซ์พร้อมจุกปิด
5. Dosimeter (Gamma chrome ,Red Perspex)
6. เครื่องวัดอนุมูลอิสระ Electron spin resonance spectrometry รุ่น Bruker A300 Research ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ภาพผนวกที่ 1 และ 2)

วิธีการ

1. นำพริกป่นจากบริษัท เอ็น เอส ที ฟู้ด อินกรีเดียนท์ จำกัด มาบรรจุถุงพลาสติกเพื่อเตรียมฉายรังสี น้ำหนักของแต่ละถุงระหว่าง 2.005-1.995 กรัม ทั้งหมด 234 ถุง ดังภาพที่ 5

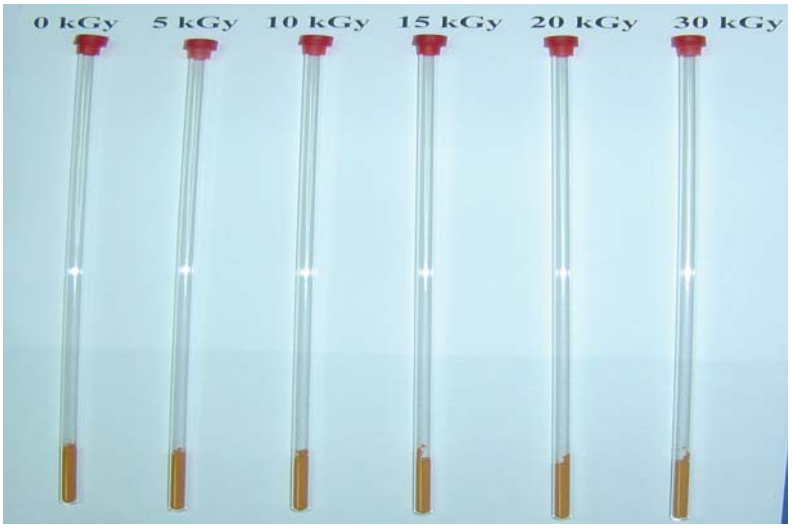
ภาพที่ 5 แสดงถุงพลาสติกบรรจุพริกเพื่อเตรียมฉายรังสี

2. นำพริกที่เตรียมไปทำการฉายรังสีแกมมา ด้วยเครื่องกำเนิดรังสีแกมมา Co-60 ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ใช้แผนการทดลองแบบ Split-plot design ที่จัด main units(พริกป่น 13 ถุงน้ำหนักถุงละประมาณ 1.995-2.005 กรัม) แบบ RCBD (Randomized complete block design) ที่มี 3 blocks โดยมีปัจจัยด้านปริมาณรังสี(A) 6 ระดับ เป็น main unit treatmentsได้แก่

ระดับที่ 1 ไม่ฉายรังสี (control)
ระดับที่ 2 ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์
ระดับที่ 3 ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์
ระดับที่ 4 ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์
ระดับที่ 5 ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์
ระดับที่ 6 ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์

และปัจจัยด้านระยะเวลาภายหลังการฉายรังสี (B) มี 13 ระยะ คือ 1 2 3 4 5 6 11 16 21 31 41 51 และ 61 วัน หลังจากการฉายรังสี เป็น sub unit treatments โดยพริกป่นแต่ละถุงเป็น sub unit (อนันต์ชัย,2542) โดยใช้ Gamma chrome, Red Perspex เป็น Dosimeter

3. ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระ โดยนำพริกป่นจากถุงมาบรรจุในหลอดแก้วควอตซ์เบอร์ 4โดยน้ำหนักพริก 4995-5005 มิลลิกรัม แล้วปิดจุก ดังภาพที่ 6 นำไปวัดปริมาณอนุมูลอิสระโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ตามระยะเวลาที่กำหนด



ภาพที่ 6 แสดงหลอดแก้วควอตซ์บรรจุพริกเพื่อเตรียมวัดปริมาณอนุมูลอิสระโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

4. บันทึกผลของปริมาณอนุมูลอิสระที่อ่านได้ โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ตามระยะเวลาที่กำหนด ในการบันทึกผลปริมาณอนุมูลอิสระจะมากตามปริมาณของตัวอย่างในหลอดแก้วควอตซ์น้ำหนักระหว่าง 4995-5005 มิลลิกรัม จึงปรับค่า ESR Intensity ให้มีค่าเป็น ESR Intensity/mg. ของตัวอย่าง

5. ข้อมูลปริมาณอนุมูลอิสระที่บันทึกได้ นำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน(Analysis of variance) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ด้วยวิธี Fisher’s least significant difference(LSD)

ผลและวิจารณ์

ผล

สารตัวอย่างที่ใช้ในเทคนิคอีเอสอาร์สเปกโทรสโกปีนั่นอาจเป็นของแข็ง ของเหลว สารละลาย และแก๊ส ปริมาณสารตัวอย่างที่นำมาศึกษานั่นจะใช้ในปริมาณที่น้อย หลอดภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก (วัดเป็นมิลลิเมตร) ความสูงของสารตัวอย่างที่บรรจุอยู่ในหลอดภาชนะไม่เกิน 2-3 ซม. หรือน้อยกว่า เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความไวสูงมากจึงต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้สารพาราแมกเนติกไปรบกวนสารตัวอย่าง ดังนั้น จึงนิยมใช้หลอดซิลิกาบรรจุสารตัวอย่างมากกว่าแก้ว (องค์ประกอบของแก้วมี Fe(III)อยู่ด้วย) ในทำนองเดียวกันจะต้องกำจัดอากาศออกจากหลอดภาชนะที่บรรจุสารตัวอย่างของแข็งที่เป็นผง และสารตัวอย่างที่เป็นสารละลายเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความกว้างของอีเอสอาร์สเปกตรัม สารตัวอย่างที่เป็นอนุมูลอิสระจะให้อีเอสอาร์สเปกตรัมที่แหลมคมและแคบ แต่สำหรับสารตัวอย่างที่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะแทรนซิชันไม่จำเป็นต้องกำจัดอากาศ เนื่องจากอีเอสอาร์สเปกตรัมของสารดังกล่าวโดยทั่วๆ ไปจะมีความกว้างของพีคซึ่งเป็นผลมาจากการผ่อนคลายระหว่างสปิน ของอิเล็กตรอน (spin-spin relaxation) สารละลายตัวอย่างที่เจือจางเข้มเข้นประมาณ 5 mmol/dm^3 หรือน้อยกว่าจะให้พีคที่คมชัดและแคบ สารอ้างอิงที่ใช้ในการหาค่า g ของสารตัวอย่างคืออนุมูอิสระ 1,1 –Diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH) ที่มีค่า g เท่ากับ 2.0036 และ pitch มี g เท่ากับ 2.0028 ดังนั้นการบันทึกอีเอสอาร์สเปกครัมจะมีอีเอสอาร์สเปกตรัมของสารอ้างอิงด้วย ถ้าสัญญาณ (ESR-spectrum) อยู่ในตำแหน่งที่ต่ำกว่าของสารอ้างอิง ค่า g จะมากกกว่า 2.0036 หรือมากกว่า 2.0028 ค่า g ที่คำนวณจากสเปกตรัมที่ได้จะวัดที่เกิดเรโซแนนซ์ (นิพนธ์และคณิตา,2547)

ข้อมูลที่ได้จาก ESR นั้นโดยทั่วไปจะใช้ยิงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ส่วนมาก คือ คลื่นไมโครเวฟ : GHz กำลังประมาณ 1 mW) ที่มีความถี่คงที่ค่าหนึ่งเข้าสู่วัสดุและสแกนหรือเปลี่ยนค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เช่น สแกน จาก 3420 – 3580 Gauss) แล้วจึงวัดปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นสเปกตรัม ESR ในแนวแกนนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก และในแนวแกนตั้งคือ ปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัติ นิยมพลอตกราฟในรูป differential curve จาก Spectrum ESR เราได้ข้อมูลที่สำคัญๆ คือ

1. จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนไร้คู่ในวัสดุ

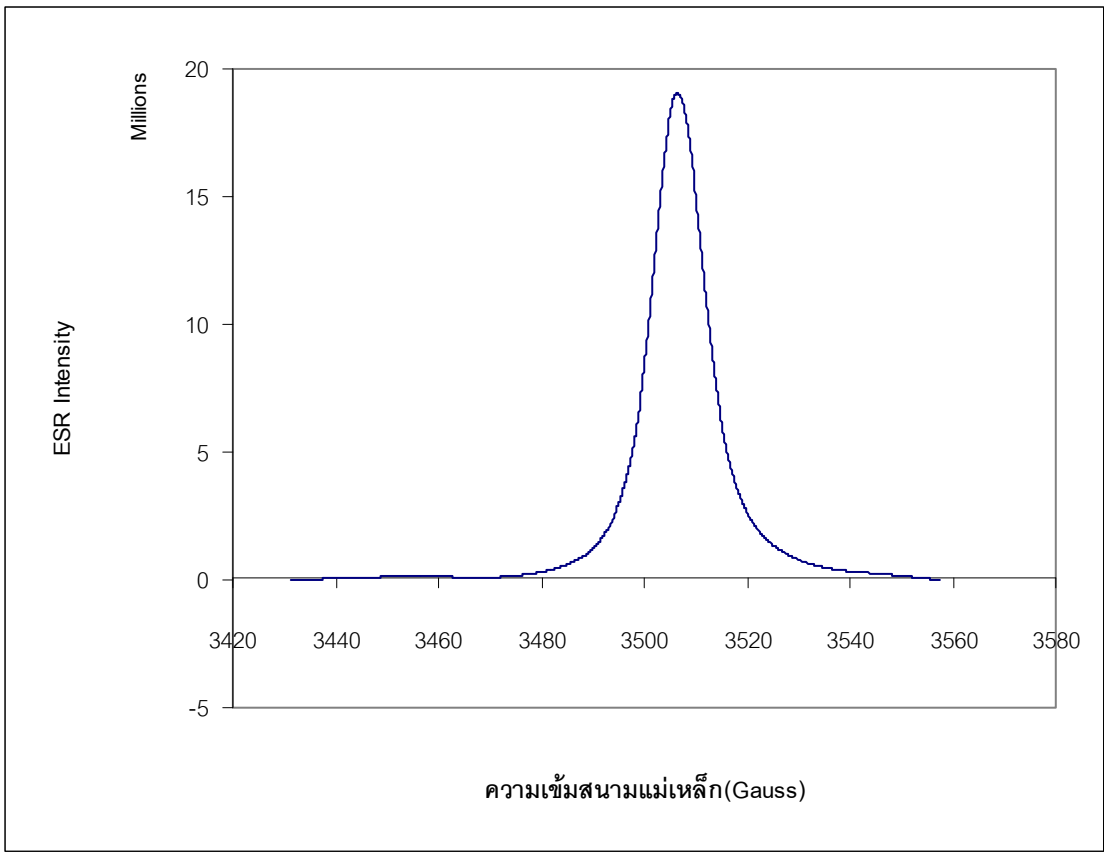
2. จากตำแหน่งของยอดcurveจะได้ค่า g ของวัสดุซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอนไร้คู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอม หรือ แรดิคอล

3. จากค่า Line width จะได้ข้อมูลเกี่ยวกับ interaction ของ spin ข้างเคียง ตลอดจนระยะห่างของ spin แต่ละตัว

4. จาก hyperfine structure (สเปกตรัมที่มี peak จำนวนมากๆ) จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าคืออะไร (ดุสิตและวิโรจน์, 2536)

จากสเปคตรัม ESR สามารถคำนวณในเชิงปริมาณได้ โดยใช้ความสูงของพีค หรือ พื้นที่ และในการบันทึกผลปริมาณอนุมูลอิสระจะมากตามปริมาณของตัวอย่าง ในหลอดแก้วควอตซ์พริกมีน้ำหนักระหว่าง 4995-5005 มิลลิกรัม จึงปรับค่า ESR Intensity ให้มีค่าเป็น ESR Intensity/mg. ของตัวอย่าง (โอภาและคณะ, 2549)

การตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในพริกป่นหลังจากฉายรังสี โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ จะสแกนในช่วงความเข้มของสนามแม่เหล็ก 3420 – 3580 Gauss โดยหาช่วงความเข้มสนามแม่เหล็กโดยใช้ซอฟแวร์ในการสแกนในแนวแกน Y จะได้ค่า ESR Intensity ซึ่งจะเป็นปริมาณที่บ่งชี้ถึงปริมาณอนุมูลอิสระที่มีในพริกแห้งป่นฉายรังสี ผลการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในพริกป่นหลังจากฉายรังสี โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ จะได้ลักษณะของ ESR Spectrum ดังภาพที่ 7 และ ภาพผนวกที่ 9-14



ภาพที่ 7 แสดง ESR Spectrum ของพริกป่นที่อ่านได้โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์

ผลการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในพริกป่นหลังจากฉายรังสีที่ปริมาณ 0 5 10 15 20 และ 30 กิโลเกรย์ โดยเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ในระยะเวลาภายหลังการฉายรังสี มี 13 ระยะ คือ 1 2 3 4 5 6 11 16 21 31 41 51 และ 61 วัน ได้ข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดง ESR Intensity/mg. ของพริกแห้งป่นฉายรังสีที่ระดับ 0 5 10 15 20 และ 30 กิโลเกรย์ ในระยะเวลาภายหลังการฉายรังสี คือ 1 2 3 4 5 6 11 16 21 31 41 51 และ 61 วัน

เวลาหลังฉายรังสี (วัน)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)					
	0 (Control)	5	10	15	20	30
1	14,383,269	319,913,006	350,091,592	411,560,768	502,403,015	597,108,752
2	15,467,011	248,065,785	282,021,607	338,654,562	380,120,467	477,330,224
3	13,665,248	318,826,821	248,216,724	321,469,895	352,791,177	434,522,616
4	19,899,376	197,882,903	278,790,777	374,191,128	391,317,772	475,968,818
5	18,319,319	170,044,189	238,794,126	300,408,009	342,179,571	369,022,278
6	18,107,696	153,179,433	231,602,645	280,548,619	305,027,495	336,360,672
11	17,547,817	63,617,624	134,950,487	146,051,316	152,432,166	185,497,490
16	15,026,960	49,870,343	38,080,450	72,298,227	68,516,213	58,087,031
21	13,006,636	37,336,563	46,157,730	49,807,833	47,540,383	48,396,189
31	9,248,199	21,486,422	23,398,749	18,131,571	30,756,359	31,533,029
41	7,138,020	13,083,025	19,485,559	21,528,044	20,182,567	20,280,015
51	3,323,616	11,572,010	12,476,299	13,693,570	13,523,317	14,495,633
61	3,594,279	12,628,683	10,318,134	12,015,766	12,137,834	13,383,226

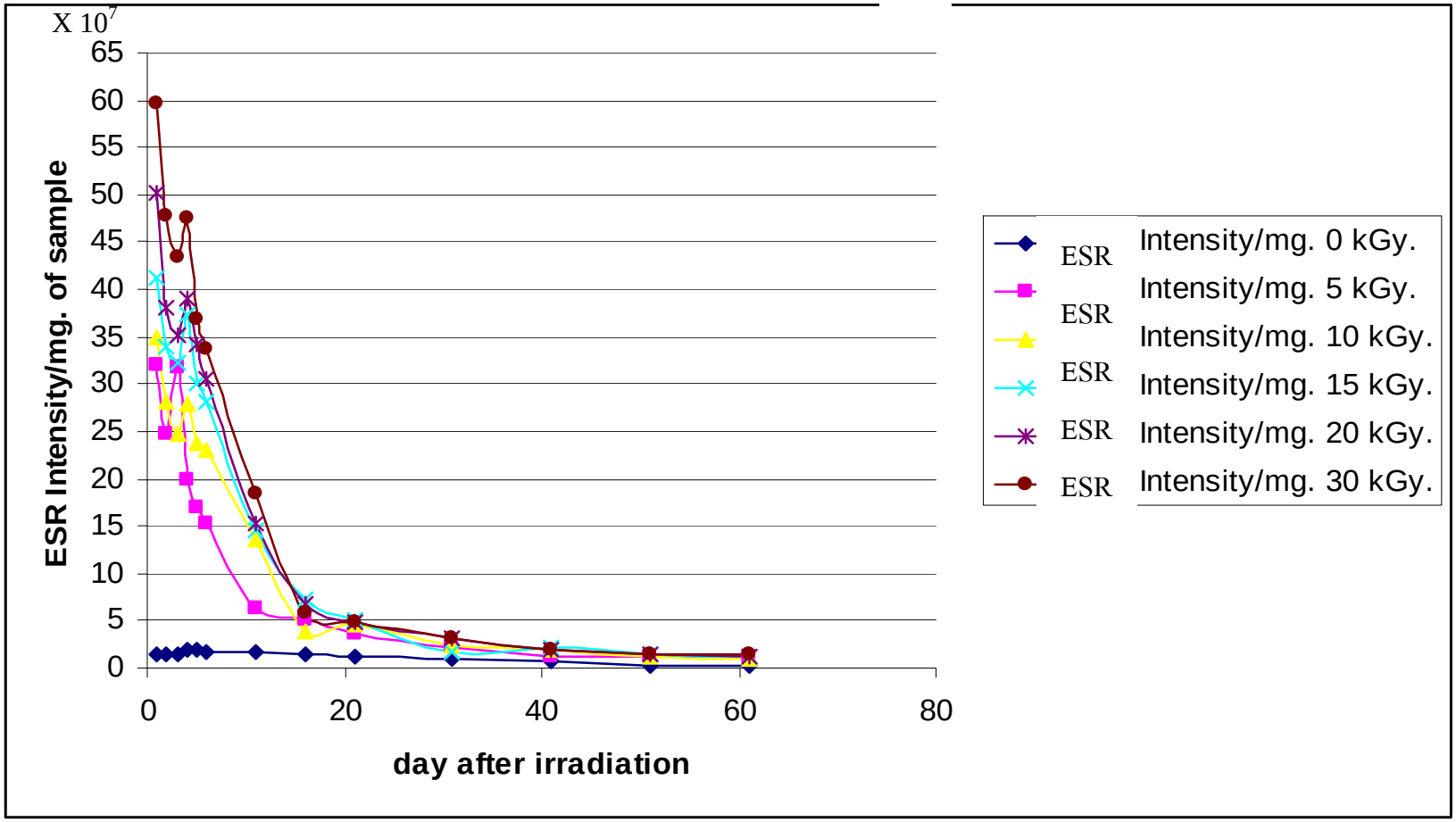
ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า การใช้ปริมาณรังสีที่แตกต่างกันจะทำให้มีปริมาณอนุมูลอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง($p<0.01$) ระยะเวลาภายหลังการฉายรังสีที่แตกต่างกันจะทำให้มีปริมาณอนุมูลอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p<0.01$) อิทธิพลร่วมหรือ ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างปริมาณรังสีที่ใช้กับระยะเวลาภายหลังการฉายรังสีมีอิทธิพลต่อปริมาณอนุมูลอิสระอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($p<0.01$) ตารางผนวกที่ 1

จากการทดลองพบว่า ESR Signal Intensity ในพริกที่ไม่ได้ผ่านการฉายรังสีจะลดลงเรื่อยๆ ในพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์ พบว่าในวันที่หนึ่งหลังจากฉายรังสีมี ESR Signal Intensity มากกว่าพริกที่ไม่ฉายรังสีถึง 22 เท่าและค่อยๆจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี ในพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์ พบว่าในวันที่หนึ่งหลังจากฉายรังสีมี ESR Signal Intensity มากกว่าพริกที่ไม่ฉายรังสีถึง 24 เท่าและค่อยๆจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ 0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี ในพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์ พบว่าในวันที่หนึ่งหลังจากฉายรังสีมี ESR Signal Intensity มากกว่าพริกที่ไม่ฉายรังสีถึง 28 เท่าและค่อยๆจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ 0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี ในพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์พบว่าในวันที่หนึ่งหลังจากฉายรังสีมี ESR Signal Intensity มากกว่าพริกที่ไม่ฉายรังสีถึง 34 เท่าและค่อยๆจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ 0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี ในพริกที่ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์ พบว่าในวันที่หนึ่งหลังจากฉายรังสีมี ESR Signal Intensity มากกว่าพริกที่ไม่ฉายรังสีถึง 42 เท่าและค่อยๆจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลแล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ 0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี ดังตารางที่ 2 และจากการทดสอบทางสถิติในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ด้วยวิธี Fisher's least significant difference (LSD) ดังตารางที่ 3 ปริมาณ ESR Signal Intensity จะมากตามปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยปริมาณรังสีที่มี ESR Signal Intensity มากที่สุดในวันที่หนึ่งหลังฉายรังสีคือ ปริมาณรังสี 30 กิโลเกรย์ ลำดับต่อมาคือ ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์ ลำดับต่อมาคือESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์ ลำดับต่อมาคือESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์ ลำดับต่อมาคือESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์ ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 ลักษณะการลดลงดังภาพที่ 8 และภาพผนวกที่ 3-8 และจากการทดสอบทางสถิติในตารางผนวกที่ 1

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทรีทเมนต์ด้วยวิธี Fisher's least significant difference (LSD)

เวลาหลังฉายรังสี (วัน)	ปริมาณรังสี (กิโลเกรย์)					
	0 (Control)	5	10	15	20	30
1	14,383,269[a]	319,913,006[a]	350,091,592[a]	411,560,768[a]	502,403,015[a]	597,108,752[a]
2	15,467,011[a]	248,065,785[a b]	282,021,607[a b]	338,654,562[a b]	380,120,467[b]	477,330,224[b]
3	13,665,248[a]	318,826,821[a b]	248,216,724[a b]	321,469,895[a b]	352,791,177[bc]	434,522,616[bc]
4	19,899,376[a]	197,882,903[b]	278,790,777[a b]	374,191,128[a b]	391,317,772[bc]	475,968,818[bc]
5	18,319,319[a]	170,044,189[b]	238,794,126[b]	300,408,009[b]	342,179,571[bc]	369,022,278[c]
6	18,107,696[a]	153,179,433[bc]	231,602,645[bc]	280,548,619[b]	305,027,495[c]	336,360,672[c]
11	17,547,817[a]	63,617,624[cd]	134,950,487[cd]	146,051,316[c]	152,432,166[d]	185,497,490[d]
16	15,026,960[a]	49,870,343[d]	38,080,450[de]	72,298,227[cd]	68,516,213[de]	58,087,031[e]
21	13,006,636[a]	37,336,563[d]	46,157,730[de]	49,807,833[cd]	47,540,383[e]	48,396,189[e]
31	9,248,199[a]	21,486,422[d]	23,398,749[e]	18,131,571[d]	30,756,359[e]	31,533,029[e]
41	7,138,020[a]	13,083,025[d]	19,485,559[e]	21,528,044[d]	20,182,567[e]	20,280,015[e]
51	3,323,616[a]	11,572,010[d]	12,476,299[e]	13,693,570[d]	13,523,317[e]	14,495,633[e]
61	3,594,279[a]	12,628,683[d]	10,318,134[e]	12,015,766[d]	12,137,834[e]	13,383,226[e]

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรร่วมกันในสดมภ์หมายถึงไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01(LSD = 102,943,495)



ภาพที่ 8 แสดง ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสีปริมาณต่างๆในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี

วิจารณ์

สเปกตรัม ESR ในแนวแกนนอน คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก และในแนวแกนตั้ง คือ ปริมาณการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัติ นิยมพลอตกราฟในรูป differential curve ดังนั้นสเปกตรัม ESR แกนในแนวนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็ก (เช่น สแกน จาก 3000-3500 Gauss) และแกนในแนวตั้งคือปริมาณการดูดกลืนไมโครเวฟ แต่ในทางปฏิบัตินิยม plot กราฟในรูป differential curve จากSpectrum ESR เราได้ข้อมูล คือ

1. จากพื้นที่ใต้ curve จะได้จำนวนของอิเล็กตรอนไร้คู่ในวัสดุ

2. จากตำแหน่งของยอดcurveจะได้ค่า g ของวัสดุซึ่งค่า g นี้จะบอกแหล่งที่มาว่าอิเล็กตรอนไร้คู่นั้นอยู่ที่ส่วนใดในอะตอม หรือ แรดดิคอล

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

4. จาก hyperfine structure (สเปกตรัมที่มี peakจำนวนมากๆ) จะได้ข้อมูลชนิดของธาตุหรืออะตอมที่อยู่ข้างเคียงว่าคืออะไร

การคำนวณจำนวนของแขนขาด (spin density) ตามปกติสัญญาณหรือสเปกตรัมของESR นั้น แกนในแนวนอนคือความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ป้อนจากภายนอก และแกนในแนวตั้งคือความเข้มของการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งปกติจะแสดงผลออกมาในรูปของการถูกทำ differentiate ด้วยสนามแม่เหล็กแล้วหนึ่งครั้ง ดังนั้นการหาจำนวนของแขนขาดคือ spin density (ตัว / ซม^3)จึงทำได้โดยการ integrate สัญญาณ ESR 2 ครั้งในทางปฏิบัติในการหาค่า spin density ของ sample ที่ถูกต้องแน่นอน (absolute value) จะต้องเปรียบเทียบผลการวัดกับวัสดุที่เคยรู้คุณค่าแน่นอนมาก่อน (วัสดุอ้างอิง) วัสดุอ้างอิงที่นิยมใช้มากที่สุดคือ DPPH (Diphenyl Picryl Hydrazyl) มีลักษณะเป็นผงสีดำ ใน DPPH 1 โมเลกุลมีแขนขาดหรือสปิน 1 ตัว(ดุสิตและวิโรจน์, 2536)

ปริมาณอนุมูลอิสระจะเพิ่มมากขึ้นตามระดับของการฉายรังสีแกมมา เป็นไปตาม กำพล (2540) ประยุกต์ใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ ในการตรวจพิสูจน์ธัญพืชบางชนิดที่ฉายรังสี

แกมมา พบว่า ธัญพืชที่มีลักษณะแห้ง มีปริมาณอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นมากที่สุดในวันแรกหลังการฉายรังสี ธนาวิทย์ (2543) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในธัญพืช เครื่องเทศและสมุนไพร บางชนิด (ข้าว ถั่วเขียว พริกไทยขาวเม็ด พริกไทยขาวป่น และชาเขียว) ที่ฉายรังสีแกมมา เมื่อนำมาตรวจด้วยอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโตรเมตรี พบว่าปริมาณอนุมูลอิสระในเครื่องเทศและสมุนไพรบางชนิดที่ฉายรังสีสูงกว่าเครื่องเทศและสมุนไพรที่ไม่ฉายรังสี ศิริวัฒนา และสุมิตรา (2547) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในถั่วเหลือง ถั่วแดง ลูกเดือย และเม็ดบัวที่ฉายรังสี ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ พบว่า ปริมาณอนุมูลอิสระแปรผันตรงกับปริมาณรังสี

ปริมาณอนุมูลิสระมากที่สุดในระยะเวลาหนึ่งวันหลังฉายรังสี เป็นไปตาม กำพล (2540) ประยุกต์ใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ ในการตรวจพิสูจน์ธัญพืชบางชนิดที่ฉายรังสีแกมมา พบว่า ธัญพืชที่มีลักษณะแห้ง มีปริมาณอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นมากที่สุดในวันแรกหลังการฉายรังสี ธนาวิทย์ (2543) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในธัญพืช เครื่องเทศและสมุนไพร บางชนิด (ข้าว ถั่วเขียว พริกไทยขาวเม็ด พริกไทยขาวป่น และชาเขียว) ที่ฉายรังสีแกมมา เมื่อนำมาตรวจด้วยอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโตรเมตรี พบว่าปริมาณอนุมูลอิสระในเครื่องเทศและสมุนไพรบางชนิด ที่ฉายรังสีสูงกว่าเครื่องเทศและสมุนไพรที่ไม่ฉายรังสี ตลอดช่วงเวลา 58 วัน ปริมาณอนุมูลอิสระสูงมากในวันแรก ศิริวัฒนา และสุมิตรา (2547) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในถั่วเหลือง ถั่วแดง ลูกเดือย และเม็ดบัวที่ฉายรังสี ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ พบว่า ปริมาณอนุมูลอิสระสูงสุดหลังจากฉายรังสีเสร็จสิ้น

ระดับการฉายรังสีไม่มีผลต่อการลดลงของปริมาณอนุมูลอิสระ ระยะเวลาการคงอยู่จะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลจนถึงระยะประมาณ 31 วันหลังจากผ่านการฉายรังสีแกมมาปริมาณของอนุมูลอิสระจะไม่มีความแตกต่างกัน เป็นไปตาม กำพล (2540) ประยุกต์ใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ ในการตรวจพิสูจน์ธัญพืชบางชนิดที่ฉายรังสีแกมมา พบว่า ธัญพืชที่มีลักษณะแห้ง มีปริมาณอนุมูลอิสระลดปริมาณลงเรื่อยๆเมื่อผ่านไปจนถึงประมาณ 30 วันก็จะใกล้เคียงกับค่าปกติ การใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ จะได้ผลดีกับธัญพืชที่นำมาตรวจวัดภายใน 30 วัน หลังฉายรังสี ธนาวิทย์ (2543) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในธัญพืช เครื่องเทศและสมุนไพร บางชนิด (ข้าว ถั่วเขียว พริกไทยขาวเม็ด พริกไทยขาวป่น และชาเขียว) ที่ฉายรังสีแกมมา เมื่อนำมาตรวจด้วยอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโตรเมตรี พบว่าปริมาณอนุมูลอิสระในเครื่องเทศและสมุนไพรบางชนิด จะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล หลัง 15 วัน ปริมาณอนุมูลอิสระจะลดช้าลงจนเริ่มคงที่ ศิริวัฒนา และสุมิตรา (2547) ทำการตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในถั่วเหลือง ถั่วแดง ลูก

เดือย และเม็ดบัวที่ฉายรังสี ด้วยเครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ จะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ภายใน 15 วัน ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนถึงวันที่ 6 หลังจากนั้น จะเริ่มคงที่

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในพริกป่นโดยเครื่องอิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์ พบว่าปริมาณอนุมูลอิสระแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.01ตามปริมาณรังสีที่ได้รับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณรังสีที่เพิ่มขึ้น ระยะเวลาการคงอยู่จะจะลดลงแบบ เอกซ์-โพเนนเชียล แล้วปริมาณอนุมูลอิสระจะลดลงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับระดับนัยสำคัญ 0.01ในวันที่ 16 หลังจากฉายรังสี หลังจากนั้นปริมาณของอนุมูลอิสระของแต่ละระดับรังสีจะไม่แตกต่างกัน โดยระยะเวลาการคงอยู่ของปริมาณอนุมูลอิสระระดับการฉายรังสีไม่มีผลต่อระยะเวลาการคงอยู่ของปริมาณอนุมูลอิสระ

ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาตำแหน่งการเกิดอนุมูลอิสระโครงสร้างทางเคมีเพื่อเป็นประโยชน์ทราบในการเกิดอนุมูลอิสระและการหายไปของอนุมูลอิสระ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมศุลกากร. 2547.**ข้อมูลการนำเข้าส่งออกผลิตผลทางการเกษตร**,กรุงเทพมหานคร.

กองวิชาการสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา. 2532. **อาหารฉายรังสี หลักการใช้และความปลอดภัย.** งานโครงการความปลอดภัยในการใช้เคมี, กรุงเทพฯ.

โกวิทย์ นุชประมูล. 2547.**อาหารกับการฉายรังสี.**ศูนย์ฉายรังสีอาหารและผลิตผลทางการเกษตร. สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ.

กำพล แต้พานิช. 2540.**การประยุกต์ใช้อิเล็กตรอนสปรินเรโซแนนซ์สเปกโตรเมตรีในการตรวจพิสูจน์ธัญพืชฉายรังสีบางชนิด**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดุสิต เครืองามและ วิโรจน์ บุญโกสุมภ์. 2536.**การประยุกต์ใช้ ESR ในงานวัสดุศาสตร์.** วารสารศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 3(2):111-140.

ธนาวิทย์ กุลรัตนรักษ์. 2543. **การตรวจวัดปริมาณอนุมูลอิสระในธัญพืช เครื่องเทศและสมุนไพรบางชนิดที่ฉายรังสี.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิพนธ์ ตังคณานุรักษ์และคณิตา ตังคณานุรักษ์.2547.**สเปกโตรสโกปีด้านการวิเคราะห์.**ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุลและ สุมิตรา คำประกอบ. 2547.**การตรวจวัดอนุมูลอิสระในถั่วเหลืองถั่วแดงลูกเดือยและเม็ดบัวที่ฉายรังสี.**วารสารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย 5(1):10-24.

ศูนย์ฉายรังสีอาหารและผลิตผลทางการเกษตร. 2547. **การถนอมอาหารด้วยรังสีในประเทศไทย.** สำนักงานปรมณูเพื่อสันติ, กรุงเทพฯ.

อนันต์ชัย เขื่อนธรรม.2542.**หลักการวางแผนการทดลอง.**ครั้งที่ 2. ภาควิชาสถิติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

อรุณี วงศ์ปิยะสถิตย์. 2546. **การถนอมอาหารด้วยการฉายรังสี.** ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

โอภา วัชระคุปต์, ปรีชา บุญจง, จันทนา บุณยะรัตน์และมาลีรักษ์ อัตต์สินทอง. 2549. **สารต้านอนุมูลอิสระ.** ครั้งที่ 1. พี.เอส.พริ้นท์, นนทบุรี.

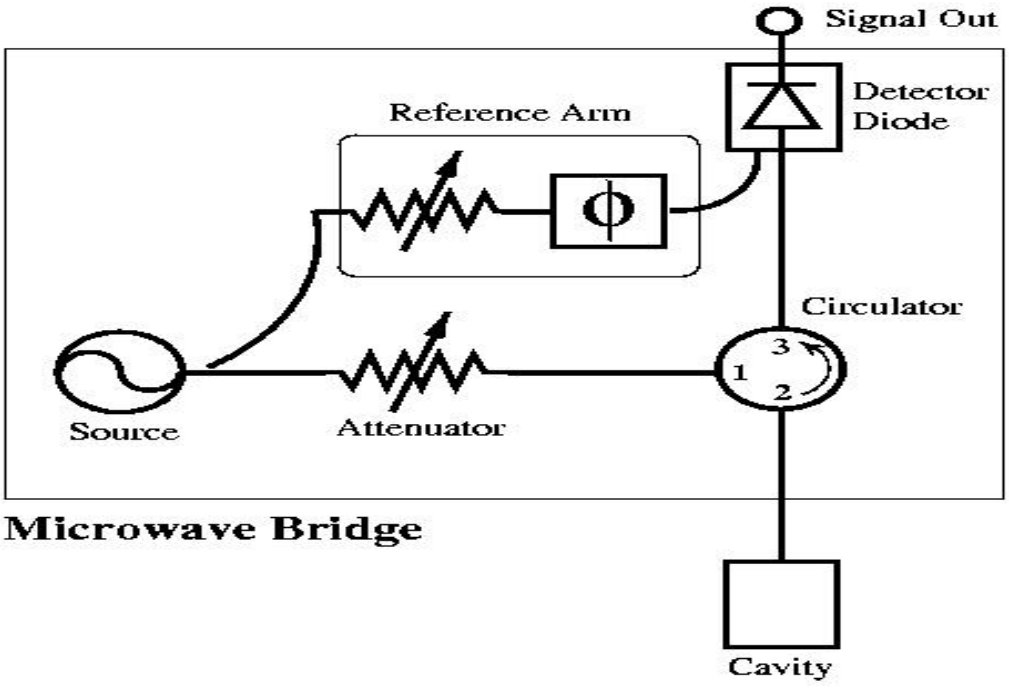
Desrosiers M. and W.L. McLaughlin.1989. Examination of Gamma-Irradiated Fruit and Vegtable by ESR Spertroscopy.**Radia,Phys, Chem**.34:895-898

Dodd N. and A.J. Swallow.1989. The ESR Detection of Irradiated Food. **Appl. Radia. Isot.** 40:1211-1214.

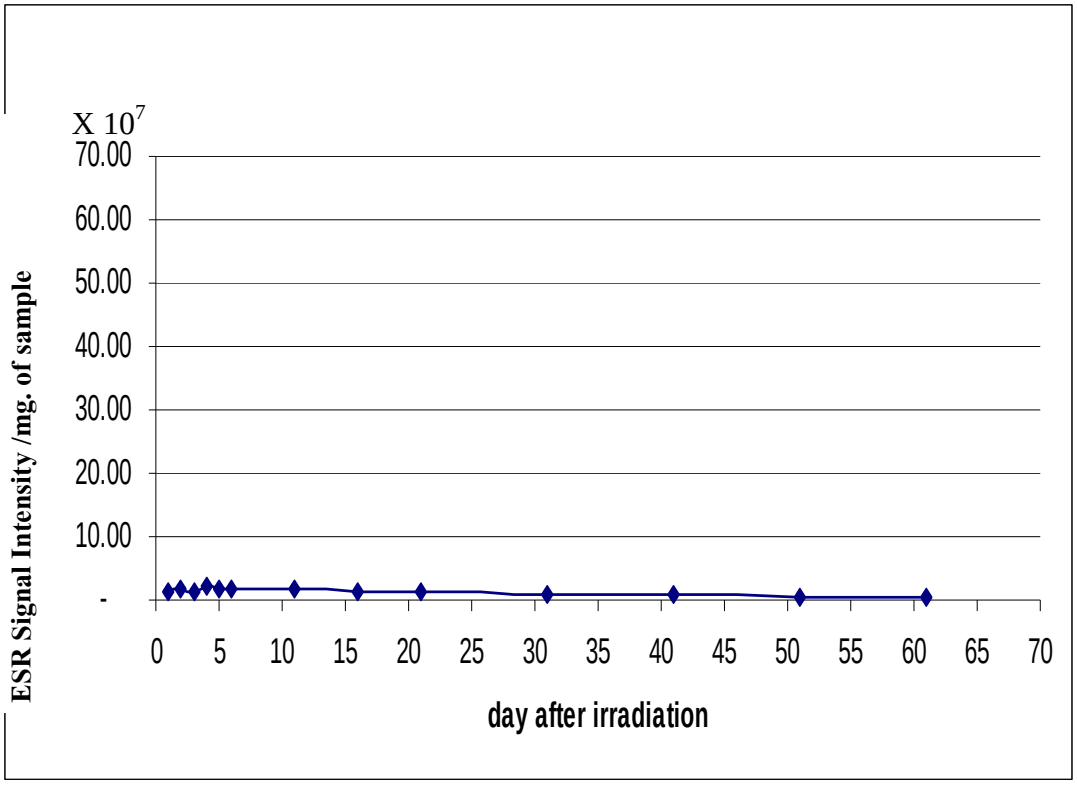
H.Murrieta, SE.Munoz, P.E.Adem, G.Burillo, M.Vazquez, E.Vazquez and E Cabrera B.1996. Effect of Irradiation Dose,Storage Time and Temperature on the ESR Signal in Irradiated Oat, Corn and Wheat**. Appl. Radia. Isot.** 47:1657-1661.

ภาคผนวก

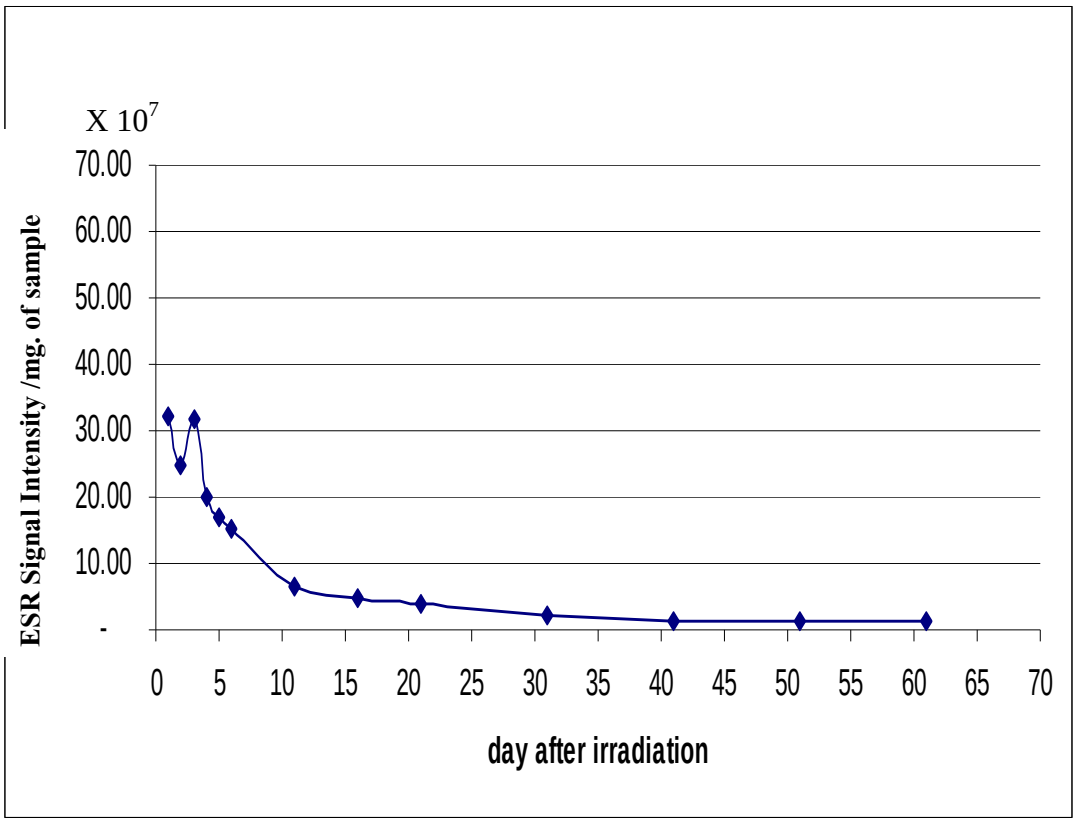
ภาพผนวกที่ 1 เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์รุ่น Bruker A300 Research



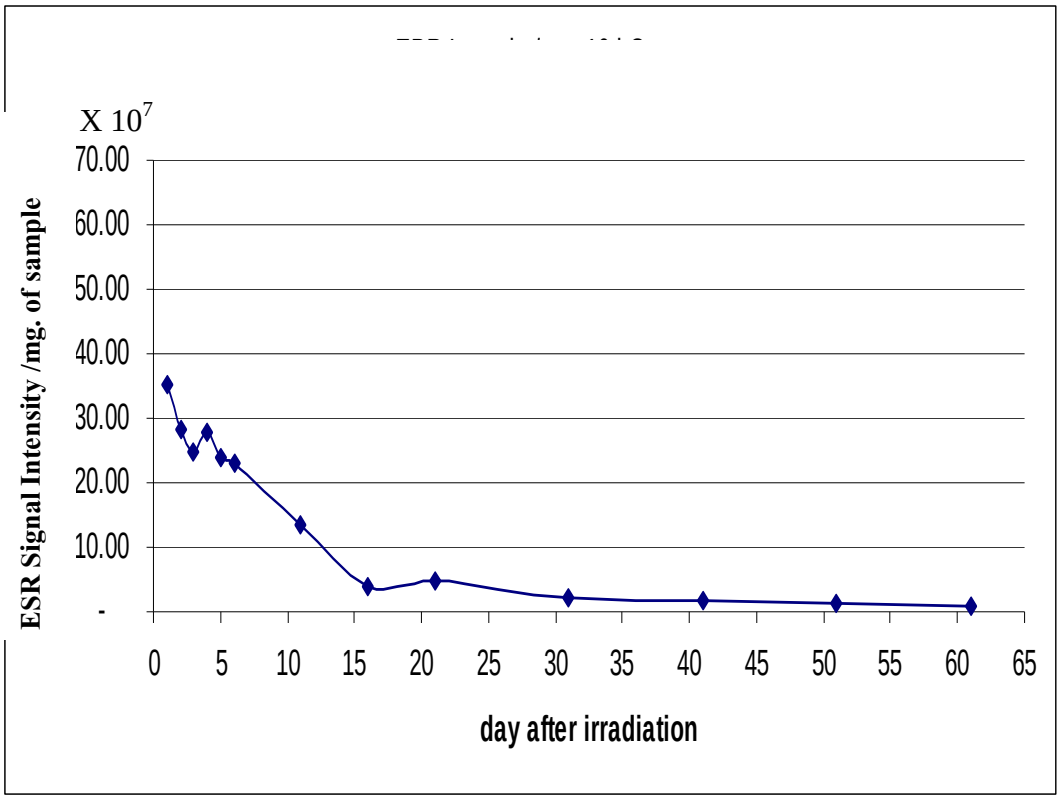
ภาพผนวกที่ 2 แผนภาพเครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์รุ่น Bruker A300 Research



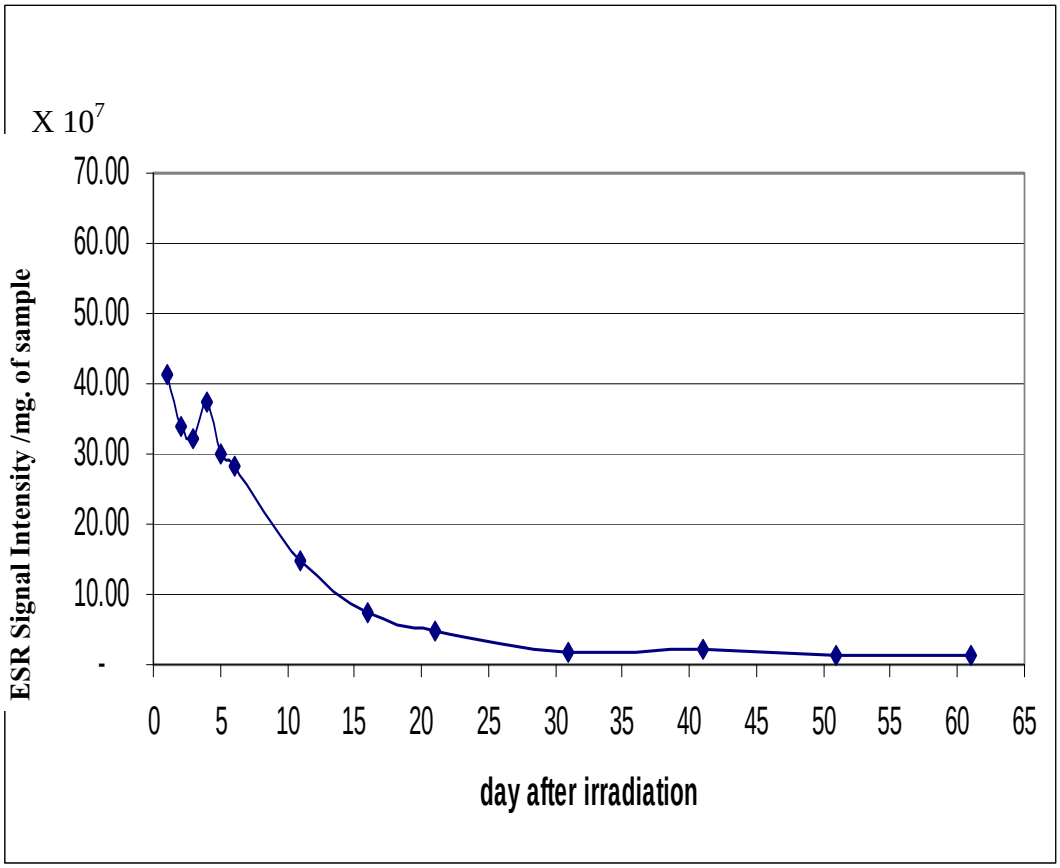
ภาพผนวกที่ 3 ESR Signal Intensity ของพริกที่ไม่ได้ฉายรังสีในระยะเวลาต่างๆ



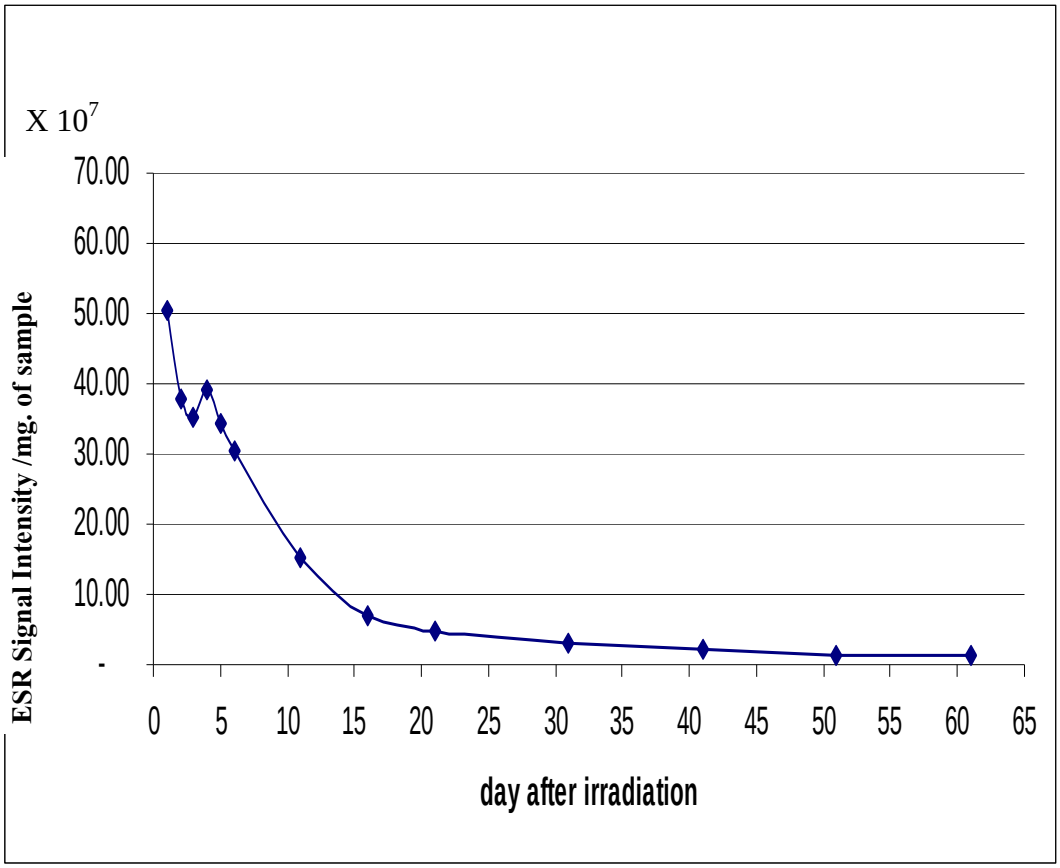
ภาพผนวกที่ 4 ESR Signal Intensityของพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์ ในระยะเวลาต่างๆ หลังฉายรังสี



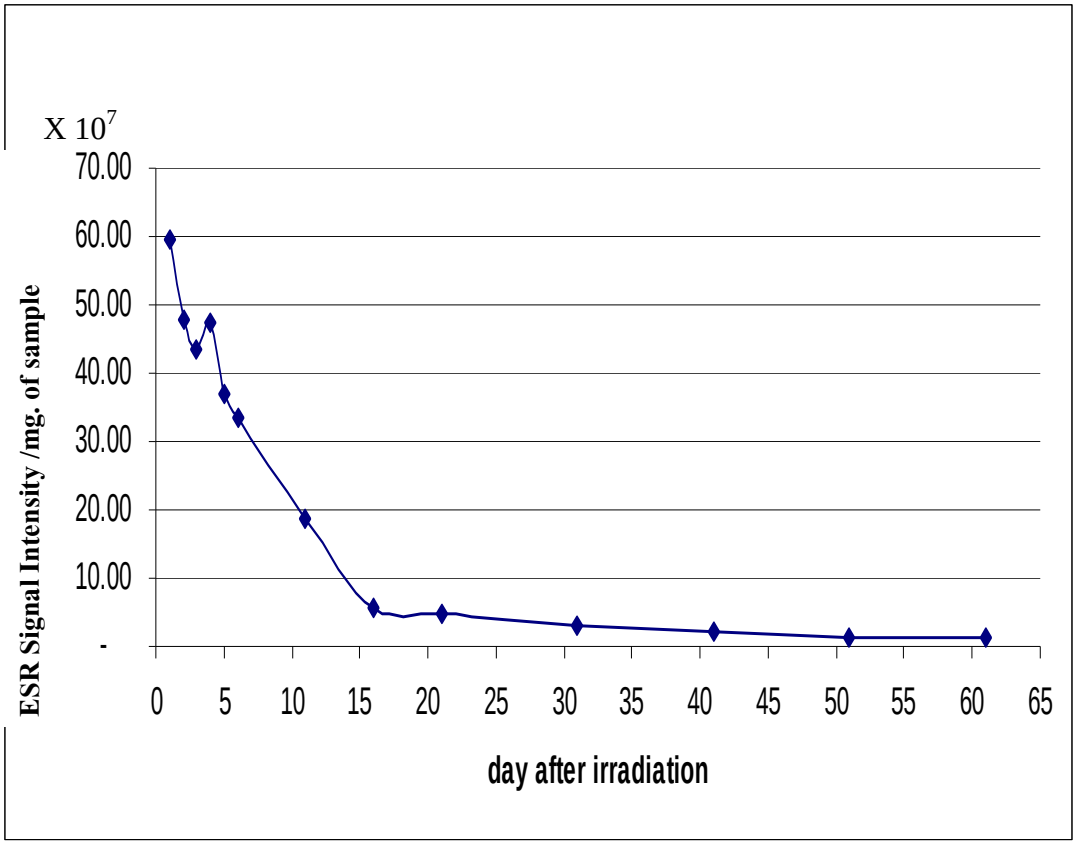
ภาพผนวกที่ 5 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์.ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี



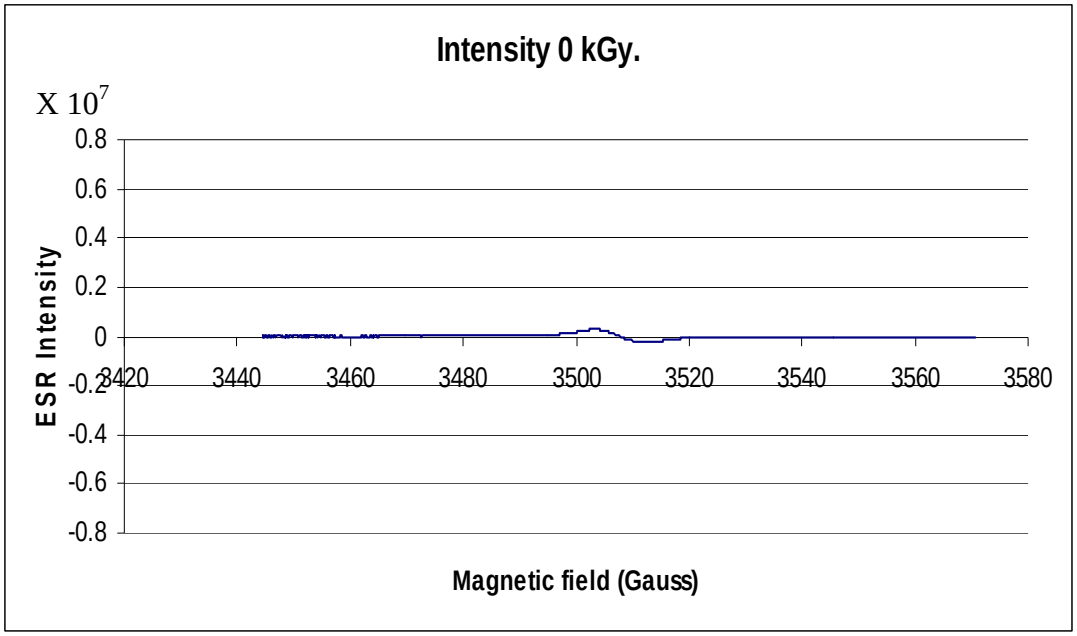
ภาพผนวกที่ 6 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี



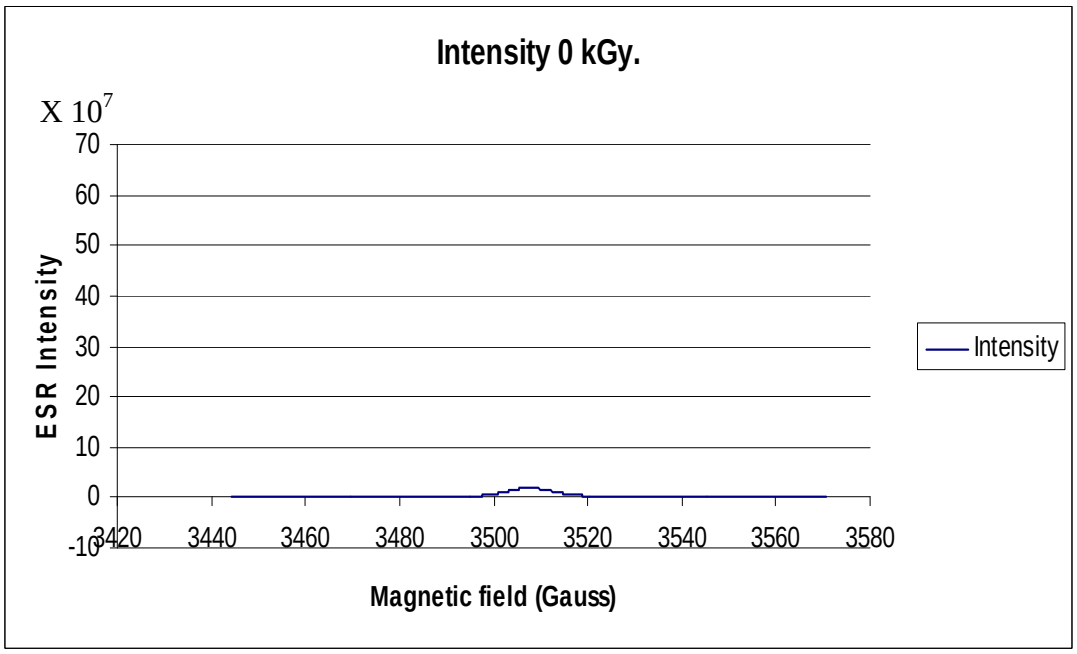
ภาพผนวกที่ 7 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี



ภาพผนวกที่ 8 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์ในระยะเวลาต่างๆหลังฉายรังสี

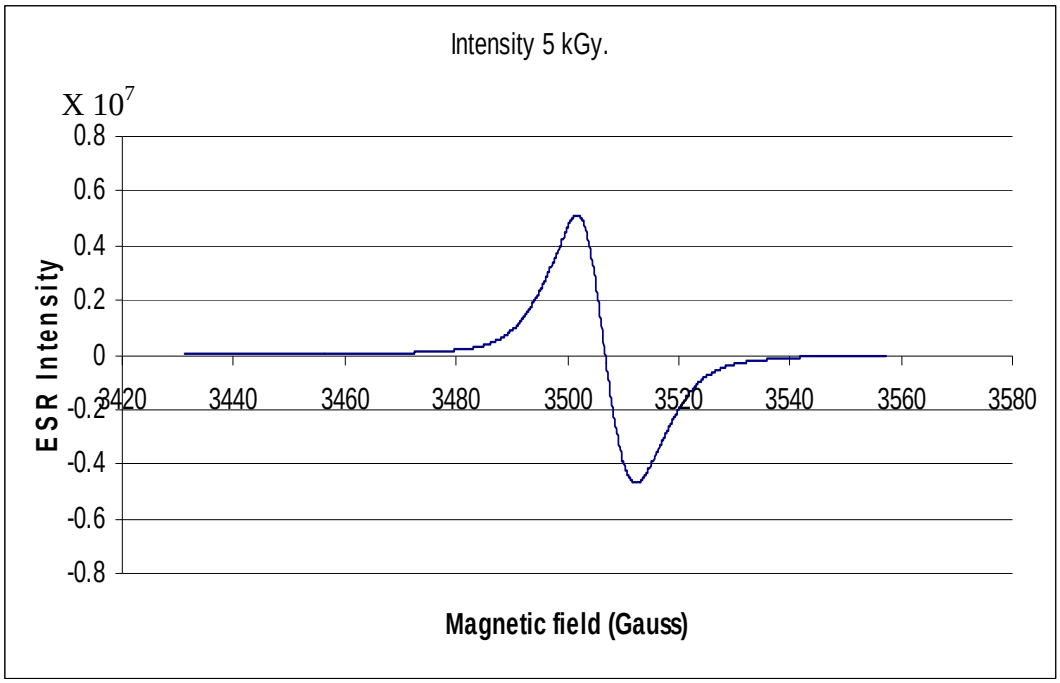


ภาพผนวกที่ 9 ก

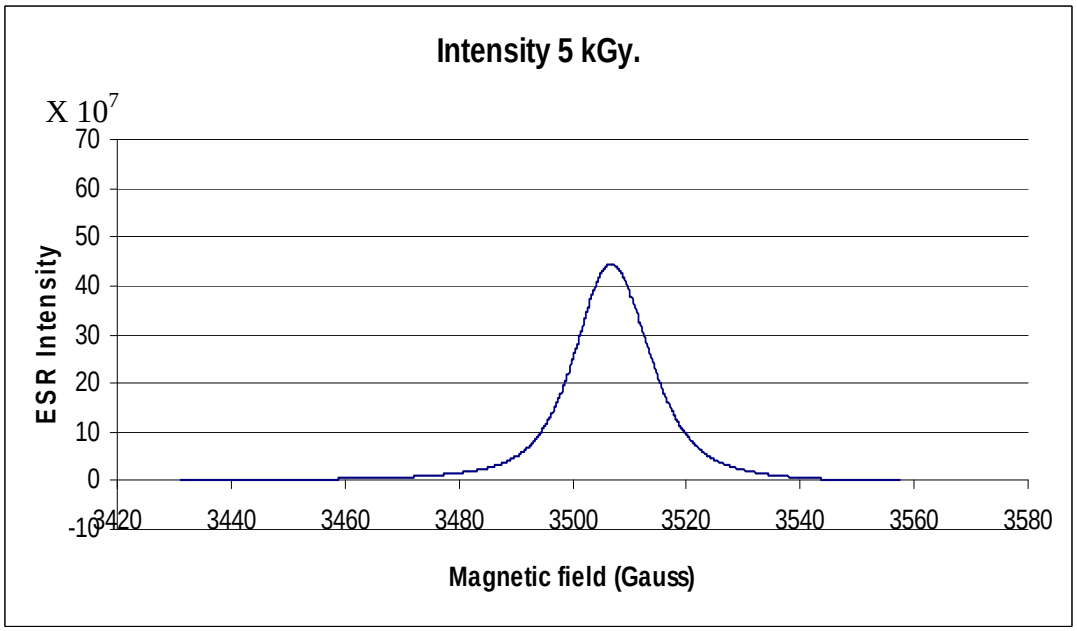


ภาพผนวกที่ 9 ข

ภาพผนวกที่ 9 ESR Signal Intensity ของพริกที่ไม่ฉายรังสี

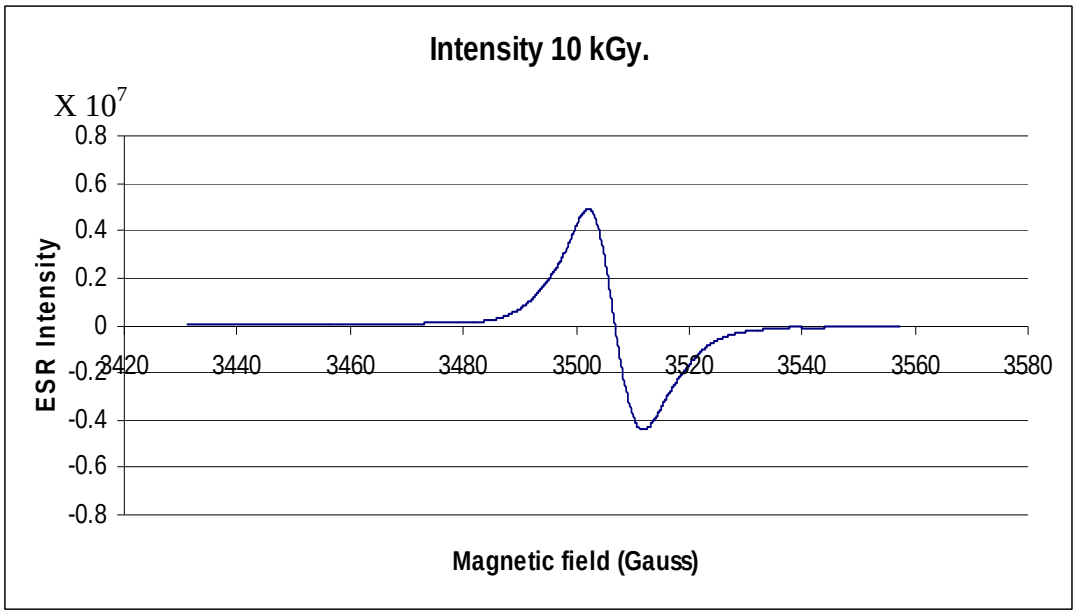


ภาพผนวกที่ 10 ก

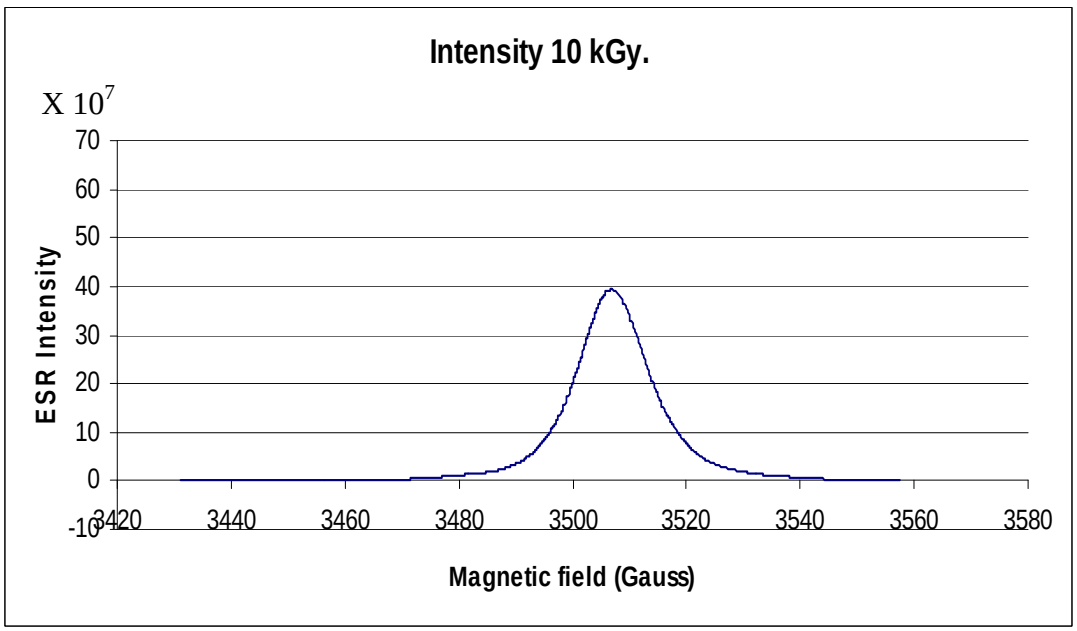


ภาพผนวกที่ 10 ข

ภาพผนวกที่ 10 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 5 กิโลเกรย์

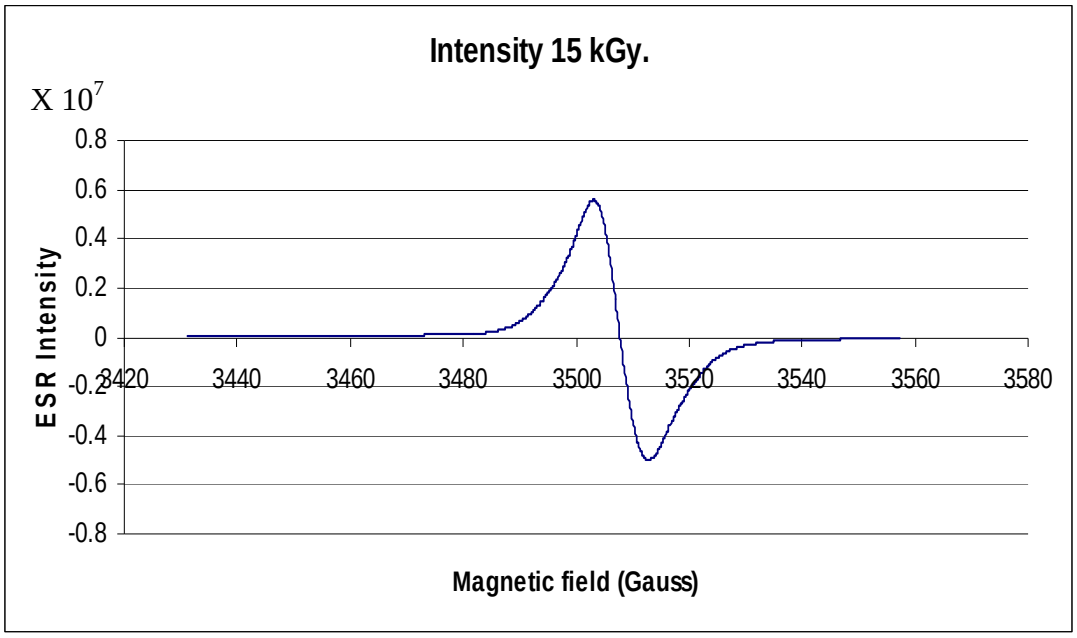


ภาพผนวกที่ 11 ก

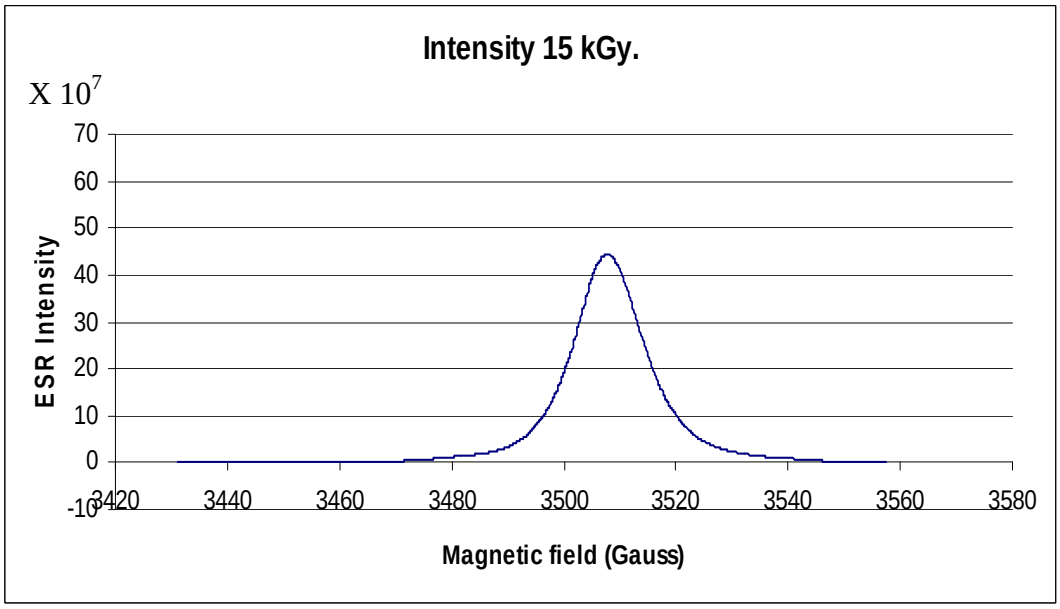


ภาพผนวกที่ 11 ข

ภาพผนวกที่ 11 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 10 กิโลเกรย์

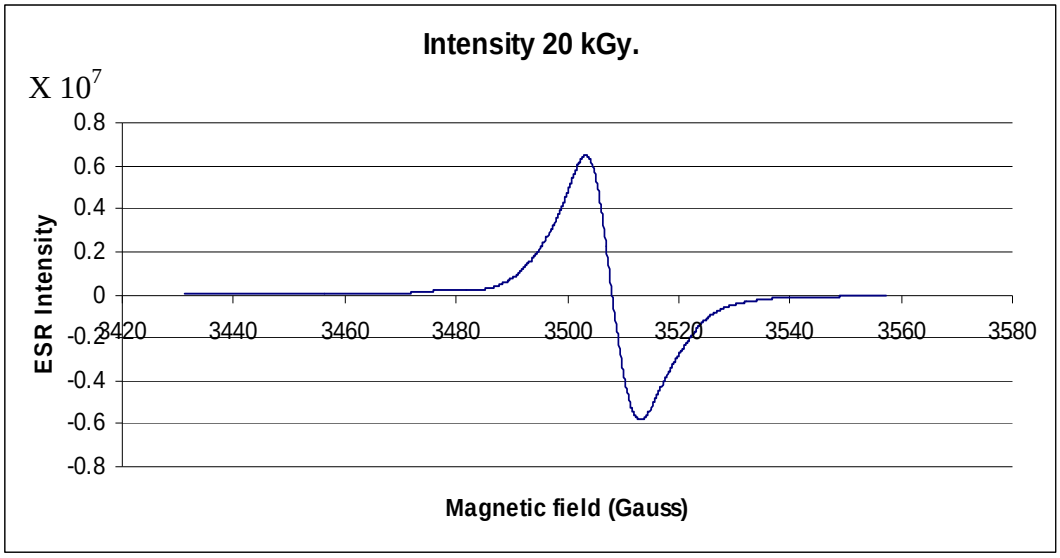


ภาพผนวกที่ 12 ก

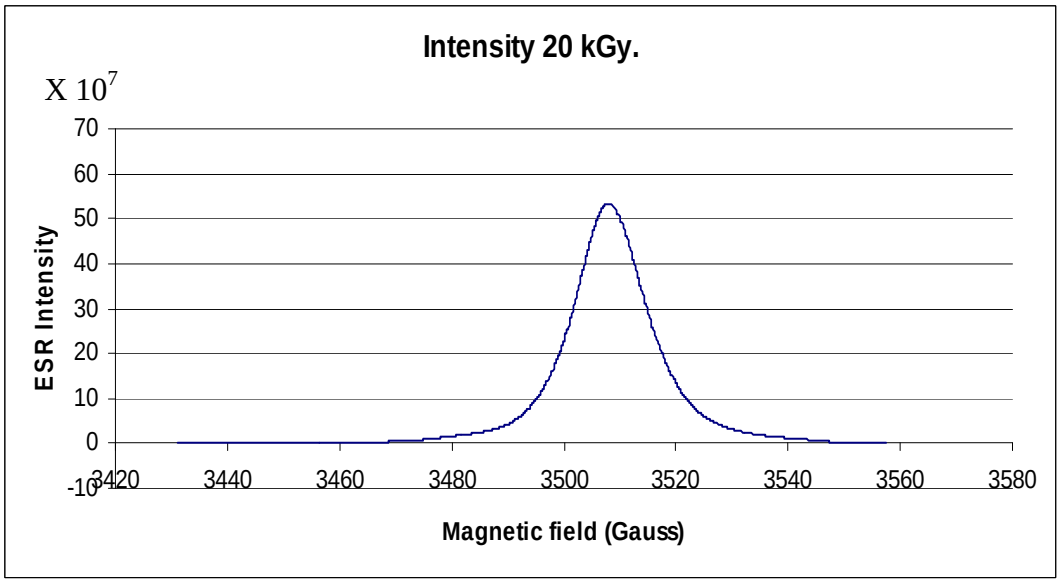


ภาพผนวกที่ 12 ข

ภาพผนวกที่ 12 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 15 กิโลเกรย์

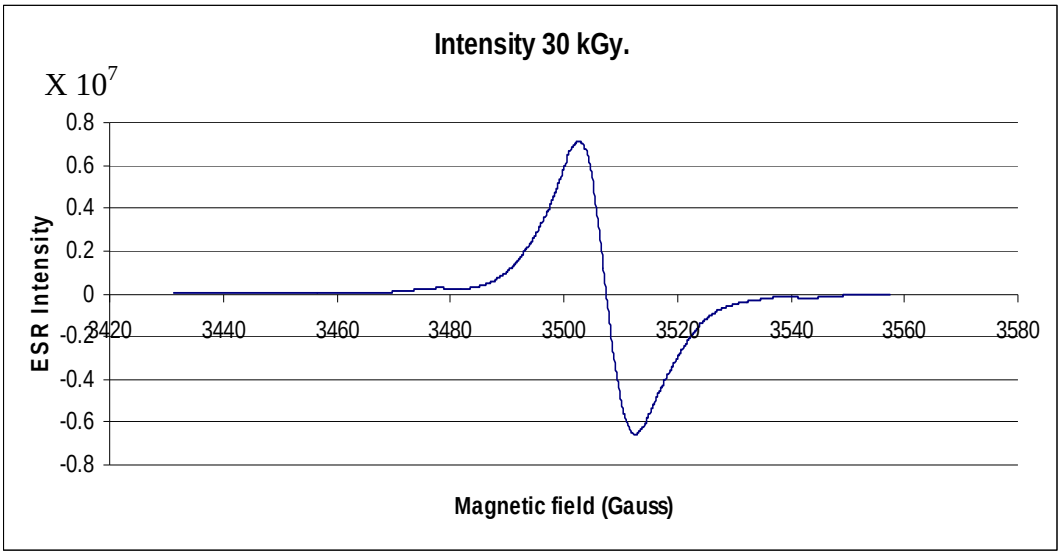


ภาพผนวกที่ 13 ก

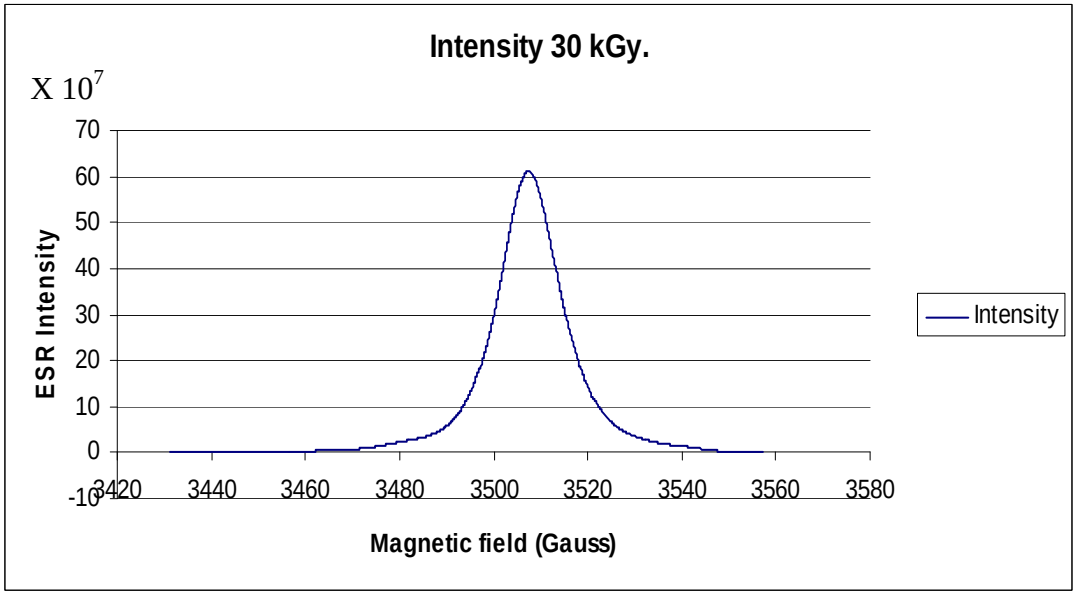


ภาพผนวกที่ 13 ข

ภาพผนวกที่ 13 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 20 กิโลเกรย์



ภาพผนวกที่ 14 ก



ภาพผนวกที่ 14 ข

ภาพผนวกที่ 14 ESR Signal Intensity ของพริกที่ฉายรังสี 30 กิโลเกรย์

ตารางผนวกที่ 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลของปริมาณอนุมูลอิสระ

Source	df	Mean Square	F
Main unit analysis			
Block	2	5.784×10^{16}	
A	5	2.371×10^{17}	95.374**
Error (a)	10	2.486×10^{15}	
Sub unit analysis			
B	12	3.177×10^{17}	136.293**
AB	60	1.720×10^{16}	7.379**
Error (b)	144	2.331×10^{15}	

** มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (ระดับนัยสำคัญ 0.01)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายรังสันต์ จอมทะรักษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 30 ธันวาคม 2522
สถานที่เกิด	กาฬสินธุ์
ประวัติการศึกษา	ครุศาสตรบัณฑิต วิทยาศาสตร์ทั่วไป สถาบันราชภัฏสวนดุสิต
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	เจ้าหน้าที่อาจารย์ช่วยสอน
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาบุคคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏสวนดุสิต