

การหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็ก
ในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี



นายอภิเชษฐ์ มณีวงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CORRELATION OF MANGANESE AND IRON RATIO IN GAMMA IRRADIATED
TOURMALINE AND COLOR ALTERATION



Mr. Apichate Maneewong

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

อภิเชษฐ์ มณีวงษ์ : การหาสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กใน
ทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี. (CORRELATION OF
MANGANESE AND IRON RATIO IN GAMMA IRRADIATED TOURMALINE
AND COLOR ALTERATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.อรรถพร
ภัทรสุมันต์, 114หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ให้กับทัวร์มาลีนด้วยปริมาณรังสี
ดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีน และหา
อัตราส่วนของธาตุแมงกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน (NAA)
จากผลการทดลองพบว่า กลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลีนสีเขียวซึ่งมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็ก
อยู่ในช่วง 0.15-0.55 มีการเปลี่ยนแปลงของสีไม่ชัดเจนนัก กลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลีนสีชมพูซึ่งมี
อัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ในช่วง 0.97-7.73 มีการเปลี่ยนแปลงของสี กลุ่มตัวอย่าง
ทัวร์มาลีนสีชมพูซึ่งมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ในช่วง 51.50-80.50 มีการ
เปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจน และกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลีนสองสีซึ่งอัตราส่วนของแมงกานีสและ
เหล็กอยู่ในช่วง 163.00-177.00 มีการเปลี่ยนแปลงสีที่เห็นได้ชัดเจนที่สุด จากการพิจารณา
ทัวร์มาลีนที่ฉายด้วยรังสีแกมมาที่มีการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจน ในกลุ่มสีชมพูพบว่ามีอัตราส่วน
ของแมงกานีสและเหล็กมากกว่า 51.50 และในกลุ่มสองสีมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็ก
มากกว่า 163.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิเวศวิทยาเทคโนโลยี ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา นิเวศวิทยาเทคโนโลยี ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2552

4970681821: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : TOURMALINE / GAMMA-RAY IRRADIATION

APICHATE MANEEWONG : CORRELATION OF MANGANESE AND IRON
RATIO IN GAMMA IRRADIATED TOURMALINE AND COLOR ALTERATION.
THESIS ADVISOR : ASST.PROF. ATTAPORN PATTARASUMUN, 114 pp.

In this research, tourmaline samples were irradiated by gamma ray from Cobalt-60 at various doses of 600, 800 and 1,000 kGy in order to observe whether or not the color change was caused by ratios of manganese and iron content in the samples. Manganese and iron content were analyzed by neutron activation analysis. From the experimental results, the green tourmaline with Mn/Fe ratio of 0.15 to 0.55 found not to give clearly changes in color. Intensification of pink color to red was observed with Mn/Fe ratio of 0.97 to 7.73 but not as significant as those of with Mn/Fe ratio of 51.50-80.50 and the bi-color tourmaline with Mn/Fe ratio of 163.00 to 177.00. It was concluded that pink tourmaline samples with Mn/Fe ratio of greater than 51.50 and the bi-color tourmaline samples with Mn/Fe ratio of greater than 163.00 were found to give clearly change to deep color which apparently make value added to the original samples.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Nuclear Technology

Field of Study : Nuclear Technology

Academic Year : 2009

Student's Signature.....*Apichate Manee Wong*
Advisor's Signature.....*Attaporn Pattarasumun*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรุณพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำในด้านต่าง ๆ พร้อมทั้งตรวจทานแก้ไข จนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ประธานกรรมการ สอบ รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล และ ดร.ชนาธิป ทิพยกุล ผู้เป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่ได้ตรวจสอบและให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนค่าเล่าเรียนและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตามโครงการเพิ่มผลผลิตบัณฑิต โดยความร่วมมือของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

ขอขอบพระคุณ คุณอารีรัตน์ คอนดวงแก้ว ผู้ซึ่งเป็นผู้บังคับบัญชาที่ให้คำปรึกษา และตอบคำถามทุกข้อซักถาม พร้อมทั้งให้คำแนะนำดี ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ และเพื่อนๆ นักศึกษา ที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยอย่างดีตลอดมา

คุณความดีหรือประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่บุพการี ผู้มีพระคุณทุกท่านและครูอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยมาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทัวร์มาลีน.....	5
2.2 การเพิ่มคุณค่าอัญมณีโดยการฉายรังสี.....	16
2.3 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน.....	23
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการเรืองรังสีเอกซ์.....	27
2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับสี.....	29
3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 การตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป.....	39
3.2 การฉายรังสีแกมมาทัวร์มาลีน.....	40
3.3 การประเมินสีของทัวร์มาลีน.....	42
3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer.....	43
3.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์.....	45
3.6 การวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน.....	46

บทที่	หน้า
3.7 การหาสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา กับการเปลี่ยนสี.....	54
4. ผลการทดลอง.....	55
4.1 ผลการตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป.....	55
4.2 ผลการประเมินสีของทัวร์มาลีน.....	56
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer.....	58
4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอ็กซ์.....	63
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการ ก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน.....	65
4.6 ผลการอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสี แกมมา.....	67
5. สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุป และวิจารณ์ผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก.....	77
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	90
ภาคผนวก ง.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าดัชนีหักเห.....	13
2.2	แสดงสีแฝดของทัวร์มาลีน.....	14
2.3	รังสีที่ใช้ฉายอัญมณีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.4	เปรียบเทียบโครงสร้างรูปแบบสีของ Munsell/HSB/HLS.....	31
3.1	องค์ประกอบของธาตุปริมาณหลักและปริมาณรองในสารมาตรฐาน SOIL-7.....	47
3.2	องค์ประกอบของธาตุปริมาณน้อยในสารมาตรฐาน SOIL-7.....	48
3.3	แสดงรหัสและน้ำหนักของสารตัวอย่าง.....	51
3.4	แสดงรหัสและน้ำหนักของสารมาตรฐาน.....	52
4.1	แสดงผลการตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป.....	55
4.2	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลีน.....	56
4.3	แสดงธาตุในตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์.....	63
4.4	ปริมาณแมงกานีสและเหล็กในตัวอย่างที่วิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน.....	66
4.5	แสดงสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กกับการเปลี่ยนสี.....	67

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงทัวร์มาลีนเจดสีต่างๆ.....	5
2.2	ชนิดและชื่อทางการค้าของทัวร์มาลีน.....	7
2.3	แสดงรูปผลึกของทัวร์มาลีน.....	8
2.4	ลักษณะตำหนิคล้ายเส้นด้ายและท่อที่เรียงขนานกันจำนวนมาก.....	9
2.5	ลักษณะตำหนิสองสถานะที่มีของแข็งอยู่ในของเหลว.....	9
2.6	ลักษณะตำหนิของเหลวที่กระจายทั่วตามรอยแตก.....	9
2.7	ลักษณะตำหนิผลึกใสกับของเหลว.....	10
2.8	ลักษณะตำหนิผลึกรูปหกเหลี่ยม อาจเป็นแร่อะพาไทท์.....	10
2.9	ลักษณะตำหนิสองสถานะของเหลวและก๊าซ.....	10
2.10	รอยแตกของทัวร์มาลีนมีลักษณะการแตกเป็นเส้นใยคล้ายเส้นผม.....	10
2.10	แสดงปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กตริก.....	19
2.11	แสดงปฏิกิริยาคอมพัตัน.....	19
2.12	แสดงปฏิกิริยาการผลิตคู่.....	19
2.13	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
2.14	แสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายรังสีว่าสคูซึ่งอาจฟอร์มศูนย์กลางสี.....	21
2.15	Schottky Defect และ Frenkel Defect.....	23
2.16	กราฟแสดงการเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปรังสี.....	24
2.17	แสดงแผนผังการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์.....	27
2.18	แสดงการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานอื่นเข้ามาแทนที่ โดยใช้ atomic model.....	28
2.19	การกระจายของแสงสีขาวเมื่อเดินทางผ่านปริซึม.....	30
2.20	โครงสร้างของสามเหลี่ยมสี CIE.....	33
2.21	การบรรยายสีของ CIELAB.....	34
2.22	Munsell Colos System.....	34
2.23	แสดงงานค้นคว้าทฤษฎีสีของมันเชลล์.....	35
2.24	รูปแบบทฤษฎีสีของมันเชลล์.....	35
2.25	แสดงตำแหน่งของ Hue / Value / Chroma ตามทฤษฎีสีของมันเชลล์.....	36

ภาพที่		หน้า
2.26	สีหลักและสีรองในวงสีของมันเซลล์.....	36
2.27	วงสีของมันเซลล์.....	37
2.28	แสดงระดับค่าของ Value และ Chroma.....	38
3.1	ตัวอย่างทัวร์มาลิน.....	39
3.2	แสดงเครื่องโพลาไรสโคป.....	40
3.3	เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 Gamma cell 220 excell.....	41
3.4	การวางตัวอย่างทัวร์มาลินและการติดเครื่องวัดปริมาณรังสีในกระบอก อะลูมิเนียม.....	41
3.5	ชุดเทียบสีของมันเซลล์.....	42
3.6	กล้องจุลทรรศน์พร้อมอุปกรณ์บันทึกภาพ.....	42
3.7	เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer ของ Perkin Elmer รุ่น Lambda 750.....	44
3.6	แสดงชุดคอมพิวเตอร์และเครื่องวัด XRF.....	45
3.7	ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุสารตัวอย่าง Cell Window และชั้นดักสาร.....	45
3.8	แสดงการบรรจุสารลงในภาชนะพลาสติก และการวางสารตัวอย่างในเครื่องวัด.	46
3.9	แสดงสารมาตรฐาน SOIL-7.....	49
3.10	แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก.....	49
3.11	ระบบวัดรังสีแกมมา.....	49
3.12	แสดงลักษณะและขนาดขวดโพลีเอทิลีน ที่ใช้ในการบรรจุสารตัวอย่างและสาร มาตรฐาน.....	50
3.13	หลอดอาบนิวตรอนโพลีเอทิลีน และหลอดอาบนิวตรอนอะลูมิเนียม.....	50
3.14	ชั้นดักสาร ที่липตัวอย่าง และนาฬิกาจับเวลา.....	50
3.15	สารตัวอย่างและสารมาตรฐานบรรจุในขวดโพลีเอทิลีนที่ฉีกเรียบร้อยแล้ว.....	52
3.16	ตัวอย่างลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ธาตุแมงกานีส.....	53
3.17	ตัวอย่างลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ธาตุเหล็ก.....	53
3.18	ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ธาตุแมงกานีส..	54
4.1	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T2.....	59
4.2	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T7.....	59
4.3	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T12.....	60
4.4	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T17.....	60
4.5	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T21.....	61

ภาพที่		หน้า
4.6	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T30.....	61
4.7	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T33.....	61
4.8	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T36.....	62
4.9	การดูคลื่นแสงของตัวอย่าง T37.....	62
4.10	เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T01.....	64
4.11	เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T12.....	64
4.12	เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T27.....	64
4.13	สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างที่วิเคราะห์ธาตุแมงกานีส.....	65
4.14	สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างที่วิเคราะห์ธาตุเหล็ก.....	65



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทัวร์มาลีนเป็นพลอยเนื้ออ่อนที่มีหลากหลายสี ตั้งแต่โปร่งแสงจนทึบแสง บางชนิดมีชื่อทางการค้าพิเศษ บางชนิดมีชื่อตามสี เช่น สีน้ำเงินโปร่งใส เรียกว่า อินดิโคไลต์ (indicolite) สีเขียวเข้ม เรียกว่า โครมทัวร์มาลีน (chrome tourmaline) สีดำทึบแสง เรียกว่า ซอล (schorl) สีชมพู ล้อมด้วยขอบเขียว โปร่งใส เรียกว่า วอเตอร์เมลอนทัวร์มาลีน (watermelon tourmaline) สีฟ้าแกมเขียวสด เรียกว่า พาราอิวาทัวร์มาลีน (paraiba tourmaline) ซึ่งเป็นชนิดที่หายากและราคาสูง สำหรับสีที่นิยมมากที่สุด คือ สีชมพูแดง เรียกว่า รูเบลไลต์ (rubellite) เนื่องจากมีสีคล้ายทับทิม โดยเม็ดที่มีสีสวยงาม ไม่มีตำหนิ มีราคาสูงกว่าสองหมื่นบาทต่อกะรัต[1] ด้วยเหตุนี้ผู้ค้าพลอยจึงมีความพยายามในการปรับปรุงสีของทัวร์มาลีนให้เป็นสีชมพูแดงเหมือนกับรูเบลไลต์ ซึ่งการฉายทัวร์มาลีนด้วยรังสีแกมมาก็เป็นวิธีการหนึ่ง

การเกิดสีของทัวร์มาลีนฉายรังสีแกมมาอาจเป็นสีชมพูเฉดต่างๆ ทัวร์มาลีนสีชมพูอ่อนจะมีสีเข้มขึ้น หรืออาจเปลี่ยนเป็นสีส้ม ทัวร์มาลีนสีเขียวอ่อนอาจเปลี่ยนเป็นสีชมพูเข้ม แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนขึ้นกับคุณสมบัติของพลอยแต่ละก้อน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าธาตุปริมาณน้อยมีผลต่อการเกิดสีของพลอย ทัวร์มาลีนก็เช่นกัน กลไกการเกิดสีชมพูในทัวร์มาลีนยังไม่เป็นที่แน่ชัด Nassau[2] เชื่อว่า สีชมพูในรูเบลไลต์ อาจเกิดจากสีของธาตุมลทิน Mn^{3+} แต่ทั้งนี้ในตัวอย่างจะต้องมีธาตุเหล็กเจือปนอยู่ด้วยในปริมาณน้อย

ในการทดลองและบริการฉายรังสีแกมมาให้กับผู้ค้าทัวร์มาลีน โดยศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) พบว่าเมื่อฉายรังสีแกมมาให้กับทัวร์มาลีนมาจากประเทศอัฟกานิสถาน ทัวร์มาลีนจะเปลี่ยนเป็นรูเบลไลต์ แต่ยังมีทัวร์มาลีนจากแหล่งอื่น ๆ ที่หลังฉายรังสีแกมมาแล้วไม่เป็นรูเบลไลต์ ดังนั้นจากสมมติฐานของ Nassau ในงานวิจัยนี้จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีส (Mn) กับเหล็ก (Fe) ในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis) เพื่อหาอัตราส่วนของแมงกานีส กับเหล็ก ซึ่งอาจใช้เป็นแนวทางในกำหนดปริมาณรังสีที่ใช้ฉายให้กับทัวร์มาลีนต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. หาปริมาณของแมงกานีสและเหล็ก ในทัวร์มาลีนจากแหล่งต่างๆ อย่างน้อย 2 แหล่ง ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis) หรือเทคนิคการวิเคราะห์โดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีระหว่าง 600-1000 กิโลเกรย์ (kGy) กับการเปลี่ยนสี

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. บันทึกข้อมูลสีของทัวร์มาลีนก่อนฉายรังสีแกมมา
3. นำตัวอย่างทัวร์มาลีนมาฉายด้วยรังสีแกมมา
4. บันทึกข้อมูลสีของทัวร์มาลีนหลังฉายรังสีแกมมา
5. หาปริมาณของแมงกานีส และเหล็ก ในทัวร์มาลีนจากแหล่งต่างๆ
6. หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา กับการเปลี่ยนสี
7. วิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแมงกานีส และเหล็ก กับการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนหลังฉายรังสีแกมมา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดปริมาณรังสีที่จะฉายให้กับทัวร์มาลีน

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ชาญชัย อิศววินิจกุลชัยและคณะ[1] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบกับการเกิดสีของทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการ

อาบนิวตรอน (Neutron activation analysis) ผลการวิเคราะห์ทัวร์มาลีนประกอบไปด้วยธาตุอะลูมิเนียมเป็นธาตุหลัก ธาตุโซเดียม, แมงกานีสและเหล็กเป็นธาตุรอง ธาตุปริมาณน้อยที่พบได้แก่ สังกะสี, ซีเซียม และแทนทาลัม ส่วนธาตุรูบิเดียมพบในบางตัวอย่างเท่านั้น ทัวร์มาลีนที่ไม่มีสีจะมีปริมาณของอะลูมิเนียมน้อยกว่าสีอื่นๆ แต่มีโซเดียมในปริมาณที่สูง ธาตุปริมาณน้อยเจือปนในปริมาณที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทัวร์มาลีนที่มีสีมาก ทัวร์มาลีนที่มีสีชมพูจะมีธาตุเจือปนอยู่เพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่ารังสีแกมมาสามารถทำให้ทัวร์มาลีนซึ่งมีธาตุเหล็กอยู่เจือปนน้อยมีสีชมพูเข้มขึ้น

2. อัจฉรา แสงอรียวนิชและคณะ[2] ได้ใช้เทคนิคการวาวรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยในทัวร์มาลีนสีชมพูเฉดต่างๆ ซึ่งเกิดจากการฉายรังสีแกมมา จำนวน 6 ตัวอย่าง ได้แก่ สีชมพูแดง, ชมพูอ่อน, ชมพูอมส้ม, ชมพูอมน้ำตาลอมส้ม, สีแดงอมม่วง และสีม่วงอมชมพูอมส้ม ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีธาตุแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ ในบางตัวอย่างอาจพบธาตุเหล็ก, สังกะสีและตะกั่ว บีสมัทหรือแคลเซียมเจือปนอยู่ด้วยขึ้นกับเฉดสีของตัวอย่าง ไม่พบธาตุมลทินเหล่านี้ในทัวร์มาลีนสีชมพูแดง จึงสรุปได้ว่า แมงกานีสเป็นธาตุสำคัญที่ทำให้เกิดสีชมพูในทัวร์มาลีน ส่วนธาตุมลทินอื่น ๆ เป็นเพียงองค์ประกอบเสริมให้เกิดสีชมพูเฉดต่าง ๆ

3. Marly Bueno De Camargoc and Sadao Isot Ani[3] ได้ทำการศึกษาทัวร์มาลีนสีชมพูจากธรรมชาติในประเทศบราซิลด้วยวิธีการ polarized optical absorption โดยทำการวัดสเปกตรัมจากผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 จากการสังเกตแถบการดูดกลืนแสงเป็นตามนี้ คือ 8500 และ 14800 cm^{-1} เมื่อกำหนดให้ d-d transition ของ Fe^{2+} ที่ตำแหน่ง b และ c ตามลำดับ, 19500 และ 25500 cm^{-1} เมื่อกำหนด energy-level จาก ${}^5\text{E} \rightarrow {}^5\text{A}_1$ และ ${}^5\text{B}_2 \rightarrow {}^5\text{A}_1$ d-d transition ของ Mn^{3+} ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้ได้มีการนำตัวอย่างทัวร์มาลีนไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence analysis ซึ่งตัวอย่างทัวร์มาลีนสีชมพูจะมีอัตราส่วนของ Mn/Fe ที่สูงกว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนสีเขียว

4. เฉลิมชัย จันทาพูน[4] ได้ศึกษาถึงปริมาณรังสีแกมมาที่มีผลต่อการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีน โดยฉายรังสีแกมมาในปริมาณ 50, 100, และ 150 เมกะเรด ตามลำดับ แก่ตัวอย่างทัวร์มาลีนจากทวีปแอฟริกาเฉดสีต่างๆ คือ สีเขียว สีชมพู และสีเหลือง นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีด้วย การศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาพบว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนมีการเปลี่ยนแปลงสีที่ทุกความเข้มของรังสีแกมมาที่ทดสอบ โดยทัวร์มาลีนสีชมพูแสดงการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนที่สุดที่ความเข้มของรังสีแกมมา 100 เมกะเรด สอดคล้องกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นในช่วงของ Mn^{2+} และ Mn^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีชมพูในทัวร์มาลีน ส่วนทัวร์มาลีนสี

เขียวและสีเหลือง มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีในแต่ละความเข้มของรังสี

5. ปราณีย์ ไทยเที่ยง[5] พบว่า ทัวร์มาลินเมื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการฉายรังสีนิวตรอน จะทำให้มีความสวยงามมากขึ้นและไม่เกิดการจางสี จึงได้มีการทดลองฉายทัวร์มาลินจำนวน 13 เม็ด เพื่อต้องการเปลี่ยนสีด้วยรังสีนิวตรอนที่ Fluence 1.0×10^{16} n/cm² มีค่านิวตรอนฟลักซ์ 1.0×10^{11} n/cm²·s เป็นเวลา 30 ชม. ผลที่ได้ก่อนฉายรังสีนิวตรอน นำทัวร์มาลินไปวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR Spectroscopy ซึ่งจะพบการดูดกลืนแสงในช่วง 500 - 700 nm และจากการวัดปริมาณธาตุต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของทัวร์มาลินด้วยวิธี XRF ธาตุส่วนใหญ่ที่พบ คือ อะลูมิเนียม, ซิลิกอน, แคลเซียม, แมงกานีส, เหล็ก และเจอร์เมเนียม หลังจากฉายรังสีนิวตรอนแล้วเมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงจะพบการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วง 484-499 nm, 512- 522 nm และ 712-724 nm ซึ่งเป็นช่วงเดียวกับก่อนฉายรังสีนิวตรอนแต่มีค่าการดูดกลืนเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำทัวร์มาลินไปวัดหาธาตุด้วยวิธี NAA แบบ Qualitative จะพบแอนติโมนี-122, แอนติโมนี-124, แทนทาลัม-182, สแกนเดียม-46, แมงกานีส-54, สังกะสี-65 และแทนทาลัม-140 การเปลี่ยนสีของทัวร์มาลินเปลี่ยนจากใสเกือบไม่มีสีเป็นสีชมพูอมส้มและสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอมส้ม มีความเป็นไปได้ว่าพลังงานจากรังสีนิวตรอนทำให้แมงกานีสเกิดปรากฏการณ์คัลเลออร์เซนเตอร์ซึ่งทำให้เกิดสีชมพูในทัวร์มาลิน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทัวร์มาลีน (Tourmaline)[6], [7], [8], [9]

ทัวร์มาลีนเป็นหนึ่งในกลุ่มแร่ที่น่าสนใจในเชิงวิทยาศาสตร์ และเป็นอัญมณีที่โดดเด่นกว่าอัญมณีชนิดอื่น ด้วยเจดสีที่มีหลากหลาย ในผลึกเดียวกันอาจมีสองสีหรือมากกว่านั้น ซึ่งทัวร์มาลีนที่เจียรระไนจากผลึกนี้จะแสดงปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “parti-coloration” ในบางผลึกจะมีลักษณะเป็นเส้นหรือร่องที่สวยงามวิ่งผ่านไปตามผลึก ซึ่งเมื่อเจียรระไนผลึกเหล่านี้ให้ได้ลักษณะผลึกเป็นหลังเบี้ยจะแสดงปรากฏการณ์ตาแมว (Cat’s-eye effect)



รูปที่ 2.1 แสดงทัวร์มาลีนเจดสีต่างๆ

ชื่อของทัวร์มาลีนนั้นยังมีที่มาไม่ชัดเจน แต่มีความเชื่อกันว่าน่าจะมาจากภาษาสิงหลที่ว่า “ทูร์มาลี (turмали)” ซึ่งเป็นชื่อที่พ่อค้าอัญมณีท้องถิ่นเรียกประยุกต์ตามเพทายสีเหลือง การใช้ชื่อนี้สำหรับทัวร์มาลีน กล่าวกันว่าเป็นการส่งของที่ผิดพลาดเป็นหีบห่อของทัวร์มาลีนภายใต้การใช้ชื่อนี้ มายังตัวแทนจำหน่ายหินมีค่าในเมืองอัมสเตอร์ดัมเมื่อปี 1703 จนชื่อนี้กลายเป็นที่นิยม ทัวร์มาลีนสีชมพูและสีแดงบางครั้งเรียกกันว่า รูเบลไลท์ (rubellite) สีน้ำเงินเรียกว่า อินดิโคไลท์ (indicolite) สีไม่มีสีเรียกว่า achroite สีน้ำตาลเรียกว่า dravite และที่พิเศษคือความหลากหลายของเจดสีแดงผสมสีม่วงซึ่งถูกเรียกว่า siberite ทัวร์มาลีนสีเหลืองและสีเขียว เป็นการเรียกชื่อของทัวร์มาลีนแบบง่ายๆ ด้วยการใช้ชื่อสีเติมไปข้างหน้า และที่จริงระบบการเรียกชื่อแบบนี้เป็นการเรียกชื่อที่ใช้กันกว้างขวางอยู่ในขณะนี้ ระบบชื่อที่เรียกตามจินตนาการกลับถูกกล่าวถึงน้อยลง

เหมือนกับทัวร์มาลีนสีดำทึบแสงซึ่งนักขุดแร่เรียกว่า ซอล (schorl) มักไม่พบบ่อยนัก ยกเว้นเป็นเครื่องประดับสำหรับไว้ทุกข์

จากที่กล่าวมาแล้วว่าทัวร์มาลีนมีเจดสีที่หลากหลาย และสามารถเรียกชื่อได้หลายแบบ ทั้งเรียกตามเจดสีหรือเรียกชื่อตามจินตนาการ แต่ก็มีชนิดและชื่อทางการค้าที่เป็นที่รู้จักกันดังนี้

Achroite	ใสไม่มีสี และไม่แสดงสีแฝด (dichroism) คำว่า “Achroite” มาจากภาษากรีก ซึ่ง a แปลว่าปราศจาก หรือไม่มีสี และคำว่า chroma แปลว่า สี
Buergerite	สีน้ำตาลบรอนซ์ (Bronzy brown) ตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ศาสตร์ Martin J. Buerger
Chromdravite	สีเขียวเข้ม เป็นสีที่ค่อนข้างหายาก
Dravite	สีเหลืองจนถึงสีดำอมน้ำตาล (brownish black) มีปริมาณธาตุแมกนีเซียมสูง คำว่า “Dravite” มาจากชื่อของแม่น้ำในประเทศออสเตรเลีย
Elbaite	มีหลายสี ตั้งแต่ สีเขียว ชมพู หรือใสไม่มีสี ผลึกมักจะเกิดเป็นแถบ ชื่อมาจากเกาะในทะเลเมดิเตอร์เรเนียนประเทศอิตาลี
Indicolite	สีน้ำเงินอมม่วงถึงอมเขียว เกิดจากธาตุเหล็ก คำว่า “indicum” มาจากภาษาละติน แปลว่าสีน้ำเงิน แหล่งที่พบเช่น บราซิล มาดากัสการ์ ไซบีเรีย
Liddicoatite	มีหลายสี โดยจะแสดงแถบบนผลึก คำว่า “Liddicoatite” มาจากชื่อของ Richard T. Liddicoat ซึ่งเคยเป็นประธานของสถาบันอัญมณีศาสตร์ของอเมริกา
Paraiba	สีเขียวอมน้ำเงิน เป็นที่นิยมและราคาสูงมาก เรียกชื่อตามเมืองในประเทศบราซิล
Rubellite	สีชมพูถึงแดง ส้ม ม่วง น้ำตาลแดง หรือสีชมพูอมม่วงถึงแดง มีลักษณะโปร่งใสถึงเกือบทึบแสง คำว่า “Rubellite” มาจากภาษาละติน แปลว่าสีอมแดง ซึ่งเป็นสีที่มีค่าที่สุดในทัวร์มาลีนด้วยกัน ธาตุให้สีคือแมงกานีส
Schorl	สีดำทึบแสง มักไม่นำมาทำเป็นเครื่องประดับ คำว่า “schorl” มาจากชื่อเหมืองเก่าแก่ในประเทศเยอรมัน

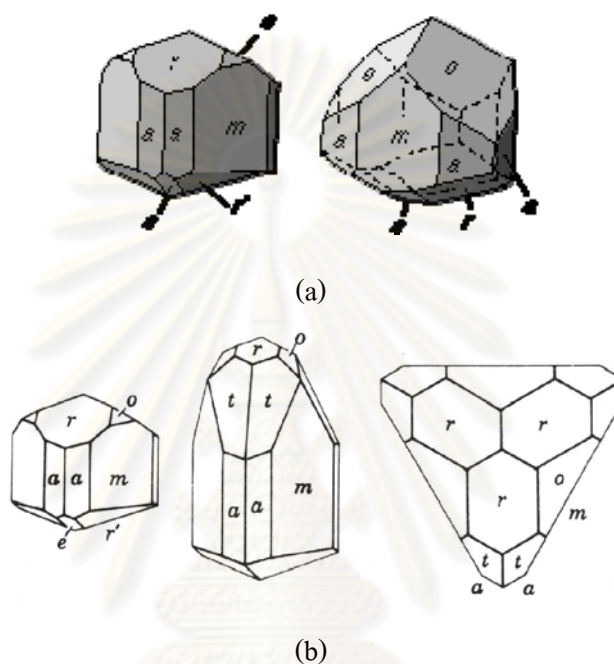
Uvite	สีน้ำตาลเข้มถึงดำ คำว่า “Uvite” มาจากชื่อจังหวัดในประเทศไทยศรีลังกา
Verdelite	สีเขียวอมเหลืองถึงเขียวอมน้ำเงิน ชาติให้สีคืออาตุเหล็ก โครเมียม และวานาเดียม ถ้าเป็นสีเขียวสดจะเรียกว่า โครมทัวร์มาลีน (Chrome Tourmaline) ชื่อเรียกมาจากคำว่า “Viridis” ในภาษาละติน
Watermelon	มีสีชมพูและเขียวในเม็ดเดียวกัน โดยมีสีชมพูอยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยสีเขียว ต้องตัดให้เป็นแผ่นบางๆ เพื่อให้เห็นสี
Cat's eye	มีสีเขียว น้ำเงิน หรือชมพู มีลักษณะคล้ายตาแมว (Chatoyancy) ซึ่งเกิดจากมลทินเส้นเข็มกลวงเรียงตัวกัน อย่างเป็นระเบียบ (hollow or liquid-filled tube or needles)
Parti-Colored	มีสีมากกว่า 1 สีในเม็ดเดียว ถ้ามีสองสีเรียกว่า bi-color ซึ่ง เป็นชนิดที่มีค่าและหายาก
Color Change	เป็นทัวร์มาลีนที่สามารถเปลี่ยนสีได้เมื่ออยู่ภายใต้แสงที่ แตกต่างกัน เช่น สีเขียวอมเหลืองในแสงแดด แต่เป็นสีแดง อมส้มในแสงไฟ เป็นชนิดที่หายากกว่าชนิดอื่นๆ



รูปที่ 2.2 ชนิดและชื่อทางการค้าของทัวร์มาลีน

2.1.1 สมบัติทางกายภาพ

ทัวร์มาลีนมีการตกผลึกจัดอยู่ในระบบเฮกซะโกนัล (Hexagonal Crystal System) หรือระบบทริโกนัล (Trigonal Crystal System) โดยทั่วไปผลึกจะมีลักษณะเป็นแท่งยาวเหมือนแท่งดินสอ มีเส้นหรือแถบลึกลายขนานไปตามความยาวของผลึก บางครั้งผลึกอาจเกิดเป็นชั้นๆ หรือเป็นแผ่น ปกติแล้วภาพตัดขวางของผลึกจะเป็นรูปเฉพาะ คือ เป็นรูปสามเหลี่ยมมุมตัดโค้งเมื่อมองลงตามความยาวของผลึก ปลายสองข้างประกอบด้วยฟอร์มผลึกที่ต่างกัน



รูปที่ 2.3 แสดงรูปผลึกของทัวร์มาลีน

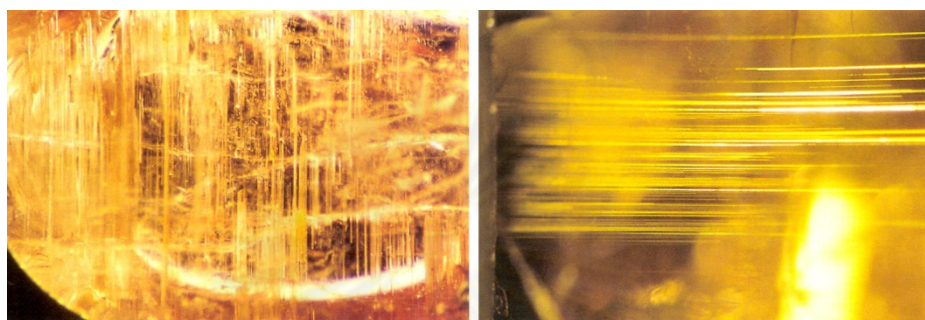
(a) รูปผลึกทั่วไปของทัวร์มาลีน

(b) มองตั้งฉากแกน c เห็นเป็นรูปสามเหลี่ยม ปลายสองข้างประกอบด้วยฟอร์มผลึกที่ต่างกัน

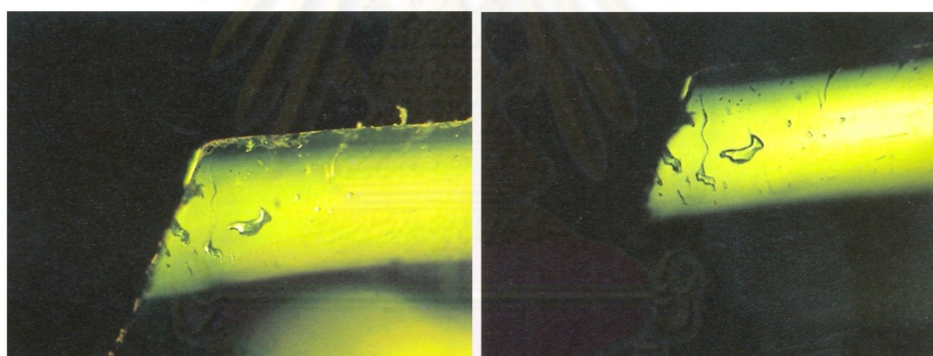
ความแข็ง (Moh's hardness) ของทัวร์มาลีนอยู่ที่ 7-7.5 รอยแตกเป็นแบบโค้งเว้า (Conchoidal) มีลักษณะคล้ายเปลือกหอย คือ เป็นวงซ้อนๆ กัน ความถ่วงจำเพาะมีค่า 3.06 (+0.2 ถึง -0.06) ซึ่งจำแนกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

Buergerite	3.31
Dravite	3.03-3.15
Elbaite	3.03-3.10
Liddicoatite	3.02-3.08
Schorl	3.10-3.25
Uvite	3.05

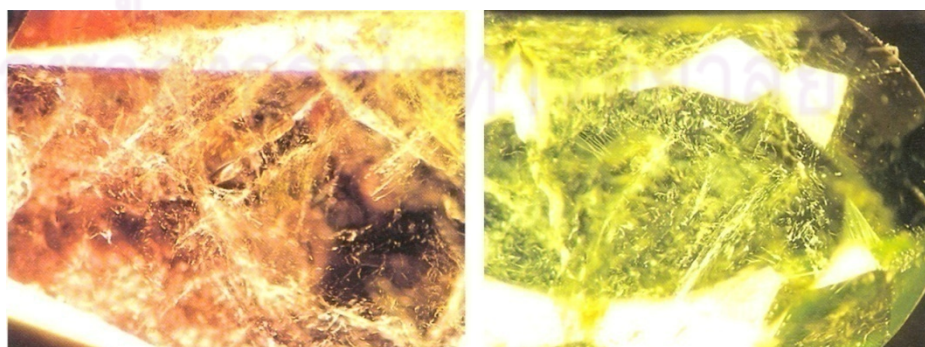
มลทินที่พบในทัวร์มาลีนโดยทั่วไปมักเป็นโพรง หรือท่อคล้ายเส้นด้าย (thread like cavities) ซึ่งอาจเกิดเป็นท่อเดี่ยว หรือเกิดเป็นรูปแบบคล้ายตาข่าย ส่วนมลทินสองสถานะ (two phase inclusion) จะพบว่า มีของเหลวและฟองอากาศเข้าไปอยู่ข้างในเสมอ และยังพบว่าในทัวร์มาลีนบางชนิดมักมีเส้นคล้ายท่อ (Tube) ที่ขนานตามความยาวของผลึกด้วย



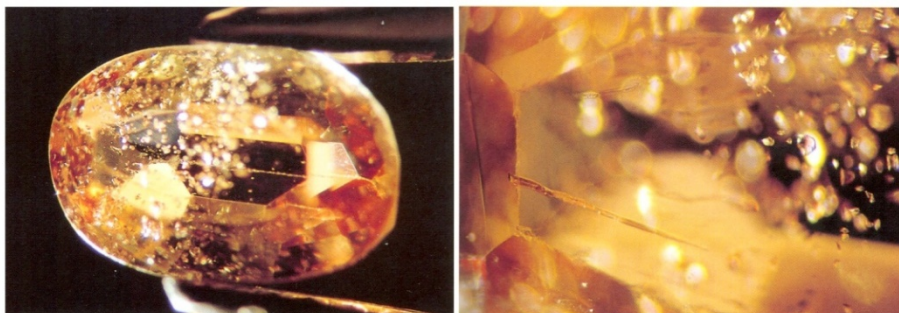
รูปที่ 2.4 ลักษณะตำหนิคล้ายเส้นด้ายและท่อที่เรียงขนานกันจำนวนมาก



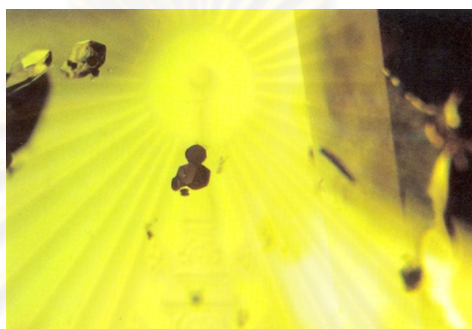
รูปที่ 2.5 ลักษณะตำหนิสองสถานะที่มีของแข็งอยู่ในของเหลว



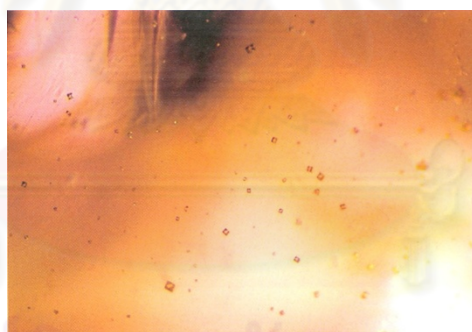
รูปที่ 2.6 ลักษณะตำหนิของเหลวที่กระจายทั่วตามรอยแตก



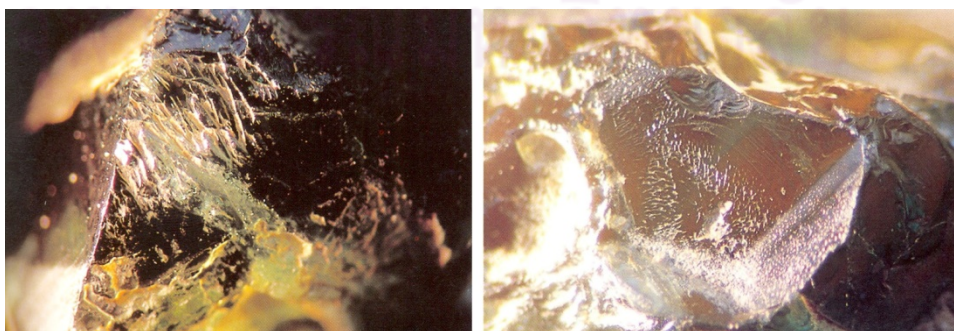
รูปที่ 2.7 ลักษณะตำหนิผลึกใสก๊ับของเหลว (thin film)



รูปที่ 2.8 ลักษณะตำหนิผลึกรูปหกเหลี่ยม อาจเป็นแร่อะพาไทท์ (apatite)



รูปที่ 2.9 ลักษณะตำหนิสองสถานะของเหลวและก๊าซ



รูปที่ 2.10 รอยแตกของตัวร่มาลินมีลักษณะการแตกเป็นเส้นใยคล้ายเส้นผม (trichites)

2.1.2 สมบัติทางเคมี

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบทั้งหมดของทัวร์มาลีนมีความซับซ้อนมาก และไม่มีสูตรเคมีที่สามารถบอกได้ชัดเจน สามารถเปลี่ยนแปลงได้มากมาย แต่มีสูตรทั่วไปสามารถเขียนได้คือ $\text{Na(R)}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH},\text{F})$

จากสูตรเคมีทั่วไปตรงตำแหน่ง R อาจมีธาตุเข้าไปแทนที่ได้หลากหลาย ซึ่งก็จะทำให้ทัวร์มาลีนเปลี่ยนชนิดไปด้วย ถ้ามีลิเทียมและอะลูมิเนียมเข้าไปแทนที่ ก็จะเรียกทัวร์มาลีนนี้ว่า elbaite ถ้าเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เข้าไปแทนที่ ทัวร์มาลีนนี้จะเรียกว่า buergerite ซึ่งเป็นทัวร์มาลีนสีน้ำตาลที่ไม่ค่อยให้ความสำคัญมากนัก แต่ถ้ามีเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) จะได้ทัวร์มาลีนสีดำนั่นเรียกว่า schorl ในขณะที่ถ้ามีแมกนีเซียมเข้าไปแทนที่ก็จะเรียกว่า dravite ซึ่งมีสีน้ำตาล นอกจากนี้แล้วยังมีทัวร์มาลีนอีกสองชนิดที่มีแคลเซียมเข้าไปแทนที่ตรงตำแหน่งของโซเดียม คือ uvite ซึ่งในตำแหน่ง R จะมีแมกนีเซียมอยู่เป็นส่วนใหญ่ แต่แทนที่จะเป็นสีน้ำตาลบางครั้งกลับเป็นสีเขียว และอีกชนิดหนึ่งคือ liddicoatite สูตรเคมีของทัวร์มาลีนที่สำคัญมีดังนี้

Buergerite	$\text{NaFe}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{30}\text{F}$
Chromdravite	$\text{NaMg}_3\text{Cr}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_4$
Dravite	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH})$
Elbaite	$\text{Na}(\text{Li}_{0.5}\text{Al}_{0.5})\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH})$
Ferridravite	$(\text{Na},\text{K})(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Fe}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH},\text{F})$
Liddicoatite	$\text{Ca}(\text{Li}_2,\text{Al}_7)\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3\text{F}$
Schorl	$\text{Na}(\text{Fe}_3)\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH})$
Uvite	$\text{CaMg}_3(\text{Al}_5\text{Mg})\text{B}_3\text{Si}_6\text{O}_{27}(\text{OH})_3(\text{OH},\text{F})$

2.1.3 สมบัติทางแสง

ทัวร์มาลีนมีคุณสมบัติทางแสงที่ได้ศึกษามาเป็นเวลานาน มีการศึกษาโดยนักอัญมณีศาสตร์หลายท่าน ซึ่งมีคุณสมบัติที่สามารถสรุปได้ดังนี้

ประกาย :	คล้ายแก้ว
ความโปร่งใส :	โปร่งแสง ถึง กึ่งโปร่งแสง หรือ ทึบแสง
สี :	ไม่มีสี, สีแดง, สีเขียว, สีชมพู, สีนํ้าเงิน, สีส้ม, สีนํ้าตาล และ สีดำ
สาเหตุการเกิดสี :	สีของทัวร์มาลีนเกิดจากไอออนของโลหะที่อยู่ใน โครงสร้าง โดยเกิดจากทั้งการดูดกลืนแสงของไอออนของโลหะอิสระ

(เช่น Fe^{3+} หรือ Cr^{3+}) และการดูดกลืนแสงของปฏิกิริยาระหว่างไอออน (เช่น $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$, $\text{Mn}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ หรือ $\text{Fe}^{2+}-\text{Fe}^{3+}$ IVCT) (IVCT = Intervalence Charge Transfer)

- สีแดง และสีชมพู ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ Mn^{3+}
- สีน้ำเงิน ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ Fe^{2+}
- สีเขียว ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT ร่วมกับ Fe^{2+} หรืออาจเกิดจาก Cr^{3+} หรือ V^{3+}
- สีเหลือง (คล้ายอำพัน) ถึงสีส้ม-น้ำตาล ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT
- สีเหลืองอมเขียว ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ Mn^{2+}
- สีส้มถึงสีส้ม-น้ำตาล ชาติที่เป็นสาเหตุการเกิดสี คือ $\text{Mn}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT
- สีดำ เกิดจากการที่มีปริมาณของ Fe, Mn และ Ti เป็นจำนวนมาก

ปรากฏการณ์ :

- ผลึกทัวร์มาลีนจะมีลักษณะ Chatoyancy เนื่องจากในโครงสร้างมีการเรียงตัวของมิลทิลแท่งเข็ม (needle) อยู่ใกล้ๆ กันเมื่อนำพลอยไปเจียรระนาบเป็นรูปหลังเบี้ย (cabochon) บางครั้งจะแสดงลักษณะ cat's eye ที่เกิดจากช่องว่างจำนวนมากที่วางตัวขนานกับแกน c ด้วย
- Color change หรือ alexandrite หายากมาก มีสี yellowish green ในแสงแดด แต่มีสี orangey red ในแสงไฟ

ค่าดัชนีหักเห :

ดัชนีหักเหแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าดัชนีหักเห

ชนิด	ค่า n	n_o	n_E
Buergerite		1.735	1.655
Dravite		1.635-1.661	1.610-1.632
Elbaite		1.640-1.655	1.615-1.620
Liddicoatite		1.637	1.621
Schorl		1.655-1.675	1.625-1.650
Uvite		1.632-1.638	1.612-1.621

ค่า Birefringence :	$(n_o - n_E)$	Buergerite	0.080
		Dravite	0.021-0.026
		Elbaite	0.017-0.024
		Liddicoatite	0.016
		Schorl	0.025-0.035
		Uvite	0.017-0.020

ค่าการกระจายแสง : 0.017

ลักษณะทางจักษุ : ยูนิแอกเซียลลบ (uniaxial -)

การเรืองแสง : ทัวร์มาลีนปกติจะไม่เรืองแสง แต่ทัวร์มาลีนสีชมพูจะเรืองแสงอ่อนๆ ให้สีแดง ถึงสีม่วงอ่อนๆ ทั้งในคลื่นสั้น (SWUV) และคลื่นยาว (LWUV)

- ทัวร์มาลีนสีชมพูจากประเทศบราซิล อาจเรืองแสงสีฟ้า หรือสีม่วง (lavender) ในคลื่นสั้น
- ทัวร์มาลีนสีเหลืองทอง, สีน้ำตาล และสีเขียวจากประเทศแทนซาเนีย จะเรืองแสงสีเหลือง ในคลื่นสั้น
- ทัวร์มาลีนสีเหลืองและสีชมพู จะเรืองแสงอ่อนๆ ภายใต้อินฟราเรดและคลื่นสั้น
- ทัวร์มาลีนไม่มีสี จากอัฟกานิสถาน จะเรืองแสงสี bright vivid violet

การดูดกลืนแสง : โดยทั่วไปพบว่าสเปกตรัมมีการดูดกลืนเห็นไม่ค่อยชัด (weak)

ทัวร์มาลีนสีฟ้าและสีเขียว การดูดกลืนแสงส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณสีแดงลงไปถึง 640 นาโนเมตร อาจจะมีแถบแคบ ๆ เห็นได้ชัดอยู่ที่ 498 นาโนเมตร

ทัวร์มาลีนสีแดง และสีชมพู จะมีแถบกว้างอยู่บริเวณสีเขียว และเห็นเป็นเส้นอยู่ที่ 458 และ 451 นาโนเมตร

การแสดงสีแฝด : เห็นได้ชัดเจน มีหลายสี ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงสีแฝดของทัวร์มาลีน

ชนิดของทัวร์มาลีน	“O” ray (O)	“E” ray (E)
Buergerite	Yellow brown	Very pale yellow
Dravite	Yellow	Colorless
	Orange-yellow	Pale yellow
	Dark green	Olive green
	Bluish green	Yellowish green
	Medium to dark brown	Yellowish to light brown
Elbaite	Medium pink	Light pink or colorless
	Green	Yellow to olive green
	Blue-green	Light green to purplish
	Blue	Colorless to pink to purple
Ferridravite	Dark brown to dark olive green	Light olive green to light brown
	Dark brown	Light brown
	Blue to greenish blue Green-brown	Yellow, yellow - brown, pale violet or colorless
	Dark brown	Rose brown
Uvite (like Dravite)		Yellow, light brown or yellowish blue - green
Chromdravite	Dark green	Yellow - green

2.1.4 การเกิด

ทัวร์มาลีนส่วนมากมักพบเป็นแร่รองรอย (accessory mineral) อยู่ในหินอัคนีและหินแปร สำหรับในหินอัคนีมักพบทัวร์มาลีนอยู่ในหินแกรนิต และหินแกรนิตเพกมาไทต์ ส่วนในหินแปรมักพบทัวร์มาลีนในหินไนส์ หินชีสต์ และหินแกรนูลอิต์ โดยที่ทัวร์มาลีนจะเกิดในโซนของการเปลี่ยนแปลงซึ่งเป็นผลมาจากการที่ก๊าซไปทำปฏิกิริยากับแร่ที่ตกผลึกก่อน ทัวร์มาลีนมักจะเกิดร่วมอยู่กับแร่ quartz, mica, corundum, apatite, spodumene, scapolite, topaz, albite, feldspar, beryl, garnet, amblygonite และ cassiterite สำหรับในหินแกรนิตเพกมาไทต์ทัวร์มาลีนถูกพบในโพรงหรือช่องว่าง และจะเกิดผลึกเป็นกลุ่มๆ ร่วมกับผลึก quartz นอกจากนี้ยังพบการสะสมตัวแบบตะกอนอยู่กับที่ ตะกอนเศษหินเชิงเขา และตะกอนน้ำพา มีรายงานการเกิดของทัวร์มาลีนแต่ละชนิดว่าจะเกิดในลักษณะหรือหินที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

- Buergerite จะเกิดอยู่ตามรอยแตกในหินไรโอไลต์ และอาจเกิดในแหล่งที่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากไอร้อนและแก๊สร้อน (pneumatolytic origin)
- Dravite และ Uvite มักเกิดในหินแปรที่มีแมกนีเซียมและแคลเซียมมาก และยังพบในหินพวกหินอ่อน หินตะกอน และหินอื่นๆ อีกด้วย
- Elbaite จะเกิดใกล้ๆ กับหินเพกมาไทต์ที่มีลิเทียมมาก โดยจะอยู่แยกกันเป็นส่วน แต่สำหรับ Elbaite Schorl ในหินชีสต์ไม่พบว่าเกิดร่วมกับหินเพกมาไทต์
- Ferridravite พบว่ามีการก่อผลึกเติบโตเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ในหินแอลคาไลแอมฟิโบลชีสต์ โดยพบว่ามี feldspar เกิดอยู่ด้วยมาก
- Liddicoatite บางครั้งพบในหินเพกมาไทต์ที่มีลิเทียมมาก แต่บางครั้งพบใน detrital soil
- Chromdravite เกิดใน micaceous metasomatite ที่มีโครเมียมและวานาเดียมอยู่มาก ซึ่งพบใน detrital soil บริเวณตอนกลางของประเทศรัสเซีย

สถานที่สำคัญที่พบทัวร์มาลีนคือใกล้กับเมือง Mursinka ในเทือกเขา Ural ของสหพันธรัฐรัสเซีย ซึ่งผลึกมีคุณภาพดี โดยปกติจะพบมีสีน้ำเงิน สีแดง หรือสีแดงอมม่วงในหินแกรนิตที่ฟอร์มตัวขึ้น สำหรับในที่อื่นๆ ของรัสเซียจะพบทัวร์มาลีนใกล้กับแม่น้ำ Uralga

ในทวีปแอฟริกาทัวร์มาลีนเป็นแร่ที่ตกผลึกในหินแกรนิตเพกมาไทต์ที่มีธาตุลิเทียมและโบรอน หรือในหินตะกอนที่มีธาตุโบรอนสูง ทัวร์มาลีนยังพบได้บางในหินแปรบางชนิด เช่น ในหินอ่อนที่เกิดจากกระบวนการแปรสัณพัทธ์ และในผนังของหินเพกมาไทต์ หรือของสายแร่ร้อนอุณหภูมิสูง คดขยกระบวนการแปรเปลี่ยนที่เรียกว่า tourmalinization แหล่งพลอยทัวร์มาลีนส่วนใหญ่โดยเฉพาะประเภท elbaite พบในหินเพกมาไทต์เท่านั้น และแม้ว่าหินเพกมาไทต์ที่

มีทัวร์มาลีนจะพบแพร่หลายทั่วไปหลายพันแห่งทั่วโลก แต่ที่มีทัวร์มาลีนที่มีคุณสมบัติทางอัญมณี และมีปริมาณมากพอแก่การผลิตในเชิงพาณิชย์กลับมีเพียงไม่กี่แห่งในโลก

ประเทศมาดากัสการ์เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่พบทัวร์มาลีน ซึ่งเป็นชนิด liddicoatite จัดเป็นทัวร์มาลีนประเภท calcium-rich lithium ทัวร์มาลีนชนิดนี้มีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางแสงคล้ายกับทัวร์มาลีน elbaite ทัวร์มาลีนชนิดนี้ถูกพบเมื่อปี ค.ศ. 1894 อยู่บริเวณตอนกลางของประเทศที่เมือง Anjanabonoina โดยพบอยู่ร่วมกับมอร์แกไนต์ซึ่งเป็นเบริลชนิดหนึ่ง ผลึกของทัวร์มาลีนชนิดนี้มีสีสวยงาม มักจะถูกนำมาแกะสลัก

ในช่วงฤดูร้อนปี ค.ศ. 1998 ได้มีการค้นพบทัวร์มาลีนที่เมืองโอบาดัน ประเทศไนจีเรีย โดยห่างจากชายแดนประเทศเบนินประมาณ 40 กิโลเมตร แหล่งที่พบนี้เป็นแบบตะกอนน้ำพา ทัวร์มาลีนที่พบเป็นทัวร์มาลีนที่มีคุณภาพดี ผลึกที่พบมีลักษณะผิวதாகเป็นฝ้า เป็นผลมาจากการสึกกร่อนขณะที่น้ำพัดพา แต่ก็ยังคงลักษณะหน้าผลึกหลงเหลืออยู่บ้าง แสดงให้เห็นว่าไม่ได้ถูกพัดพามาไกลนักจากแหล่งต้นกำเนิดดั้งเดิม ผลึกที่พบมีความใสสะอาดมาก และมีความหลากหลายของสี เช่น สีชมพูอ่อน สีชมพูราสเบอร์รี่ สีชมพูอมส้ม และสีแดงแบบไวน์เบอร์กันดีของประเทศฝรั่งเศส และบางผลึกยังแสดง โชนสีที่ชัดเจนอีกด้วย

2.2 การเพิ่มคุณค่าอัญมณีโดยการฉายรังสี[10]

การเปลี่ยนสีของอัญมณีโดยการฉายรังสี อาจกล่าวได้ว่า เริ่มตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 ตั้งแต่คูรี ได้บันทึกไว้ว่าหลอดแก้วที่บรรจุเรเดียมเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อปี 1809 ต่อมาในปี 1909 Crookes ได้รายงานการเปลี่ยนสีเพชรเป็นสีเขียวโดยการฉายรังสีจากเรเดียม ในปีเดียวกันนี้ Doelter ผู้ทำงานด้านนี้อย่างมาก ได้ชี้ให้เห็นว่า สีที่ได้จากการฉายรังสีจะจางลงเมื่อถูกแสงสว่าง ในปี 1927 Michel ได้รายงานโดยการรวบรวมจากรายงานการเปลี่ยนสีของอัญมณีต่างๆ ด้วยรังสีว่า เพชรเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเขียวและฟ้าได้ ควออตซ์เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล คอร์นดัมเป็นสีเหลือง ทัวร์มาลีนเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือเหลืองโทแพซเปลี่ยนเป็นสีส้ม และควีนไซต์เปลี่ยนเป็นสีเขียว

ในปัจจุบันข้อมูลการเปลี่ยนสีอัญมณีต่าง ๆ ด้วยรังสีเป็นที่ทราบกันดีเกือบหมดแล้ว ในกระบวนการเพิ่มคุณค่าอัญมณีโดยการฉายรังสี จะมีรังสีที่ใช้อยู่ คือ กลุ่มคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) และกลุ่มที่เป็นอนุภาค (Particle)

ตารางที่ 2.3 รังสีที่ใช้ฉายอัญมณีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของรังสี	ขนาดพลังงาน (อิเล็กตรอนโวลต์)	ความสม่ำเสมอ ของสีที่ได้	กำลังไฟฟ้า ที่ต้องใช้	การเกิด สารรังสี	ความร้อน ที่เกิดเฉพาะที่
<u>ก. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า</u>					
แสง	2-3	เปลี่ยนแปลง ไม่แน่นอน	ต่ำ	ไม่เกิด	ไม่เกิด
รังสีเหนือม่วง	5	-	-	-	-
รังสีเอกซ์	10,000	ไม่ดี	ปานกลาง	-	-
รังสีแกมมา	1,000,000	ดี	ไม่ต้องใช้	-	-
<u>ข. อนุภาค</u>					
นิวตรอน	1,000,000	ดี	สูงมาก	เกิด	ไม่เกิด
อิเล็กตรอน	1,000,000	ไม่ดี	สูง	ไม่เกิด	รุนแรงมาก
อิเล็กตรอน	10,000,000	-	-	เกิด	-
โปรตอน					
ควิเทอร์อน	1,000,000	-	-	-	เกิดบ้าง
แอลฟา ฯลฯ					

2.2.1 การฉายรังสี

ในกระบวนการเพิ่มคุณค่าอัญมณีโดยการฉายรังสี มีรังสีที่สำคัญอยู่ 3 ชนิด คือ นิวตรอนพลังงานสูง อิเล็กตรอนพลังงานสูง และรังสีแกมมา

นิวตรอน เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มีมวล 1.6747×10^{-24} กรัม เป็นองค์ประกอบของนิวเคลียสของเว็อนอะตอมของไฮโดรเจน เมื่ออยู่ในนิวเคลียสนิวตรอนจะเป็นอนุภาคที่อยู่ตัว แต่เมื่ออยู่เป็นอิสระจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอนและรังสีบีตาด้วยครึ่งชีวิต 12.8 วินาที นิวตรอนที่ใช้ในการฉายอัญมณีเป็นนิวตรอนพลังงานสูง 1 - 2 MeV (ล้านอิเล็กตรอนโวลต์) ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งให้นิวตรอนตั้งแต่พลังงานต่ำ จนถึงนิวตรอนพลังงานสูง นิวตรอนพลังงานต่ำชนิดที่เรียกว่า เทอร์มัลนิวตรอน ถูกจับได้ดีด้วยนิวเคลียสของธาตุ ซึ่งประกอบเป็นอัญมณีทำให้เกิดไอโซโทปรังสีในอัญมณีจากธาตุหลักและธาตุเจือปนปริมาณน้อยในอัญมณี จึงต้องกั้นไม่ให้เทอร์มัลนิวตรอนเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุ โดยการบรรจุอัญมณีในภาชนะทำด้วยแคดเมียมก่อนนำไปอบนิวตรอน แคดเมียมจะทำหน้าที่กั้นเทอร์มัลนิวตรอนโดยการจับเทอร์มัลนิวตรอนส่วนใหญ่ไว้ปล่อยให้นิวตรอนพลังงานสูงเท่านั้นเข้าไปฉายอัญมณี แต่อย่างไรก็ตามยังมีเทอร์มัลนิวตรอนบางส่วนก่อให้เกิดสารไอโซโทปรังสีขึ้นได้บ้างในอัญมณีที่ฉายด้วยนิวตรอน สารไอโซโทปที่เกิดขึ้นนี้จะหมดไปด้วยการทิ้งไว้ให้สลายตัวไปเองตามธรรมชาติเท่านั้น การฉายรังสีนิวตรอนอัญมณีจะได้รับรังสีสม่ำเสมอตลอดทั้งก้อนของอัญมณีเช่นเดียวกับการฉายรังสีแกมมา ถ้าไม่มี

ไอโซโทปรังสีเกิดขึ้นจากการฉายนิวตรอน จะเป็นวิธีการที่ดีที่สุดในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีด้วยรังสี

อิเล็กตรอนพลังงานสูง เป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบ และมีมวลขณะนิ่ง 9.1085×10^{-28} กรัม เป็นรังสีที่ได้จากเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูง โดยทั่วไปนิยมใช้อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง 10 - 20 MeV การฉายอัญมณีด้วยอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดความร้อนเฉพาะที่ ในอัญมณีสูงมาก และอาจจะทำให้อัญมณีแตกได้ ดังนั้นจะต้องมีการระบายความร้อน โดยให้น้ำเย็นผ่านอัญมณีขณะฉายรังสีเนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงอาจเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ขึ้นบ้าง และอาจต้องใช้เวลาคอยให้รังสีลดลงอยู่ในระดับปลอดภัยเป็นเวลา 2 - 3 วัน ถึง 2 - 3 สัปดาห์ อิเล็กตรอนจะให้ปริมาณรังสีแก่อัญมณีสูงกว่ารังสีแกมมา เนื่องจากถ่ายทอดพลังงานเกือบทั้งหมดให้กับอัญมณี ดังนั้นการเปลี่ยนสีของอัญมณีจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า นั่นคือ การใช้เวลาฉายรังสีสั้นกว่าการฉายรังสี 2 - 3 ชั่วโมง อาจได้ปริมาณรังสีสูงถึงหมื่นล้านแรด

รังสีแกมมา เป็นรังสีที่ได้จากไอโซโทป ต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ส่วนใหญ่คือ โคบอลต์-60 ซึ่งเป็นไอโซโทปกัมมันตรังสีของโคบอลต์ มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 60 หน่วย ไม่ปรากฏอยู่ในธรรมชาติ แต่ผลิตขึ้นโดยการนำเอานิวไคลด์ที่เสถียร คือ โคบอลต์-59 ไปฉายรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โคบอลต์-60 มีค่าครึ่งชีวิต 5.27 ปี ซึ่งมีการสลายตัวไปเป็น นิกเกิล-60 โดยการปล่อยอนุภาคบีตาพลังงาน 0.318 MeV และให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.17 MeV กับ 1.33 MeV ซึ่งรังสีแกมมานี้นำมาฉายรังสีได้ รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการฉายรังสีอัญมณีด้วยรังสีแกมมา ไม่ก่อให้เกิดไอโซโทปรังสีภายในเนื้ออัญมณี ทั้งนี้เพราะรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 พลังงานไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการก่อกัมมันต์ (Activation) จัดว่าเป็นการฉายรังสีซึ่งได้อัญมณีที่ปลอดภัยที่สุด แต่การเปลี่ยนแปลงของสีจะได้ผลน้อยกว่ารังสีอื่นๆ

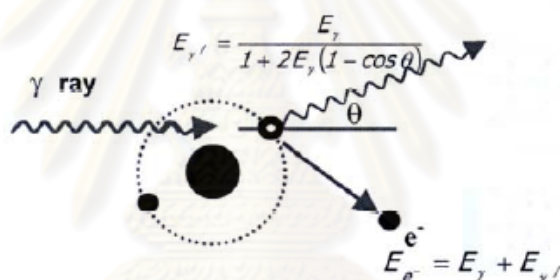
การฉายรังสีแกมมาในห้องปฏิบัติการ ส่วนมากจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่าแกมมาเซลล์ (Gamma Cell) โดยเซลล์แกมมามีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกที่ทำด้วยตะกั่วหนักประมาณ 3800 กิโลกรัม สูงประมาณ 1.5 เมตร ภายในแท่งทรงกระบอกมีโพรงที่บรรจุสารรังสีที่ให้รังสีแกมมาอยู่ภายใน สารรังสีดังกล่าวอาจจะเป็นโคบอลต์-60 หรือซีเซียม-137 ซึ่งเป็นไอโซโทปของโคบอลต์ และซีเซียมที่ให้รังสีแกมมา ตามลำดับ เมื่อต้องการฉายรังสีก็นำเอาตัวอย่างใส่เข้าไปในโพรงดังกล่าว โดยช่วงเวลาที่ใส่จะนานเพียงใดขึ้นกับความเข้มของรังสีและสารตัวอย่างแต่ละชนิด ข้อเสียของการใช้เซลล์แกมมาก็คือ สารรังสีที่ให้รังสีแกมมามีการสลายตัวตลอดเวลา อย่างเช่นโคบอลต์-60 มีค่าครึ่งชีวิต 5.27 ปี หมายความว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 ปี ปริมาณรังสีแกมมาที่ได้จากโคบอลต์-60 จะลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง ทำให้เมื่อใช้งานไประยะหนึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนสารรังสีอยู่เสมอ อันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อสสาร [11] จะแบ่งได้ 3 แบบ คือ

ก. ปฏิกริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) เป็นปฏิกริยาที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อะตอมของหัววัด ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดโฟโตฟิคนบนสเปกตรัมรังสีแกมมาดังรูป



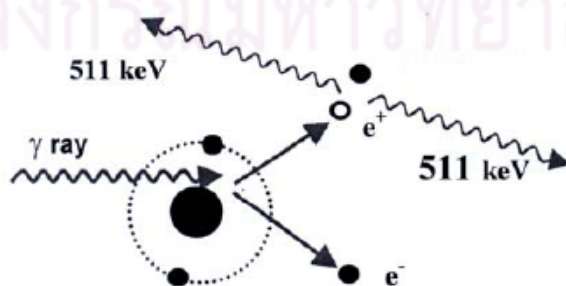
รูปที่ 2.10 แสดงปฏิกริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ข. ปฏิกริยาคอมพ์ตัน (Compton effect) เป็นปฏิกริยาที่รังสีแกมมาถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้แก่อะตอมของหัววัดอิเล็กตรอนอิสระที่มีพลังงานต่อเนื่อง โดยมีค่าขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบของรังสีแกมมา ทำให้เกิดแถบพลังงานต่อเนื่องของคอมพ์ตัน (Compton continuum) ดังรูป



รูปที่ 2.11 แสดงปฏิกริยาคอมพ์ตัน (Compton effect)

ค. ปฏิกริยาการผลิตคู่ (Pair production) เป็นกระบวนการที่รังสีแกมมาทำปฏิกริยากับสนามของนิวเคลียส ทำให้พลังงานเปลี่ยนเป็นมวลของอนุภาคและปฏิอนุภาค ได้แก่ อิเล็กตรอน (e^-) และโพสิตรอน (e^+) ซึ่งโพสิตรอนที่หมดพลังงานจะรวมกับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดปฏิกริยาทำลาย (Annihilation) กลายเป็นรังสีแกมมา 2 ตัว มีพลังงาน 511 keV วิ่งไปในทิศตรงข้ามดังรูป

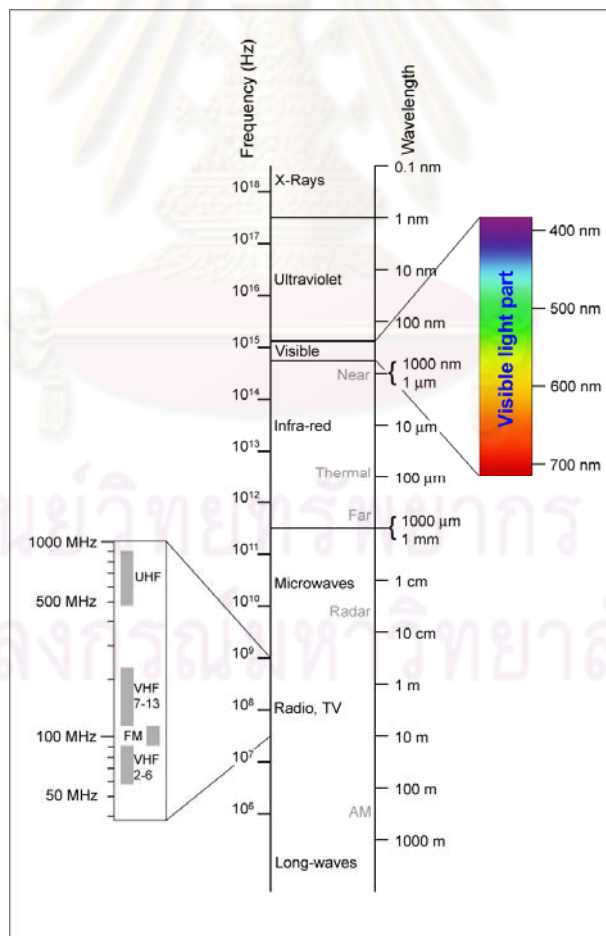


รูปที่ 2.12 แสดงปฏิกริยาการผลิตคู่ (Pair production)

2.2.2 การเกิดสีในอัญมณี

สีเป็นคุณสมบัติประการหนึ่งของอัญมณี ที่ทำให้อัญมณีเกิดความสวยงาม การที่เรามองเห็นอัญมณีเป็นสีต่างๆ ได้เนื่องจาก แสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่นัยน์ตามนุษย์มองเห็นได้ ตกกระทบอัญมณีแล้วเกิดการสูญเสียพลังงานให้กับอัญมณีไว้บางส่วน แสงส่วนที่เหลือสะท้อนเข้าสู่ตามนุษย์ ด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกันนั้น จะถูกตรวจจับได้ด้วยดวงตาของมนุษย์ ซึ่งจะแปลผลด้วยสมองให้เห็นเป็นสีต่างๆ

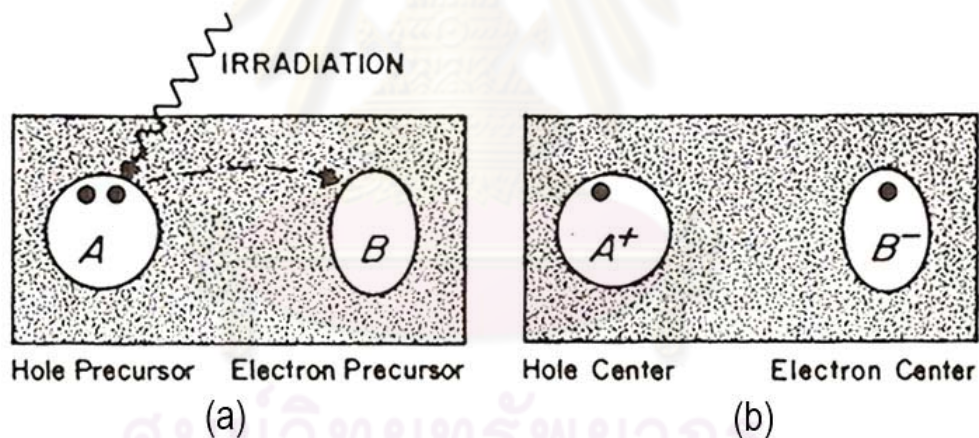
แสง คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ชนิดหนึ่ง แสงที่ตามองเห็น (Visible light) เป็นเพียงส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงซึ่งประสาทตาของมนุษย์สามารถสัมผัสได้ ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400 – 700 นาโนเมตร (1 เมตร = 1,000,000,000 นาโนเมตร) หากนำแท่งแก้วปริซึม (Prism) มาหักเหแสงอาทิตย์ เราจะเห็นว่าแสงสีขาวถูกหักเหออกเป็นสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง คล้ายกับสีของรุ้งกินน้ำ เรียกว่า “สเปกตรัม” (Spectrum) ดังรูปที่ 3 แสงแต่ละสีมีความยาวคลื่นแตกต่างกัน สีม่วงมีความยาวคลื่นน้อยที่สุด สีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับสาเหตุการเปลี่ยนสีของอัญมณีหลังฉายด้วยรังสีนั้น ยังไม่มีข้อมูลที่สามารถอธิบายได้อย่างแท้จริง แต่อย่างไรก็ตามก็สามารถทำความเข้าใจในหลักสำคัญได้ว่าการเปลี่ยนสีของอัญมณีอาจเกี่ยวข้องกับสาเหตุ 2 รูปแบบคือ “ศูนย์กลางสี” (Color Centers) และ F center ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของอัญมณี

สารใดที่สามารถเกิดคัลเลอร์เซ็นเตอร์ได้จะประกอบด้วยพรีเคอร์เซอร์ (precursor) 2 แบบ ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวต่างกัน แบบแรก คือ โฮลเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์ (hole center precursor) ได้แก่ อะตอม ประจุ โมเลกุล สิ่งเจือปนหรือสิ่งบกพร่องอื่นๆ ซึ่งประกอบด้วยอิเล็กตรอน 1 คู่ เมื่ออิเล็กตรอนตัวหนึ่งถูกทำให้หลุดออกไปด้วยรังสีพลังงานสูง จะทำให้เกิดโฮลเซ็นเตอร์ แบบที่สอง คืออิเล็กตรอนเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์ (electron center precursor) ซึ่งได้แก่ อะตอม ประจุที่สามารถจับอิเล็กตรอนที่หลุดจากโฮลเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์ทำให้เกิดอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์ขึ้น ดังรูปที่ 2.14 บทบาทของการฉายรังสีคือการโยกย้ายอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดโฮลเซ็นเตอร์และอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์ขึ้นพร้อมๆ กัน สารส่วนมากที่ไม่มีอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์จะเป็นโฮลเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์แต่อย่างไรก็ดีถ้าอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้หลุดออกด้วยรังสีกลับมาที่เดิมทันทีสารนั้นจะไม่มีเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงเมื่อฉายรังสีวัสดุซึ่งอาจฟอร์มศูนย์กลางสี

ถ้าโฮลเซ็นเตอร์พรีเคอร์เซอร์เดิมเป็นกลางกำหนดเรียกว่า A ตามรูปที่ 2.14(a) แล้วโฮลเซ็นเตอร์ที่ได้จากการฉายรังสีก่อให้เกิดการเสียอิเล็กตรอนไปหนึ่งตัวจะมีประจุเป็นบวก A^+ ดังแสดงในรูปที่ 2.14(b) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์เดิมเป็นกลางซึ่งเรียกว่า B เมื่อจับอิเล็กตรอนหนึ่งตัว ทำให้กลายเป็นอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์ B โปรดสังเกตว่ายังไม่มีกรกล่าวถึงว่าหน่วยใด A, A^+, B หรือ B^- เป็นศูนย์กลางของสี

อิเล็กตรอนที่ไม่ได้อยู่เป็นคู่จะอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้โดยการดูดกลืนพลังงานจากลำแสงสีขาว ซึ่งจะมีสีบางสีของสเปกตรัมถูกดูดกลืนหายไป และปล่อยสีที่เหลือออกมา ไม่ว่า

โพลหรืออิเล็กตรอนเซ็นเตอร์สามารถก่อให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้ ถ้าเป็นโพลเซ็นเตอร์เพียงอย่างเดียวที่ดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นจะเกิดโพลคัลเลอร์เซ็นเตอร์และถ้าเป็นอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์อย่างเดียวที่ดูดกลืนแสงจะได้อิเล็กตรอนคัลเลอร์เซ็นเตอร์

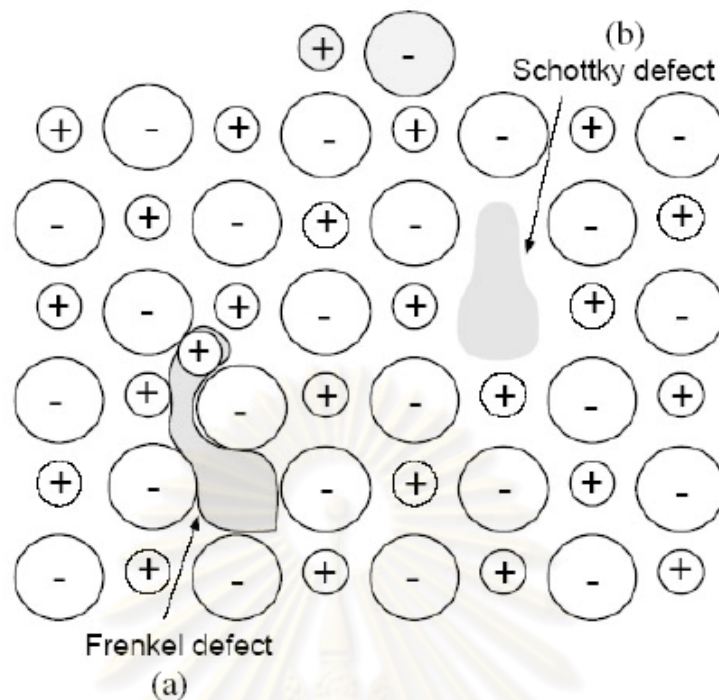
ถ้าแสงหรือความร้อนทำให้เกิดคัลเลอร์เซ็นเตอร์ที่ถูกกักหลุดจากอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์ B^- ตามรูป อิเล็กตรอนสามารถกลับไปยัง A^+ และทำให้อะตอมเปลี่ยนกลับไปเป็น A นั่นคือ สภาวะดั้งเดิมได้กลับคืนมาและสีจะหายไป ขบวนการนี้เรียกว่า การจางสี (Fading หรือ Bleaching) ถ้ากับดักอิเล็กตรอน (electron trap) ไม่แข็งแรงเพียงพอแค่อุณหภูมิห้องในเวลากลางคืนก็สามารถที่จะให้พลังงานเพียงพอ (ประมาณ 0.1 eV) ที่จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกกัก ถ้ากับดักมีความแข็งแรงขึ้นอาจต้องการแสงพลังงาน 1 ถึง 3 eV เพื่อทำให้เกิดการจางของสี เช่น ปรากฏการณ์ที่เกิดกับเบริลแมกซิซ (Mixixe beryl) และแซฟไฟร์สีเหลืองหรือโทแพสสีน้ำตาลที่เกิดจากการฉายรังสีและสีไม่อยู่ตัว กับดักที่แข็งแรงจะยึดอิเล็กตรอนอย่างมั่นคงจนกระทั่งไม่มีการจางของสีเมื่อถูกแสง เช่น ในควอร์ตซ์สีควันบุหรี่ (Smoky quartz) โทแพสสีฟ้า (Blue topaz) หรือโทแพสสีน้ำตาลที่มีสีอยู่ตัว การจางสีอาจต้องใช้ความร้อนสูงถึง 500 °C การจางสีแบบนี้ถ้ายังใช้เวลาและอุณหภูมิสูงขึ้นการจางสีจะยิ่งเกิดเร็วขึ้น

การฉายรังสีก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามที่แสดงในรูปที่ 2.14 เป็นที่น่าสังเกตว่าพลังงานที่ต้องการคือ พลังงานที่ก่อให้เกิด A^+ จาก A เมื่อการจางสีเกิดขึ้น ตัวที่ควบคุมขบวนการคือการเปลี่ยนจาก B^- เป็น B ในสารที่มีหนึ่งโพลคัลเลอร์เซ็นเตอร์ฟรีเคอเซอร์และศูนย์กลางเพื่อกักอิเล็กตรอน (electron-trapping center) ที่เป็นไปได้หลายศูนย์ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการฉายรังสีจะเป็นไปเหมือนกัน แต่อุณหภูมิที่ใช้ในการจางสีอาจแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ขึ้นกับอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์ซึ่งมีอยู่ในตัวว่าเป็นอย่างไร สิ่งนี้อธิบายว่าทำไมควอร์ตซ์สีควันบุหรี่ที่มาจากแหล่งต่างๆ กันสีจะจางหายไปในช่วงอุณหภูมิจาก 140°C ถึง 400°C สำหรับกรณีที่มีอิเล็กตรอนเซ็นเตอร์เป็นกับดักที่ทำให้เกิดสี บางทีอาจจะมีหลายโพลเซ็นเตอร์แตกต่างกัน ซึ่งแต่ละเซ็นเตอร์ต้องการพลังงานที่ต่างกันเพื่อก่อให้เกิดสีในตัวอย่างจากแหล่งต่างๆ และอัตราการเกิดสีในแต่ละตัวอย่างจะไม่เท่ากัน

สำหรับ F center เกิดจากในผลึกมีธาตุมลทินอยู่สูง เมื่อถูกฉายรังสีจะสามารถสร้างสีขึ้นได้ โดยจะเกิดความบกพร่องหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึก ซึ่งมีสองแบบคือ

- Frenkel defect เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดช่องว่างขึ้น เนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายไปจากโครงสร้าง แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างไอออนลบร่วมกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่ง ทำให้เกิดช่องว่างของไอออนบวกขึ้นดังแสดงในรูป 2.15(a)

- Schottky defect เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกจากโครงสร้างไป เพื่อรักษาประจุของโครงสร้างให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดช่องว่างสองช่องของไอออนบวกและไอออนลบ ดังในรูปที่ 2.15(b)



รูปที่ 2.15 (a) Schottky Defect (missing pair of ions)

(b) Frenkel Defect (cation in interstitial hole)

2.3 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน[12], [13]

การวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน เป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงนิวเคลียร์ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง หลักการของวิธีนี้ก็คือ การนำไอโซโทปเสถียรของธาตุไปทำปฏิกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอน จะเกิดเป็นไอโซโทปรังสี ตัวอย่างเช่น



ไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว คือ มีค่าครึ่งชีวิต (Half life) ค่าหนึ่ง ชนิดของรังสีและพลังงานของรังสีที่แผ่ออกมา ดังนั้น ถ้าทำการวัดรังสีที่แผ่ออกมา เช่น รังสีแกมมา เป็นต้น จากพลังงานของรังสีแกมมาที่วัดได้ จะทำให้สามารถระบุถึงชนิดของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้น จำนวนอะตอมของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยา หรือการอาบ $N(t_i)$ หาได้จาก

$$N(t_i) = \frac{N_0 \sigma \phi}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad \dots(2.2)$$

หรือ

$$A(t_i) = N_0 \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad \dots(2.3)$$

เมื่อ $A(t_i) =$ ค่ากัมมันตภาพของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดการอบ มีหน่วยเป็น dps
 $= \lambda N(t_i)$

$N_0 =$ จำนวนอะตอมของไอโซโทปเสถียรในสารตัวอย่าง

$\phi =$ นิวตรอนฟลักซ์ มีหน่วยเป็น $n/cm^2 \cdot sec$

$\sigma =$ ค่าภาคตัดขวาง (cross section) ในการจับนิวตรอนมีหน่วยเป็น barn (b)
 โดยที่ $1 b = 10^{-24} cm^2$

$\lambda =$ ค่าคงที่การสลายตัว (Decay constant) $= \frac{0.693}{T_{1/2}}$

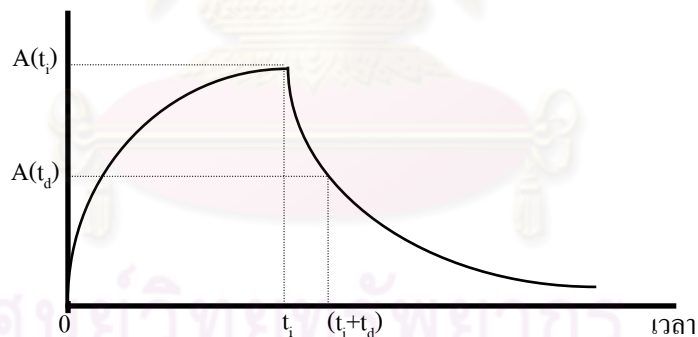
$t_i =$ เวลาที่ใช้ออบนิวตรอน (Irradiation time)

$T_{1/2} =$ ครึ่งชีวิต (Half-life)

ค่ากัมมันตภาพของไอโซโทปรังสีที่เวลา t_d ใด ๆ เริ่มนับตั้งแต่สิ้นสุดการอบ $A(t_d)$ จะมีค่าลดลง เนื่องจากการสลายตัวของไอโซโทปรังสี และค่าดังกล่าว จะหาได้จาก

$$A(t_d) = A(t_i)e^{-\lambda t_d} \quad \dots(2.4)$$

$$A(t_d) = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t_i})e^{-\lambda t_d} \quad \dots(2.5)$$



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงการเกิดและการสลายตัวของไอโซโทปรังสี

2.3.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาว่าในสารตัวอย่างประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง โดยการนำสารตัวอย่างที่อบนิวตรอนแล้ว มาวัดพลังงานของรังสีแกมมาที่ให้ออกมา ในบางกรณีอาจจะมีการวัดค่าอายุครึ่งชีวิตด้วย จากข้อมูลพลังงานของรังสีแกมมา และอายุครึ่งชีวิต เมื่อนำมาเทียบกับข้อมูลอ้างอิง เช่น Gamma-Ray Catalogue เป็นต้น ก็จะสามารถระบุชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

2.3.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis)

เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่าง การวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีนิยมใช้ได้แก่วิธีเปรียบเทียบ (Comparative method) การใช้วิธีนี้สิ่งที่จำเป็นจะต้องมีก็คือ สารมาตรฐานซึ่งรู้ปริมาณที่แน่นอนของธาตุต่างๆ ที่ประกอบอยู่ สารมาตรฐานอาจจะใช้สารเคมีบริสุทธิ์ หรือเตรียมขึ้นเองโดยการผสมสารเคมีของธาตุต่างๆ เข้าด้วยกัน หรือการใช้สารมาตรฐานอ้างอิง (Standard reference material) ซึ่งเตรียมขึ้นโดยสถาบันมาตรฐานในต่างประเทศ

ในการวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุ มีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ

ก. เตรียมสารตัวอย่าง และสารมาตรฐาน

ข. นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานไปอาบรังสีนิวตรอน โดยใช้ตำแหน่งที่อาบที่เดียวกัน ใช้เวลาในการอาบเท่ากัน ทั้งนี้ก็เพื่อให้สารตัวอย่างและสารมาตรฐานได้รับนิวตรอนฟลักซ์เท่ากัน

ค. นำสารตัวอย่าง และสารมาตรฐานไปวัดรังสีแกมมา โดยใช้เวลาในการวัดเท่ากัน

ง. คำนวณหาพื้นที่สุทธิได้ฟิสิกของพลังงานรังสีแกมมาที่ให้ออกมาจากไอโซโทปรังสีที่ต้องการหาปริมาณ

จ. คำนวณหาปริมาณของธาตุ

วิธีการคำนวณหาปริมาณ

สมมติว่าทำการวัดรังสีของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน หลังจากสลายตัวเป็นเวลา t_{d1} และ t_{d2} ตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.5) จะเขียนได้ว่า

$$\text{สารตัวอย่าง} \quad A_x(t_{d1}) = N_x \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{d1}} \quad \dots(2.6)$$

$$\text{สารมาตรฐาน} \quad A_s(t_{d2}) = N_s \sigma \phi (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_{d2}} \quad \dots(2.7)$$

โดยที่ x และ s แทนสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ตามลำดับ เหาสมการที่ (2.6) หารสมการที่ (2.7)

$$\text{จะได้} \quad \frac{A_x(t_{d1})}{A_s(t_{d2})} = \frac{N_x e^{-\lambda t_{d1}}}{N_s e^{-\lambda t_{d2}}} \quad \dots(2.8)$$

ถ้ากำหนดให้

M_x และ M_s คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ตามลำดับ

C_x และ C_s คือความเข้มข้นของธาตุที่สนใจมีหน่วยเป็นร้อยละหรือ ppm (part per million) ในสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ตามลำดับ

W_x และ W_s คือ น้ำหนักของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ตามลำดับ และสามารถคำนวณได้จาก $W = \frac{M \times C}{100}$ ในกรณีที่ความเข้มข้นมีหน่วยเป็นร้อยละ

สำหรับจำนวนอะตอมของธาตุจะหาได้จาก

$$N = \frac{W \times \text{Avogadro Number}}{\text{Atomic mass}}$$

แทนค่าในสมการที่ (2.8) จะได้

$$\frac{N_x}{N_s} = \frac{W_x}{W_s} \quad \dots(2.9)$$

ค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของหัววัดรังสีหาได้จาก

$$\varepsilon = \frac{R}{A(t) \times I \times t_c}$$

เมื่อ R คือ จำนวนนับหรือพื้นที่สุทธิใต้พีคที่พลังงานของรังสีแกมมาของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{A_x(t_{d1})}{A_s(t_{d2})} = \frac{R_x}{R_s} \quad \dots(2.10)$$

แทนค่า สมการที่ (2.9) และ (2.10) ลงใน (2.8) จะได้

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{W_x e^{-\lambda t_{d1}}}{W_s e^{-\lambda t_{d2}}}$$

$$W_x = \frac{W_s R_x e^{-\lambda(t_{d2}-t_{d1})}}{R_s} \quad \dots(2.11)$$

ในกรณีที่ใช้ไอโซโทปรังสีที่วัดครึ่งชีวิตยาว $e^{-\lambda(t_{d2}-t_{d1})}$ จะมีค่าประมาณ 1 ดังนั้นสมการที่ (2.11)

จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$W_x = \frac{W_s R_x}{R_s} \quad \dots(2.12)$$

ถ้าต้องการทราบปริมาณของธาตุในหน่วยของร้อยละ ก็คำนวณได้จาก

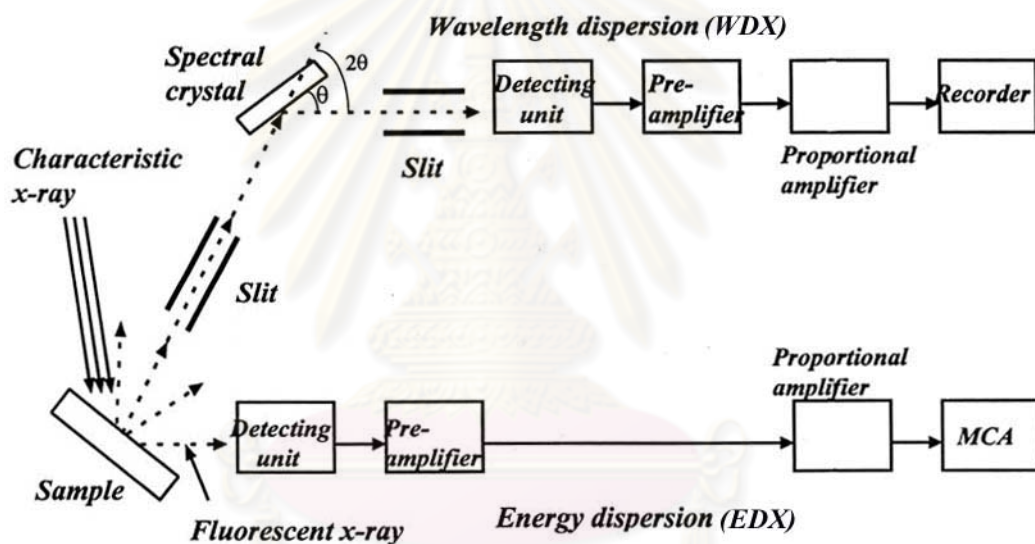
$$\text{ปริมาณเป็นร้อยละ} \quad C_x = \frac{W_x \times 100}{M_x} \quad \dots(2.13)$$

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์โดยการเรืองรังสีเอกซ์[14]

เทคนิคการวิเคราะห์โดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy: XRF) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) สามารถทำได้ทั้งวิเคราะห์ธาตุเดี่ยวๆ ทีละธาตุ (sequential) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อมกัน (simultaneous) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ทันสมัย มีความสามารถสูง ได้นำมาใช้ในระบบข้อมูลด้วยแล้ว ช่วยทำให้เทคนิคนี้ได้รับความนิยมมากขึ้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ

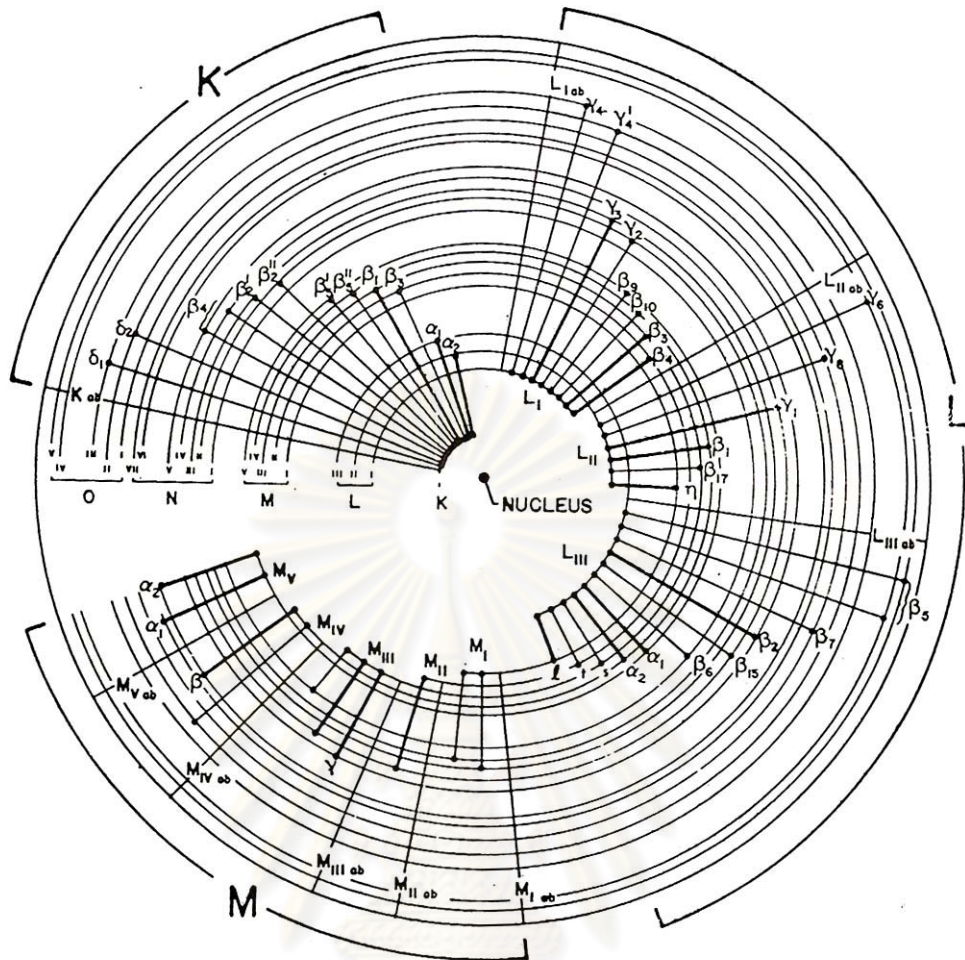
1. ระบบที่วัดความยาวคลื่น (Wavelength dispersive system, WDX)
2. ระบบที่วัดพลังงาน (Energy dispersive system, EDX)

ทั้งสองระบบนี้บางส่วนของเครื่องอาจเหมือนกัน และบางส่วนของเครื่องแตกต่างกัน ดังรูป



รูปที่ 2.17 แสดงแผนผังการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

รังสีเอกซ์เกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนในอะตอม (orbital electron) ถูกทำให้หลุดออกไปโดยวิธีใดก็ตาม จะเกิดการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงาน (shell) อื่นเข้ามาแทนที่ พร้อมกับปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่ารังสีเอกซ์ กระบวนการนี้เรียกว่า “การเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray fluorescence)” ดังรูปที่ 2.18 รังสีเอกซ์เรือง (fluorescence X-ray) ที่ได้ ออกมาจากแต่ละธาตุจะมีพลังงานหรือความยาวคลื่นเฉพาะตัวแตกต่างกัน เนื่องจากการจัดชั้นพลังงานของอะตอมของแต่ละธาตุไม่เหมือนกัน จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray) ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุจะเป็นปฏิภาคกับจำนวนอะตอมของธาตุนั้น ๆ



รูปที่ 2.18 แสดงการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงานอื่นเข้ามาแทนที่ โดยใช้ atomic model

การวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีการเรืองรังสีเอกซ์ ทำโดยการกระตุ้น (excite) ให้อิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสของอะตอมของธาตุในตัวอย่างหลุดออกไป เกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในวงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่า ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุในตัวอย่างออกมา การที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจรได้ ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้กระตุ้นจะต้องมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียส และจะเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ดีเมื่อพลังงานที่ใช้กระตุ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าแอมซอร์พชันเอจในแต่ละวงโคจรของอิเล็กตรอนนั้น ๆ

ค่าแอมซอร์พชันเอจ (absorption edges) คือความสามารถในการดูดกลืนโฟตอนของธาตุใด ๆ คูได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามขนาดของพลังงานที่ตกกระทบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะลดลงเมื่อพลังงานของโฟตอนเพิ่มขึ้น แต่จะมีพลังงานของ โฟตอนขนาดหนึ่งที่ธาตุสามารถดูดกลืนได้ดีเป็นพิเศษ เรียกว่า ค่าแอมซอร์พชันเอจ

2.4.1 การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

เมื่อทำการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากธาตุในตัวอย่าง ภายหลังจากกระตุ้นด้วยกลุ่มพลังงานที่เหมาะสม ด้วยระบบวัดรังสีเอกซ์แบบแยกพลังงาน จะได้สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะตัวแตกต่างกันตามชนิดของธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างนั้นๆ นำค่าพลังงานที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ K_{α} , K_{β} , L_{α} และ L_{β} ในตาราง Emission Energies Chart ทำให้หาธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างนั้นได้

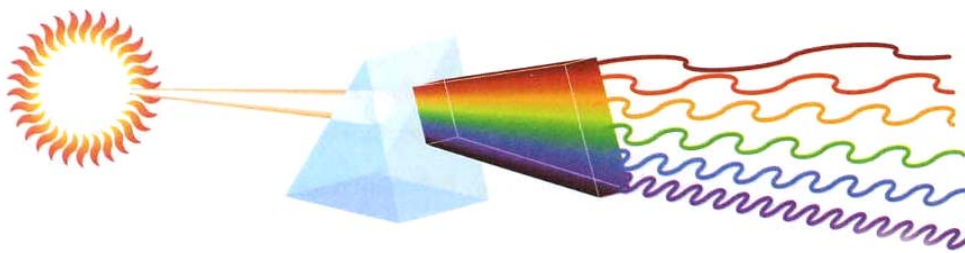
2.4.2 การวิเคราะห์เชิงปริมาณ

ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณสามารถทำได้โดยเปรียบเทียบความเข้มรังสีเอกซ์ที่ได้จากสารตัวอย่างกับความเข้มรังสีเอกซ์จากสารมาตรฐาน แต่สิ่งสำคัญที่จะเปรียบเทียบกันได้หรือไม่ นั้นขึ้นอยู่กับความใกล้เคียงกันขององค์ประกอบในสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน ถ้าใกล้เคียงกันมากๆ correction factor ก็จะมีค่าน้อย แต่ถ้าแตกต่างกันมาก ค่า correction factor ก็จะมีค่ามาก ความเข้มรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระบบวัดรังสี วัดได้ มักจะไม่แปรตามความเข้มข้นของธาตุในตัวอย่าง เนื่องจาก รังสีเอกซ์เฉพาะตัวจะมีพลังงานต่ำ จึงถูกดูดกลืนได้ง่ายโดยองค์ประกอบในตัวอย่างเอง (matrix composition หรือ matrix effect) ในทางปฏิบัติมีหลายวิธี เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้อง

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับสี [15], [16]

ทฤษฎี หมายถึง ความจริงที่ได้พิสูจน์แล้ว หรือหลักวิชา ส่วนคำว่า สี หมายถึง แสงที่มากกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าตาเรา ทำให้เห็นเป็นสีต่างๆ ดังนั้น ทฤษฎีสี หมายถึง หลักวิชาเกี่ยวกับสีที่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตา สีไม่ใช่คุณสมบัติของวัตถุ แต่เป็นการตอบสนองของเรตินาต่อพลังงานของแสงที่ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆ ที่สะท้อนมาจากวัตถุ ในช่วงคลื่นที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้ ซึ่งเป็นผลมาจากทั้งคุณสมบัติการกระจายแสงของแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องกระทบวัตถุ และการสะท้อนแสงที่ผิววัตถุ

ในราวปี ค.ศ. 1666 เซอร์ไอแซกนิวตันได้แสดงให้เห็นว่า สี คือส่วนหนึ่งในธรรมชาติของแสงอาทิตย์ โดยให้ลำแสงส่องผ่านแท่งแก้วปริซึม แสงจะหักเห เพราะแท่งแก้วปริซึม ความหนาแน่นมากกว่าอากาศเมื่อลำแสงหักเหผ่านปริซึมจะปรากฏแถบสีสเปกตรัมหรือที่เรียกว่า สีรุ้ง (Rainbow) คือ สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง เมื่อแสงตกกระทบโมเลกุลของสสาร พลังงานบางส่วนจะถูกคลื่นสีจากแสงบางส่วน และสะท้อนสีบางสีให้ปรากฏเห็นได้ พื้นผิววัตถุที่เราเห็นเป็นสีแดงเพราะวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่นไว้ สะท้อนเฉพาะแสงสีแดงออกมา วัตถุสีขาวจะสะท้อนแสงสีทุกสี และวัตถุสีดำจะดูดกลืนทุกสี



รูปที่ 2.19 การกระจายของแสงสีขาวเมื่อเดินทางผ่านปริซึม

ปัจจุบันสีที่ใช้จะมาจากการผสมของแม่สี แม่สีมีหลายประเภท ดังนั้นจะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับแม่สีให้ดีเสียก่อน จึงจะสามารถนำสีไปใช้ได้อย่างถูกต้อง แม่สีที่ใช้มีดังต่อไปนี้

1. แม่สีของนักฟิสิกส์ (spectrum primaries) มาจากสีของแสงสามารถผสมให้เกิดสีใหม่ได้ จากข้อตกลงทางวิทยาศาสตร์ได้กำหนดแม่สีของแสงไว้ 3 สี คือ สีแดง (red) สีเขียว (green) และสีน้ำเงิน (blue)

2. แม่สีของนักเคมี (pigmentary primaries) ตั้งคราะห์มาจากวัตถุโดยนักเคมี ซึ่งนำมาใช้กับวงการศิลปะ วงการอุตสาหกรรม โดยกำหนดแม่สีไว้ 3 สี คือ สีแดง (red) สีน้ำเงิน (blue) สีเหลือง (yellow)

3. แม่สีของนักจิตวิทยา สีในวัตถุและสีในแสงสว่างมาจากสีพื้นฐานหรือสีของแม่สีเพียง 3 สี แต่สีในการเห็นมีสีพื้นฐานหรือแม่สีอยู่ 4 สี ที่กำหนดเช่นนี้ก็เพราะว่าไม่มีสีใดที่ผสมกันด้วยสายตาแล้วจะก่อให้เกิดเป็น สีแดง สีเหลือง สีเขียว หรือสีน้ำเงิน ทั้ง 4 สีนี้จึงถูกกำหนดให้เป็นแม่สีของนักจิตวิทยา

4. แม่สีของนักออกแบบ ศิลปินชาวอเมริกันชื่อ มันเชลล์ (Munsell) ได้คิดระบบสี มันเชลล์ขึ้น โดยพิจารณาสีรุ้งที่เกิดจากลำแสงผ่านแท่งแก้วสามเหลี่ยม ได้พบว่า สีสัมผัสได้ซ้ำ จึงกำหนดให้มีแม่สีเพียง 5 สี ได้แก่ สีแดง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน สีม่วง โดยตัดสีส้มออก

การบอกค่าสีต่าง ๆ นั้นได้มีการจำแนกออกเป็นหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบก็มีลักษณะที่เหมาะสมกับงานแตกต่างกันไป ซึ่งโดยทั่วไปก็จะมีระบบการเห็นสีดังนี้

1. ระบบสี HSB/HLS (HSB/HLS Colors Model) เป็นสองรูปแบบพื้นฐานที่โปรแกรมคอมพิวเตอร์กราฟฟิคส่วนใหญ่นำไปใช้อ้างอิง เช่น โปรแกรม Photoshop, Page Maker เป็นต้น รูปแบบของสี HSB และ HLS มีโครงสร้างใกล้เคียงกับโครงสร้างในทฤษฎีสีของมันเชลล์ แต่มีรายละเอียดแตกต่างกันบางประการ ดังต่อไปนี้

Hue คือคุณสมบัติที่ระบุว่าเป็นสีใดสีหนึ่ง และมีความแตกต่างจากสีอื่น และสีนั้นเป็นสีประเภท Chromatic Color เช่น สีแดง สีเขียว สีเหลือง เป็นต้น ในรูปแบบ HSB ได้กำหนด Hue หรือสีหลักในวงจรัสสี เหมือนกับของมันเชลล์และได้วาง

ตำแหน่งเรียงลำดับเป็นรูปวงกลม ตามเข็มนาฬิกาเช่นเดียวกัน แต่แตกต่างกันตรงที่ได้แบ่งส่วนของวงสีออกเป็นองศา จำนวน 360 องศา โดยเริ่มตั้งแต่ 0 องศา ในตำแหน่งของสีแดง วนตามเข็มนาฬิกาจนครบรอบที่ 360 องศา ที่สีแดงเช่นเดิม และระบุค่าระหว่าง 0 - 360 องศา ด้วยตัวเลข

Saturation เป็นค่าบ่งชี้ความสดใสดิจิทัล และความหม่น ของสี (Hue ประเภท Chromatic Color) ที่เกิดจากการ ผสมของสีกลาง (เทา) มีค่าความแตกต่าง เป็นเปอร์เซ็นต์ เริ่มจาก 0% หมายถึง ไม่มีสี หรือสีหม่น ออกไปทางเทา ไป จนถึง 100% หมายถึงค่าของสีที่สดใส เจิดจ้าที่สุด

Lightness/Brightness เป็นค่าบ่งชี้ความสว่าง และความมืด ของสีประเภท Chromatic Color หรือสีกลาง (Neutral) คือ สีขาว สีเทา และสีดำ มีค่าความแตกต่างของน้ำหนักเป็นเปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับค่าของ Saturation เริ่มจาก 0% หมายถึง ไม่มีแสงสว่างหรือสีดำ ไปจนถึง 100% หมายถึง มีความสว่างที่สุด หรือ สีขาว ค่าน้ำหนักต่ำกว่า 50% จะดูคล้ำลง (Darker) ขณะที่ค่าน้ำหนักสูงกว่า 50% จะดูสว่างขึ้น (Lighter) Lightness / Brightness นี้ คล้ายกับค่า Value ของมันเชลล์

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบโครงสร้างรูปแบบสีของ Munsell/HSB/HLS

Munsell	HSB	HLS
Hue	Hue	Hue
Value	Saturation	Saturation
Chroma	Lightness	Brightness

2. ระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม จะเกิดแถบสีที่เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) ซึ่งแยกสีตามที่สายตามองเห็นได้ 7 สี คือ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง ซึ่งเป็นพลังงานอยู่ในรูปของรังสี ที่มีช่วงคลื่นที่สายตาสายตาสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงมีความถี่คลื่นสูงสุด คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วง เรียกว่า อุลตราไวโอเล็ต (Ultra Violet) และคลื่นแสงสีแดง มีความถี่คลื่นต่ำที่สุด คลื่นแสง ที่ต่ำกว่าแสงสีแดงเรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วง และต่ำกว่าสีแดงนั้น สายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ และเมื่อศึกษาดูแล้วแสงสีทั้งหมดเกิดจาก แสงสี 3 สี คือ สีแดง (Red) สีน้ำเงิน (Blue) และสีเขียว (Green) ทั้งสามสีถือเป็นแม่สีของแสง เมื่อนำมาฉายรวมกันจะทำให้เกิดสีใหม่ อีก 3 สี คือ สีแดงมาเจนน้ำ สีฟ้าไซแอน และสีเหลือง และถ้าฉายแสงสีทั้งหมดรวมกันจะได้แสงสีขาว จากคุณสมบัติของแสงนี้เรา ได้นำมาใช้ประโยชน์ทั่วไป ในการฉายภาพยนตร์ การบันทึกภาพวิดีโอ

ภาพโทรทัศน์ การสร้างภาพเพื่อการนำเสนอทางจอคอมพิวเตอร์ และการจัดแสงสีในการแสดง เป็นต้น

3. ระบบสี CMYK เป็นระบบสีชนิดที่เป็นวัตถุ คือสีแดง เหลือง น้ำเงิน แต่ไม่ใช่สีน้ำเงิน ที่เป็นแม่สีวัตถุธาตุ แม่สีในระบบ CMYK เกิดจากการผสมกันของแม่สีของแสง หรือระบบสี RGB คือ

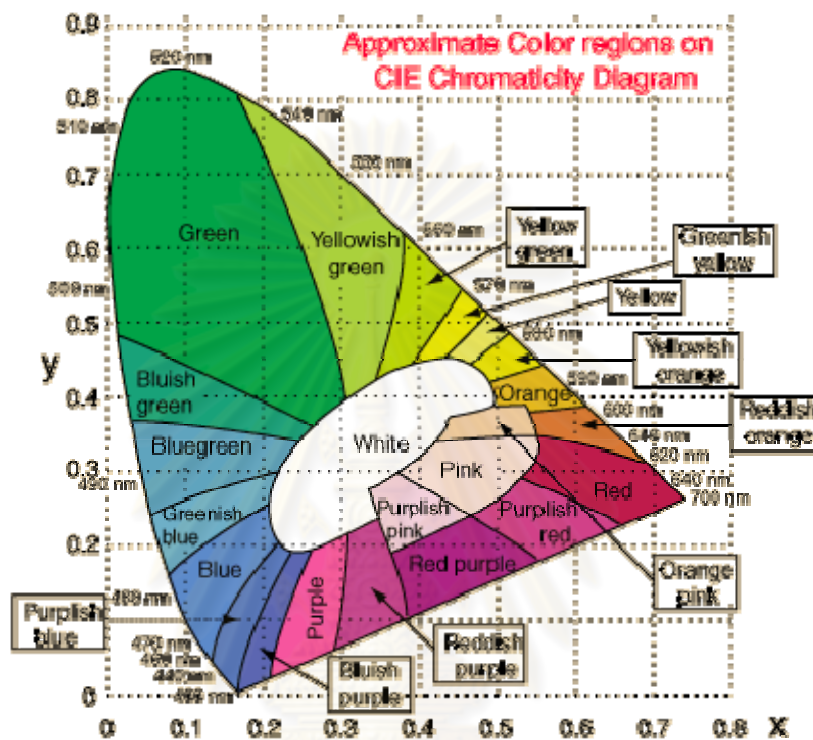
- แสงสีน้ำเงิน + แสงสีเขียว = สีฟ้า (Cyan)
- แสงสีน้ำเงิน + แสงสีแดง = สีแดง (Magenta)
- แสงสีแดง + แสงสีเขียว = สีเหลือง (Yellow)

สีฟ้า (Cyan) สีแดง (Magenta) สีเหลือง (Yellow) นี้นำมาใช้ในระบบการพิมพ์ และ มีการเพิ่มเติมสีดำเข้าไปเพื่อให้มีน้ำหนักเข้มขึ้นอีก เมื่อรวมสีดำ (Black = K) เข้าไป จึงมีสี่สี โดยทั่วไปจึงเรียกระบบการพิมพ์นี้ว่าระบบการพิมพ์สี่สี (CMYK) ระบบการพิมพ์สี่สีเป็นการพิมพ์ภาพในระบบที่ทันสมัยที่สุด และได้ภาพใกล้เคียงกับภาพถ่ายมากที่สุด โดยทำการพิมพ์ทีละสีจาก สีเหลือง สีแดง สีน้ำเงิน และสีดำ ถ้าลองใช้แว่นขยายส่องดูผลงานพิมพ์ชนิดนี้ จะพบว่า จะเกิดจากจุดสีเล็กๆ สีสีอยู่เต็มไปหมด การที่เรามองเห็นภาพมีสีต่างๆ นอกเหนือจากสี่สีนี้ เกิดจากการผสมของเม็ดสีเหล่านี้ในปริมาณต่างๆ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณเม็ดสี ซึ่งกำหนดเป็น 10, 20, 30 จนถึง 100 %

มาตรฐานของสีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายระบบด้วยกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วทุกมาตรฐานจะมีแนวคิดเดียวกันคือ การแทนจุดสีด้วยจุดที่อยู่ภายในสเปค 3 มิติ โดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นในสเปคซึ่งแต่ละแกนจะมีความเป็นอิสระต่อกัน ระบบสีที่นิยมใช้กัน ได้แก่

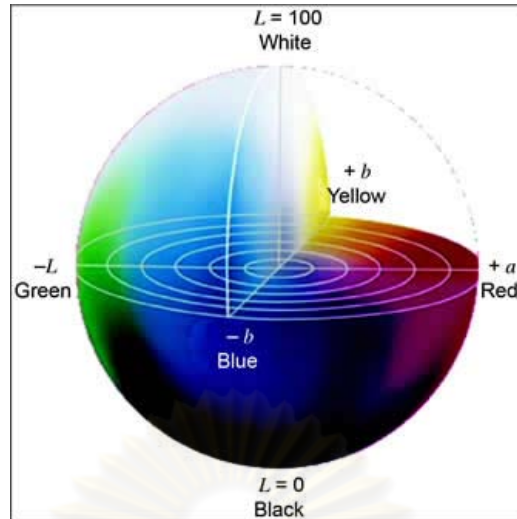
ระบบสีของ CIE (CIE color system) ระบบนี้ใช้หลักการเบื้องต้นที่ว่าสีใดๆ ก็ตามสามารถสร้างขึ้นได้จากการผสมกันของสีปฐมภูมิ 3 สี ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ โดยพัฒนามาจากระบบสี RGB ซึ่งมีพื้นฐานของการใช้สีปฐมภูมิแบบ 3 สี คือ สีแดง (R), สีเขียว (G) และสีน้ำเงิน (B) ในปี ค.ศ. 1928 ไรท์ (W.D.Wright) และกิลด์ (J.Guild) ประสบความสำเร็จในการตรวจวัดคลื่นแสงครั้งสำคัญ และได้รับการรับรองจาก Commission Internationale de l'Eclairage หรือ CIE ในปี 1931 โดยถือว่าเป็นการตรวจวัดมาตรฐานสามเหลี่ยมสี CIE เป็นภาพแสดงรูปสามเหลี่ยมเกือบกมั่ว นำเสนอไว้ในปี 1931 โดยการวิเคราะห์สีจากแสงสเปกตรัมสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสง แสดงถึงแสงสีขาวท่ามกลางแสงสเปกตรัมรอบรูปเกือบกมั่วโค้งรูปเกือบกมั่วแสดงความยาวคลื่นจาก 400- 700 นาโนเมตร สามเหลี่ยมสี CIE สร้างขึ้นตามระบบความสัมพันธ์พิกัด X และ Y คาร์เตเซียน ในทางคณิตศาสตร์จากมุมตรงข้าม 3 มุมของรูปเกือบกมั่ว คือสีน้ำเงินม่วงเข้มประมาณ

400 นาโนเมตร สีเขียวประมาณ 520 นาโนเมตร และสีแดงประมาณ 700 นาโนเมตร คือสีจากแสงที่จะนำมาผสมกันและก่อให้เกิดสีต่างๆ ขึ้น แสงสีแดงมีความยาวคลื่นสูงสุด แต่มีความถี่คลื่นต่ำสุด จะหักเหได้น้อยที่สุดและแสงสีม่วงจะมีความยาวคลื่นน้อยสุด แต่มีความถี่คลื่นสูงสุด และหักเหได้มากที่สุด



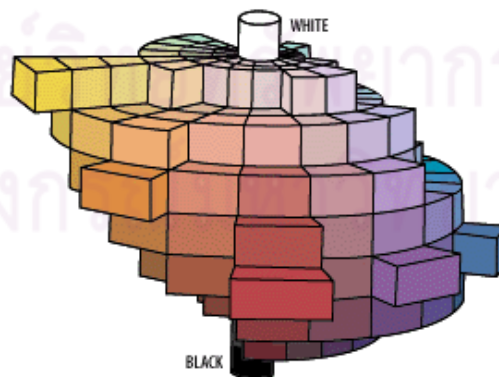
รูปที่ 2.20 โครงสร้างของสามเหลี่ยมสี CIE

ระบบ CIELAB เป็นระบบสีที่ครอบคลุมสีทุกสีที่ตามนุษย์มองเห็น ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และน้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึงลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังมีขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ L*-a*-b* ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า +L* แสดงถึงสีขาว จนไปถึง -L* แสดงถึงสีดำ แกน a* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว -a* ไปจนถึงแดง +a* ส่วนแกน b* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน -b* ไปเหลือง +b* ลักษณะการบรรยายสีของ CIE แสดงได้ดังรูปที่ 2.21

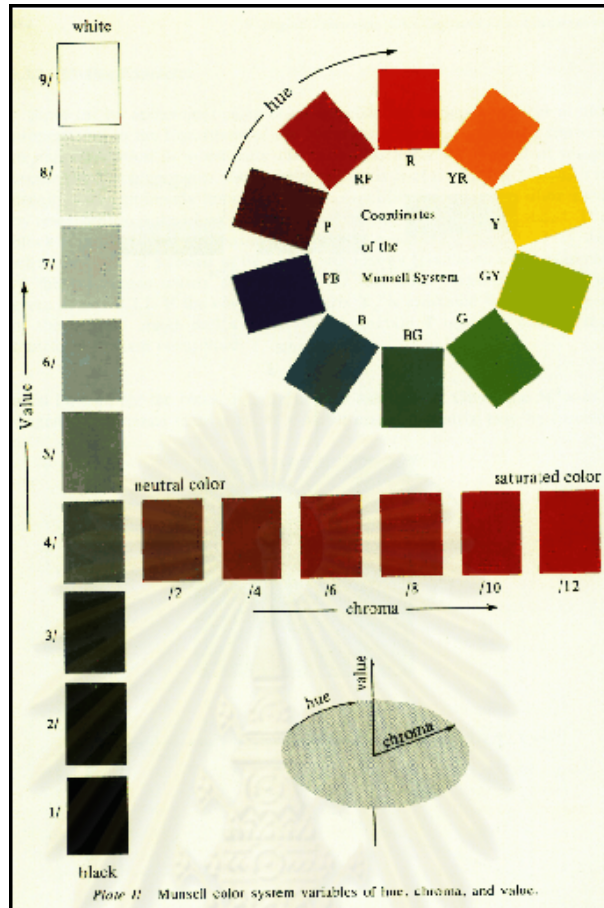


รูปที่ 2.21 การบรรยายสีของ CIELAB

ระบบสีของมันเชลล์ (The Munsell Colors System) ทฤษฎีสีของมันเชลล์เป็นทฤษฎีสี ที่มีอิทธิพลและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการสี ผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ก็คือ อัลเบิร์ต เฮนรี มันเชลล์ (Albert Henry Munsell) จิตรกรชาวอเมริกัน เมื่อปี ค.ศ. 1898 เขาได้ออกแบบผังของสีเป็นลักษณะรูปทรงกลม หรือผังที่มีการแผ่ กระจาย ของสี ออกจากศูนย์กลางเหมือนต้นไม้และกำหนดชื่อ และตำแหน่งของสีที่ผสมกันอย่างหลากหลายนี้ ออกเป็นตัวอักษร และตัวเลข มันเชลล์ตีพิมพ์ผลงานชิ้นคว้านี้ ในชื่อว่า Color Notation ในปี ค.ศ. 1905 และได้ถูกพิมพ์ซ้ำอีกนับไม่ถ้วนทำให้ทฤษฎีสีของมันเชลล์ ได้เป็นที่ยอมรับ กันอย่างกว้างขวาง และถูกนำมาใช้ศึกษา อ้างอิง ในวงการใช้สีในทุวงการ มาจนทุกวันนี้

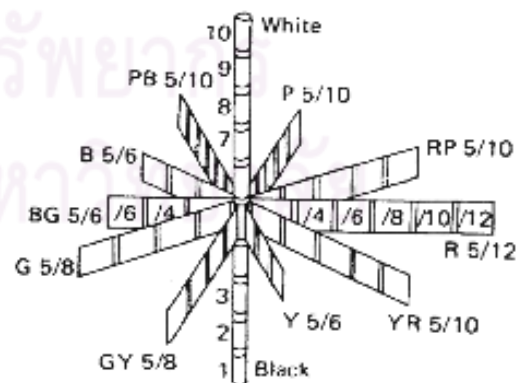


รูปที่ 2.22 Munsell Colos System

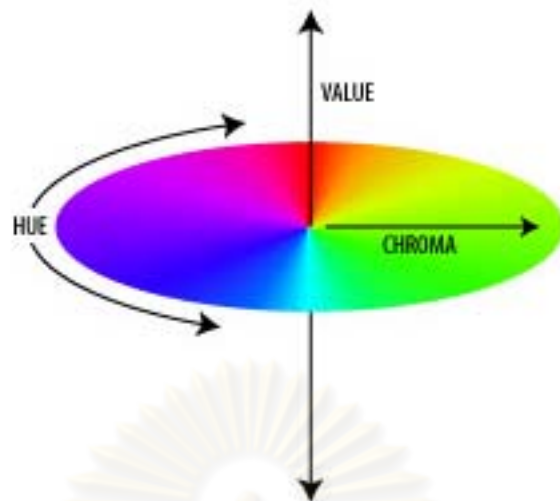


รูปที่ 2.23 แสดงงานค้นคว้าทฤษฎีสีของมันเชลล์

ทฤษฎีสีของมันเชลล์มีลักษณะกระจายออกจากแกนกลาง (Axis) แกนกลางนี้เป็นรูปทรงกระบอกตามแนวตั้ง กำหนดเป็นแกนของค่าน้ำหนักของสีกลาง (Neutral Grey Value) ส่วนบนของแกน กำหนดเป็นค่าน้ำหนักของสีขาวและส่วนล่างของแกน กำหนดเป็นค่าน้ำหนักของสีดำ ระหว่างสีขาวและสีดำ คือ น้ำหนักของสีเทา จากเทาแก่ไปเทาอ่อน จากแกนกลางกระจายออกโดยรอบ เป็นรัศมีวงกลม จะเป็นตำแหน่งของ Hue คือสีต่าง ๆ ประเภท Chromatic color โดย Hue จะมีจุดเริ่ม จากสีเทาในแกนกลาง ซึ่งสีเหล่านั้นจะมีความไม่สดใส (Low Chroma) พุ่งออกมาถึงเส้นรอบวง และสีนั้น จะมีความจัด หรือความสดใสเพิ่มขึ้น จนถึงสูงสุด (High Chroma) แสดงค่าของ Hue อย่างชัดเจน



รูปที่ 2.24 รูปแบบทฤษฎีสีของมันเชลล์



รูปที่ 2.25 แสดงตำแหน่งของ Hue / Value / Chroma ตามทฤษฎีสีของมันเซลล์

มิติของสีมันเซลล์ (Munsell's Dimension of Color) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ใน 3 มิติ (Three Dimension) คือ Hue / Value / Chroma ซึ่งความสัมพันธ์นี้ ทำให้ได้สีที่แตกต่างกัน ออกมามากมายนับไม่ถ้วน มีรายละเอียด ดังนี้

สีแท้ (Hue) คือคุณสมบัติที่ระบุว่าเป็นสีใดสีหนึ่ง และมีความแตกต่างจากสีอื่น และสีนั้นเป็นสีประเภท Chromatic Color เช่น สีแดง สีเขียว สีเหลือง เป็นต้นมันเซลล์ได้กำหนด Hue หรือ สีหลักในวงจรสี ของเขาไว้จำนวน 5 สี คือ

แดง (Red)

เหลือง (Yellow)

เขียว (Green)

น้ำเงิน (Blue)

ม่วง (Purple)



รูปที่ 2.26 สีหลักและสีรองในวงสีของมันเซลล์

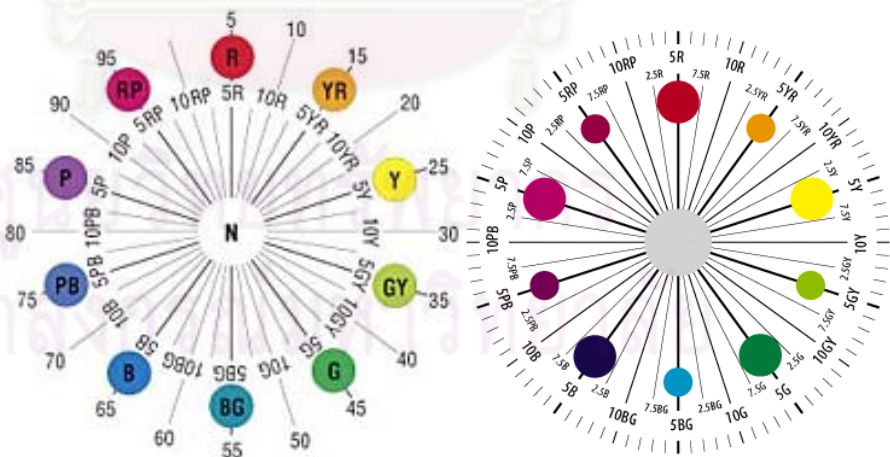
และได้วางตำแหน่ง เรียงลำดับเป็นรูปวงกลมตามเข็มนาฬิกา วนระยะห่างแต่ละสี เท่ากัน เริ่มจากแดง, เหลือง, เขียว, น้ำเงิน และ ม่วงแดง มันทเซลล์ได้กำหนดว่า สีหลักเหล่านี้ แต่ละสี จะผสมกันเรียงลำดับไปไปยังอีกสีหนึ่ง ก็จะได้สีใหม่ เพิ่มขึ้นมาอย่างไม่มีที่สิ้นสุด

ตัวอย่างเช่น เริ่มจากสีแดง ผสมกับสีเหลือง ในปริมาณต่าง ๆ ก็จะได้ Hue เพิ่มขึ้นมาไล่สีตั้งแต่ แดง ส้ม เหลือง เป็นต้น และทำในลักษณะเดียวกันนี้กับ สีหลักอื่น ๆ คือ เหลืองกับเขียว, เขียวกับน้ำเงิน, น้ำเงินกับม่วง และม่วงกับแดง ในที่สุดก็จะมาบรรจบกัน ที่จุดเริ่มต้นคือสีแดง

จากการผสมกัน ของสีหลัก 5 สี ก็จะเกิด สีใหม่เพิ่มขึ้นอีก 5 สี เป็นสีรอง แทรกระหว่างสีหลัก ในวงสีของมันทเซลล์ คือ

ส้ม	(Yellow Red)
เขียวเหลือง	(Green Yellow)
เขียวน้ำเงิน	(Green Blue)
ม่วงน้ำเงิน	(Purple Blue)
ม่วงแดง	(Red Purple)

สีหลัก และสีรองรวมกันเป็น 10 Hue เรียง อยู่ในวงสี ซึ่งมันทเซลล์ได้ กำหนด อักษรย่อของแต่ละสี โดยเริ่มจากสีแดง ดังนี้ R, YR, Y, GY, G, BG, B, PB, P, และ RP

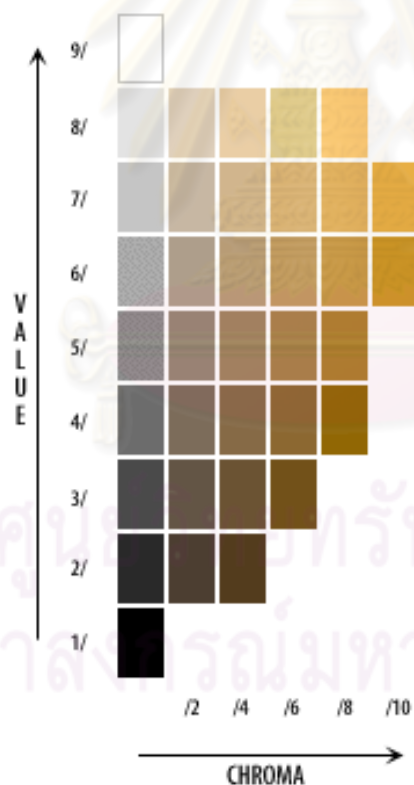


รูปที่ 2.27 วงสีของมันทเซลล์

มันทเซลล์ ได้แบ่งส่วนของวงสี ออกเป็น 100 ส่วน และใช้ตัวเลขกับชื่อ ย่อสี กำกับแต่ละสีของสีหลัก และสีรอง ดังนี้ 5R, 5YR, 5Y, 5GY, 5G, 5BG, 5B,

5PB, 5P, และ 5RP สำหรับการแบ่งส่วนและกำหนดตัวเลข ที่จะเอียง ระหว่างสี เหล่านั้นให้ศึกษาจากวงสีตัวอย่าง ซึ่งตัวเลขและตัวอักษร ที่กำกับสีนี้ เป็นค่า มาตรฐาน สำหรับนำไปใช้อ้างอิง ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป ตัวอย่างเช่น 5R หมายถึงสีแดงจัด 2.5RP คือสีแดงออกไปทางม่วง 2.5YR คือสีส้มออกไปทาง เหลือง เป็นต้น

ความสว่าง (Value) คือคุณสมบัติของค่าน้ำหนัก อ่อน แก่ ของสีประเภท Achromatic Color คือสีดำ สีเทา สีขาว โดยมีค่าน้ำหนักเริ่มจาก 1 คือน้ำหนักของสี ดำ จนถึงค่า 9 เป็นค่าน้ำหนักของสีขาว และระหว่างสีดำ กับสีขาวแบ่งเป็นน้ำหนัก ของสีเทา สีดำ สีขาว และสีเทานี้เรียกว่า สีกลาง (Neutral) คือเป็นสีที่ไม่มี คุณสมบัติของHue อยู่เลย แต่ค่าน้ำหนัก (Value) ของสีกลางนี้มันเซลล์ นำไปผสม กับสี (Hue) หรือสี Achromatic Color ทำให้ ได้ค่าน้ำหนักอ่อน แก่ ของสี ดัง ตัวอย่าง



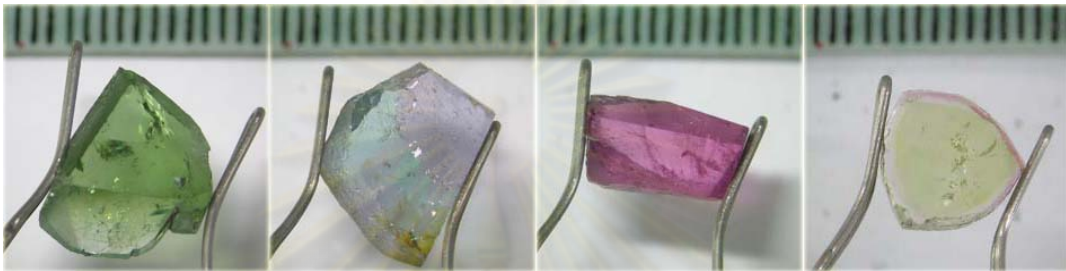
รูปที่ 2.28 แสดงระดับค่าของ Value และ Chroma

ความอึมตัวของสี (Chroma) คือ คุณสมบัติของสี (Hue) ที่ถูกผสมกับ สี กลาง (Neutral) ในระดับใด ระดับหนึ่ง (0 - 9) ทำให้ค่า Chroma ของสีนั้น อ่อนลง (Weak) และไล่ค่าน้ำหนัก จนกระทั่งสีนั้นมีค่าความจัดของสีสูง (High Chroma) หรือมีความอึมตัวของ สีสดใส (Saturation) ค่าจากความอ่อน จนถึงสดใสที่สุดของสีดังกล่าวนี้ เริ่ม จากค่า 1 (เทา) ออกไปไม่มีข้อกำหนดตายตัว ขึ้นอยู่กับค่า Chroma ของแต่ละ สี เช่น Hue ของสีเหลืองส้ม 5RP (Yellow-Red) มีตำแหน่ง Chroma สูงสุดที่ 7/10 และ 6/10 แต่ Hue ของสี ม่วงแดง 5RP (Red-Purple) มีตำแหน่ง Chroma สูงสุดที่ 7/26

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนหลังฉายรังสีแกมมามีตัวอย่างทัวร์มาลีนที่ใช้ในการทดลองนี้ทั้งหมด 37 ตัวอย่างโดยเป็นทัวร์มาลีนจากประเทศต่าง ๆ 4 ประเทศ ได้แก่ ประเทศอัฟกานิสถาน 8 ตัวอย่าง ประเทศไนจีเรีย 3 ตัวอย่าง ประเทศโมซัมบิก 15 ตัวอย่าง และประเทศบราซิล 11 ตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างทัวร์มาลีน

การทดลองเพื่อหาสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสีนั้น ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนหลังฉายรังสีแกมมา และการหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีน ซึ่ง วัสดุ เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการทดลองมีดังนี้

3.1 การตรวจสอบด้วยโพลาริสโคป

อุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องโพลาริสโคป (Polariscope) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้หา ลักษณะทางแสงของพลอยว่ามีลักษณะทางแสงเป็นหักเหเดี่ยวหรือหักเหคู่ ประกอบด้วยแผ่น โพลารอยด์ 2 แผ่น โดยแผ่นบนเรียกว่า แผ่นแอนนาไลเซอร์ (Analyzer) ส่วนแผ่นล่างเรียกว่า แผ่น โพลาริเซอร์ (Polarizer) ที่ทำหน้าที่บังคับให้แสงสั้นในทิศทางเดียวในแนวระนาบ แผ่น แอนนาไลเซอร์ และแผ่นโพลาริเซอร์จะวางอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งฉากกัน แผ่นโพลาริเซอร์ ที่อยู่ด้านล่างจะหมุนไม่ได้ ส่วนแผ่นแอนนาไลเซอร์ที่อยู่ด้านบนสามารถหมุนได้ 360 องศา แหล่งกำเนิดแสงของเครื่องจะอยู่ที่ฐานด้านล่างใต้แผ่นโพลาริเซอร์

วิธีการตรวจสอบทำได้โดย หมุนแผ่นแอนนาไลเซอร์ให้อยู่ในตำแหน่งมืด จากนั้น นำทัวร์มาลีนมาวางไว้ระหว่างแผ่นแอนนาไลเซอร์และแผ่นโพลาริเซอร์ ทำการหมุนทัวร์มาลีนไป จนครบหนึ่งรอบ (360 องศา) แล้วสังเกตความมืด-สว่างบนเม็ดทัวร์มาลีน โดยมองผ่านแผ่นแอนนาไลเซอร์ เพื่อแยกอัญมณี isotropic จากอัญมณี anisotropic



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องโพลาริสโคป (Polariscope)

3.2 การฉายรังสีแกมมาทัวร์มาลิน

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.2.1.1 ตัวอย่างทัวร์มาลิน

3.2.1.2 เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 Gamma cell 220 excel สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ

3.2.1.3 เครื่องวัดปริมาณรังสี (Dosimeter)

3.2.1.4 ภาชนะสำหรับวางตัวอย่าง (กระบอ กอะลูมิเนียม)

3.2.1.5 ถุงพลาสติกสำหรับใส่ตัวอย่างทัวร์มาลิน

3.2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.2.1 บรรจุตัวอย่างทัวร์มาลินใส่ถุงพลาสติก แล้วนำไปวางในกระบอ กอะลูมิเนียม โดยให้ตัวอย่างทัวร์มาลินทั้ง 37 ตัวอย่างอยู่สูงจากก้นกระบอ ก 10 เซนติเมตร

3.2.2.2 ติดเครื่องวัดปริมาณรังสี 4 ตัว เพื่อหาค่าเฉลี่ยของปริมาณรังสีที่ตัวอย่าง ทัวร์มาลินได้รับ

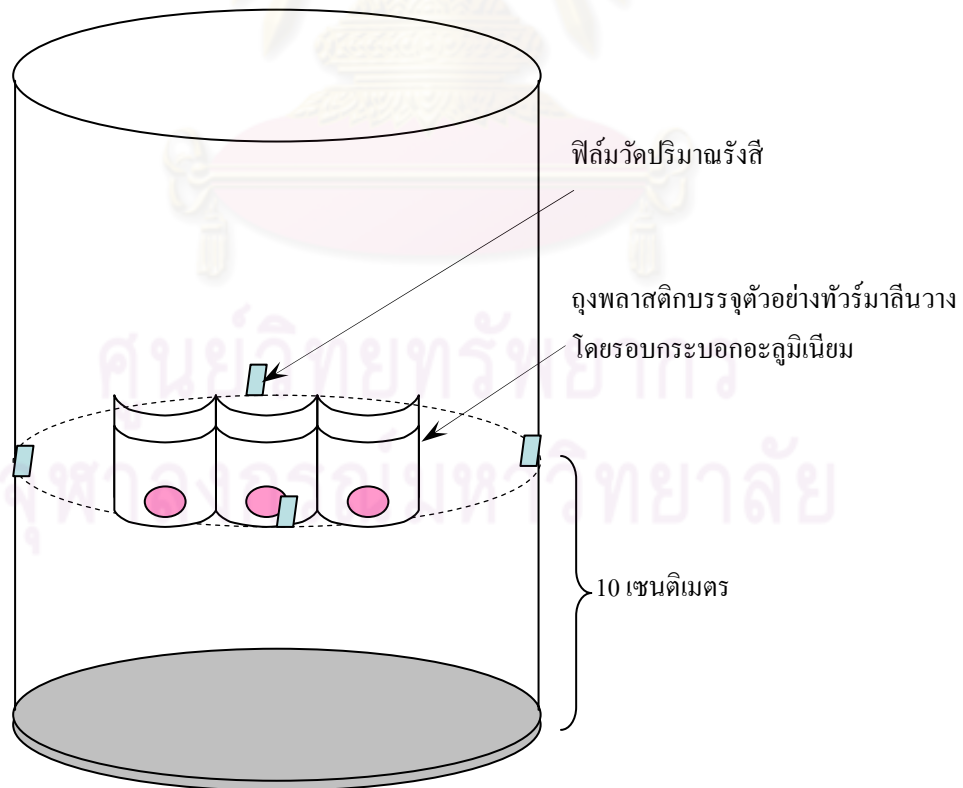
3.2.2.3 วางกระบอ กอะลูมิเนียมลงในช่องฉายของเครื่องฉาย Gamma cell 220 excel ซึ่งให้รังสีแกมมาจาก Co-60 ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ฉายรังสีเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อหาปริมาณรังสีดูดกลืน ณ ตำแหน่งวางตัวอย่าง

3.2.2.4 หาปริมาณรังสีดูดกลืน ณ ตำแหน่งวางตัวอย่าง โดยนำเครื่องวัดปริมาณ รังสี 3 ตัวไปอ่านค่า ได้ปริมาณรังสีดูดกลืน ณ ตำแหน่งวางตัวอย่าง 9.67 กิโลเกรย์ต่อชั่วโมง (kGy/hr.)

3.2.2.5 นำกระบอ กอะลูมิเนียมที่บรรจุตัวอย่างทัวร์มาลินวางลงในช่องฉายของ เครื่องฉาย Gamma cell 220 excel ของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ แล้วทำการฉายรังสีจนตัวอย่าง ได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 เครื่องฉายรังสีแกมมาจาก Co-60 Gamma cell 220 excel สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ



รูปที่ 3.4 การวางตัวอย่างทัวร์มาลีนและการติดตั้งเครื่องวัดปริมาณรังสีในกระบออะลูมิเนียม

3.3 การประเมินสีของทัวร์มาลีน

การประเมินค่าสีของทัวร์มาลีนจะทำการบันทึกค่าทั้งก่อนและหลังฉายรังสีแกมมาให้ทัวร์มาลีน โดยจะใช้ทั้งชุดเทียบสีมาตรฐานของมัลเซลล์ และวิธีการถ่ายภาพ ซึ่งในการประเมินโดยการใช้ชุดเทียบสีมาตรฐานของมัลเซลล์นั้น ได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) อุปกรณ์และวิธีการทดลองมีดังนี้

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.3.1.1 ตัวอย่างทัวร์มาลีน

3.3.1.2 ชุดเทียบสีมาตรฐานตามระบบสีของมัลเซลล์ (Munsell color system)

3.3.1.3 กล้องจุลทรรศน์พร้อมอุปกรณ์บันทึกภาพ

3.3.1.4 ชุดหลอดไฟซึ่งให้แสงสีขาวสำหรับส่องประเมินค่าสี



รูปที่ 3.5 ชุดเทียบสีของมัลเซลล์



รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์พร้อมอุปกรณ์บันทึกภาพ

3.3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.3.2.1 ทำความสะอาดตัวอย่างทัวร์มาลินด้วยผ้าเช็ดพลอย

3.3.2.2 คีบตัวอย่างทัวร์มาลิน โดยให้อยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากตาประมาณ 18 นิ้ว และห่างจากแสงประมาณ 6-10 นิ้ว

3.3.2.3 ประเมินค่าสีของทัวร์มาลิน โดยเทียบกับชุดเทียบสีมาตรฐานตามระบบสีของ munsell

3.3.2.4 บันทึกค่าที่อ่านได้จากการประเมินค่าสี

3.3.2.5 นำตัวอย่างทัวร์มาลินมาวางบนแท่นวางตัวอย่างที่กล้องจุลทรรศน์

3.3.2.6 ปรับกำลังขยายที่ 1.2 เท่า และหาตำแหน่งโฟกัสของกล้องจุลทรรศน์

3.3.2.7 ติดตั้งกล้องดิจิทัล เพื่อบันทึกภาพสีของทัวร์มาลินจากกล้องจุลทรรศน์

3.3.2.8 ทำการบันทึกภาพสีของทัวร์มาลิน

3.3.2.9 ทำการทดลองตามข้อ 1-8 ทั้งก่อนและหลังฉายรังสี 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ (ประเมินค่าสีก่อนฉายรังสี แล้วนำไปฉายรังสีให้ได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 600 กิโลเกรย์ ทำการประเมินค่าสี แล้วจึงนำตัวอย่างทัวร์มาลินไปฉายรังสีต่อจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 800 กิโลเกรย์ ทำเช่นนั้นจนตัวอย่างทัวร์มาลินไปฉายรังสีต่อจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 1000 กิโลเกรย์)

3.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer

UV-VIS-NIR Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของสารตัวอย่าง โดยอาศัยความแตกต่างของการดูดซับแสงในแต่ละสาร ในช่วงความยาวคลื่นย่าน Ultraviolet (UV), Visible (VIS) และ near infrared (NIR) เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ง่าย วิเคราะห์ตัวอย่างได้ค่อนข้างเร็ว ไม่ยุ่งยากและมักไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในการวิเคราะห์

3.4.1 องค์ประกอบของเครื่อง UV-VIS-NIR Spectrophotometer ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก มีดังนี้คือ

3.4.1.1 แหล่งกำเนิดแสง ให้แสงช่วงความยาวคลื่นในย่าน UV และ Visible-NIR

3.4.1.2 โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator) ทำหน้าที่แยกแสงออกเป็นแต่ละความยาวคลื่นและแยกส่วนความยาวคลื่นที่ต้องการไปใช้

3.4.1.3 ที่บรรจุสารตัวอย่าง และสารเปรียบเทียบ (Sample holder/ Sample cell) เป็นช่องใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัด

3.4.1.4 หัววัด (Detector) ใช้วัดแสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนของสารตัวอย่าง

3.4.1.5 เครื่องประมวลผลข้อมูล



รูปที่ 3.7 เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer ของ Perkin Elmer รุ่น Lambda 750

3.4.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.4.2.1 เปิดสวิทช์เพื่ออุ่นเครื่องเป็นเวลา 30 นาที

3.4.2.2 ปิดแสงจากภายในหรือภายนอกไม่ให้เกิดกระทบตัวไวแสง โดยการปิดฝาครอบช่องใส่ตัวอย่างและปิดช่องแสงออก

3.4.2.3 เลือกความยาวคลื่นแสงที่ต้องการวัดโดยปรับปุ่มเลือกความยาวคลื่น

3.4.2.4 ปรับเครื่องเป็น 100% transmittance หรือตั้งค่าการดูดกลืน ให้เป็นศูนย์ด้วยปุ่มปรับศูนย์ (Auto Zero)

3.4.2.5 ใส่ตัวอย่างตัวอย่างทั่วรัมาลงในช่องใส่ตัวอย่าง (integrating spheres) แล้วปิดฝา

3.4.2.6 อ่านค่า % transmittance หรือ absorbance

3.4.2.7 ทำตามขั้นตอนที่ 3.4.2.1 ถึง 3.2.4.6 จนครบทุกตัวอย่าง

3.5 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry; XRF)

3.5.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.5.1.1 ตัวอย่างทาร์มาลิน ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาแล้ว

3.5.1.2 เครื่องวัด XRF (โปรแกรม MESA - 500W)

3.5.1.3 ชุดคอมพิวเตอร์

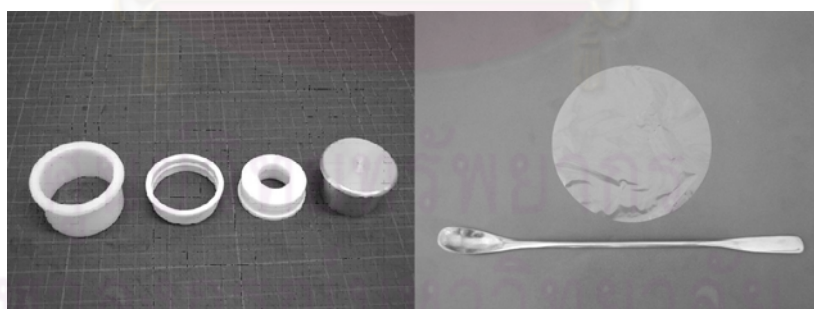
3.5.1.4 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุสารตัวอย่าง

3.5.1.5 Cell Window

3.5.1.6 อุปกรณ์กีดตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 แสดงชุดคอมพิวเตอร์และเครื่องวัด XRF



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบรรจุสารตัวอย่าง

(ข) Cell Window และช้อนตักสาร

3.5.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.5.2.1 ทำการประกอบวงแหวนพลาสติก และ cell window (เยื่อพลาสติกบางใส) เข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นภาชนะสำหรับบรรจุสารตัวอย่าง

3.5.2.2 บรรจุตัวอย่างทัวร์มาลีนลงในภาชนะดังกล่าวในข้อ 3.4.2.1

3.5.2.3 นำตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเตรียมเรียบร้อยแล้วมาเข้าเครื่องวัด XRF ดังแสดงในรูปที่ 3.8

3.5.2.4 เข้าไปที่โปรแกรม MESA 500W แล้วตั้งค่าต่างๆ ดังนี้

- X-ray tube Vol. เลือก Auto (15 keV และ 50 keV)
- Preset time ใช้ 200 sec
- Select Formula เลือก Formula 1 (Oxide)
- Quant. Corr. เลือก standard less (ไม่ต้องใช้สารมาตรฐานเทียบ)

3.5.2.5 เริ่มทำการนับวัดรังสีจนครบ 200 วินาที

3.5.2.6 บันทึกข้อมูลที่ได้

3.5.2.7 ทำการวัดตัวอย่างทัวร์มาลีนทั้งหมดครบตามขั้นตอนที่ 3.4.2.1- 3.4.2.6



รูปที่ 3.8 (a) แสดงการบรรจุสารลงในภาชนะพลาสติก

(b) แสดงการวางสารตัวอย่างในเครื่องวัด

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณแอมกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน (Neutron Activation Analysis)

ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยวิธีการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน จะต้องมีการเตรียมสารตัวอย่าง นำสารตัวอย่างเข้าเครื่องปฏิบัติการเพื่อทำการอาบนิวตรอน มีการนับวัดและประมวลผล ซึ่งมีวัตถุประสงค์ และวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

3.6.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.6.1.1 ตัวอย่างทัวร์มาลีน ซึ่งผ่านการฉายรังสีแกมมาแล้ว

3.6.1.2 สารมาตรฐาน SOIL-7 ซึ่งเป็น Certified Reference Material จากทบวง การพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ และมีองค์ประกอบของธาตุปริมาณหลัก ปริมาณรอง และ ปริมาณน้อย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

3.6.1.3 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1

3.6.1.4 เครื่องชั่ง Mettler รุ่น AX 205 ชั่ง ได้ละเอียด 0.00001 กรัม

3.6.1.5 ระบบวัดรังสีแกมมา ซึ่งประกอบด้วย หัววัดรังสี HPGE ของบริษัท ORTEC model GMX 18210, ORTEC 456 High voltage supply, ORTEC 575A Spectroscopy Amplifier, Multichannel Analyzer ของบริษัท Nuclear Data model ND-62 และ Microcomputer

3.6.1.6 ซ้อนตักสาร และที่คีบตัวอย่าง

3.6.1.7 ขวดโพลีเอทิลีน (vial) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร สูง 1 เซนติเมตร

3.6.1.8 หลอดอาบนิวตรอน โพลีเอทิลีน (Rabbit) พร้อมสายเอ็นไนลอน

3.6.1.9 หลอดอาบนิวตรอนอะลูมิเนียม

3.6.1.10 นาฬิกาจับเวลา

3.6.1.11 แผ่นอะลูมิเนียม

3.6.1.12 เครื่องปิดผนึกตัวอย่างด้วยความร้อน

3.6.1.13 ถังมือยาง

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของธาตุปริมาณหลักและปริมาณรองในสารมาตรฐาน SOIL-7

No.	Element	Concentration*	Confidence interval
		mg/g	(significant level 0.05) mg/g
1	Aluminium	47	44 - 51
2	Calcium	163	157 - 174
3	Iron	25.7	25.2 - 26.3
4	Magnesium	11.3	11.0 - 11.8
5	Potassium	12.1	11.3 - 12.7
6	Silicon	180	169 - 201
7	Sodium	2.4	2.3 - 2.5
8	Titanium	3.0	2.6 - 3.7

* expressed on a dry-weight basis (constant weight at 105°C)

NOTE The concentration values of the major and minor elements passed all test criteria for certified values with the exception of one: their confidence interval are larger than those normally allowed for major components of reference materials, therefore, these values could not be certified.

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของธาตุปริมาณน้อยในสารมาตรฐาน SOIL-7

No.	Element	Concentration	Confidence interval
		mg/kg	(significant level 0.05) mg/g
1	Antimony	1.7	1.4 - 1.8
2	Arsenic	13.4	12.5 - 14.2
3	Cerium	61	50 - 63
4	Cesium	5.4	4.9 - 6.4
5	Chromium	60	49 - 74
6	Cobalt	8.9	8.4 - 10.1
7	Copper	11	9 - 13
8	Dysprosium	3.9	3.2 - 5.3
9	Europium	1.0	0.9 - 1.3
10	Hafnium	5.1	4.8 - 5.5
11	Holmium*	1.1	(0.8 ; 1.5)
12	Lanthanum	28	27 - 29
13	Lead	60	55 - 71
14	Manganese	631	604 - 650
15	Neodymium	30	22 - 34
16	Rubidium	51	47 - 56
17	Samarium	5.1	4.8 - 5.5
18	Scandium	8.3	6.9 - 9.0
19	Strontium	108	103 - 114
20	Tantalum	0.8	0.6 - 1.0
21	Terbium	0.6	0.5 - 0.9
22	Thorium	8.2	6.5 - 8.7
23	Uranium	2.6	2.2 - 3.3
24	Vanadium	66	59 - 73
25	Ytterbium	2.4	1.9 - 2.6
26	Yttrium	21	15 - 27
27	Zinc	104	101 - 113
28	Zirconium	185	180 - 201

* expressed on a dry-weight basis (constant weight at 105°C)

** only two laboratories provided results. These results are shown in brackets in the place of confidence limits.



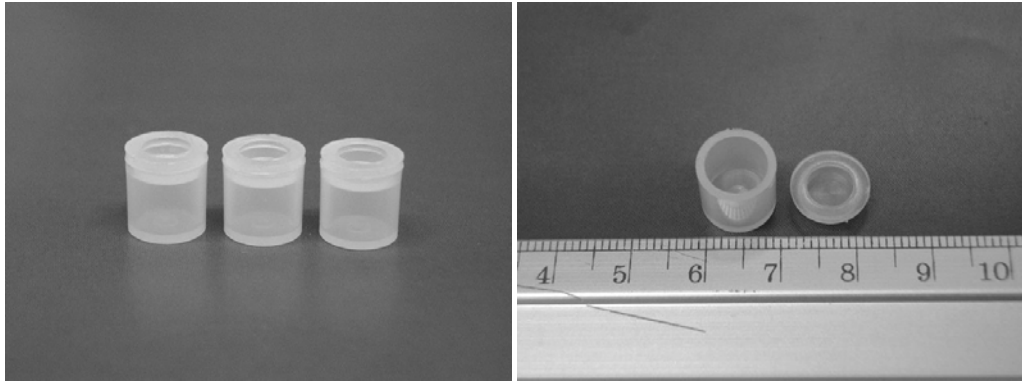
รูปที่ 3.9 แสดงสารมาตรฐาน SOIL-7



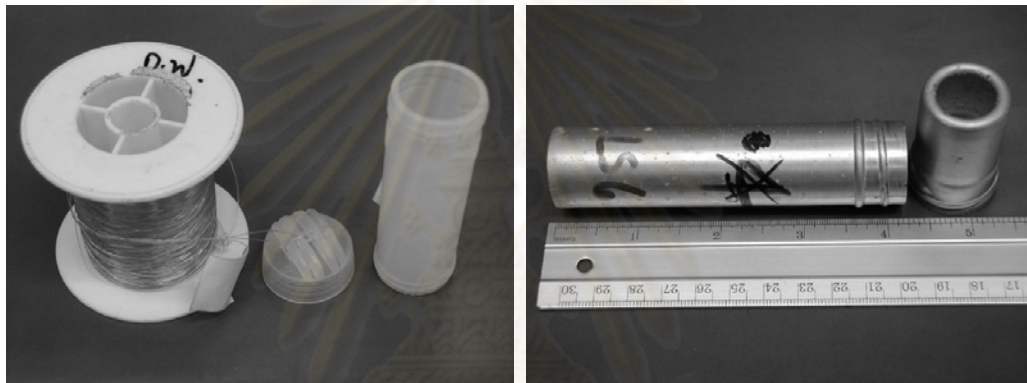
รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก ความละเอียด ± 0.00001
ของ บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น AX 205



รูปที่ 3.11 ระบบวัดรังสีแกมมา



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะและขนาดขวดโพลีเอทธีลีน
ที่ใช้ในการบรรจุสารตัวอย่างและสารมาตรฐาน



(a)

(b)

รูปที่ 3.13 (a) หลอดอาบนิวตรอนโพลีเอทธีลีน
(b) หลอดอาบนิวตรอนอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.14 ช้อนตักสาร ที่คีบตัวอย่าง และนาฬิกาจับเวลา

3.6.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.6.2.1 การเตรียมสารตัวอย่าง หลังจากทำการฉายรังสี และเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสีแล้ว ได้นำตัวอย่างทัวร์มาลินที่บดละเอียดแล้วมาบรรจุลงในขวดโพลีเอทิลีนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. สูง 1 ซม. ปิดฝาแล้วผึ่งแดดด้วยความร้อน โดยจะทำการแบ่งสารตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือ a และ b แล้วชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 5 ตำแหน่ง และบันทึกข้อมูลแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

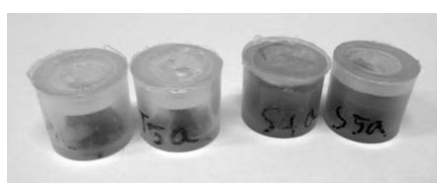
ตารางที่ 3.3 แสดงรหัสและน้ำหนักของสารตัวอย่าง

รหัส	น้ำหนักของกลุ่มตัวอย่าง (g.)		รหัส	น้ำหนักของกลุ่มตัวอย่าง (g.)	
	a	b		a	b
T1	0.05106	0.08328	T20	0.08846	0.17964
T2	0.05959	0.011467	T21	0.06429	0.16502
T3	0.04946	0.07560	T22	0.05575	-
T4	0.04199	0.05616	T23	0.12958	0.17420
T5	0.09932	0.12463	T24	0.10117	0.20502
T6	0.05263	0.06811	T25	0.10954	0.21055
T7	0.04372	0.06967	T26	0.08122	0.18725
T8	0.10991	0.21580	T27	0.11166	0.21026
T9	0.03127	0.06419	T28	0.05132	0.15793
T10	0.11065	0.15386	T29	0.12024	0.19939
T11	0.07520	0.15176	T30	0.06206	0.15373
T12	0.10678	0.20184	T31	0.12042	0.19444
T13	0.09140	0.22603	T32	0.07853	0.17665
T14	0.08418	0.20116	T33	0.12966	0.21611
T15	0.08406	0.17948	T34	0.11123	0.19229
T16	0.12896	0.18040	T35	0.11270	0.22728
T17	0.08132	0.18137	T36	0.09983	0.17029
T18	0.09894	0.21422	T37	0.12541	0.20191
T19	0.05022	0.09428			

3.6.2.2 การเตรียมสารมาตรฐาน สารมาตรฐาน SOIL-7 นั้นมีลักษณะเป็นผงอยู่ แล้วดั่งนั้นจึงบรรจุลงในขวดโพลีเอทธีลีน แล้วปิดฝาผนึกด้วยความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ a และ b เช่นเดียวกับสารตัวอย่าง น้ำหนักและรหัสของสารมาตรฐานดังแสดงในดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงรหัสและน้ำหนักของสารมาตรฐาน

รหัส	น้ำหนักของกลุ่มตัวอย่าง (g.)		รหัส	น้ำหนักของกลุ่มตัวอย่าง (g.)	
	a	b		a	b
S1	0.15972	0.14695	S20	0.14769	0.14769
S2	0.13824	0.15174	S21	0.13908	0.13908
S3	0.13811	0.14851	S22	0.15559	-
S4	0.13914	0.14695	S23	0.15470	0.14798
S5	0.15460	0.14506	S24	0.14116	0.15136
S6	0.14011	0.14302	S25	0.13728	0.15296
S7	0.14351	0.14078	S26	0.15185	0.15351
S8	0.13932	0.15313	S27	0.15103	0.14578
S9	0.15043	0.14767	S28	0.13985	0.15144
S10	0.15045	0.14546	S29	0.15105	0.14214
S11	0.15273	0.14709	S30	0.15581	0.14560
S12	0.14801	0.14692	S31	0.13799	0.14269
S13	0.13845	0.14962	S32	0.15233	0.14304
S14	0.13965	0.14652	S33	0.15197	0.14468
S15	0.14227	0.14854	S34	0.13925	0.15106
S16	0.14637	0.15172	S35	0.14003	0.14180
S17	0.14967	0.14523	S36	0.15402	0.13993
S18	0.14438	0.14143	S37	0.14834	0.15250
S19	0.14123	0.14751	S38	0.14025	-



รูปที่ 3.15 สารตัวอย่างและสารมาตรฐานบรรจุในขวดโพลีเอทธีลีนที่ผนึกเรียบร้อยแล้ว

3.6.2.3 การวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีส นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานกลุ่ม a ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.6.2.1 และ 3.6.2.2 มาเรียงเป็นแถว ๆ ละ 4 ตัวอย่าง โดยจัดให้สารมาตรฐานอยู่กลางสลับกับสารตัวอย่าง แล้วนำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ครั้งละ 3 แถว ในห้องอบนิวตรอน CA-3 เป็นเวลา 40 วินาที

ทิ้งให้สารตัวอย่างสลายตัวอีกประมาณ 15 นาที แล้วจึงนำมาวัดพีคพลังงาน 1810.72 keV ของ Mn-56 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของแมงกานีส โดยใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 2 นาที

T1a	T3a	T5a
S1a	S3a	S5a
T2a	T4a	T6a
S2a	S4a	S6a

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ธาตุแมงกานีส

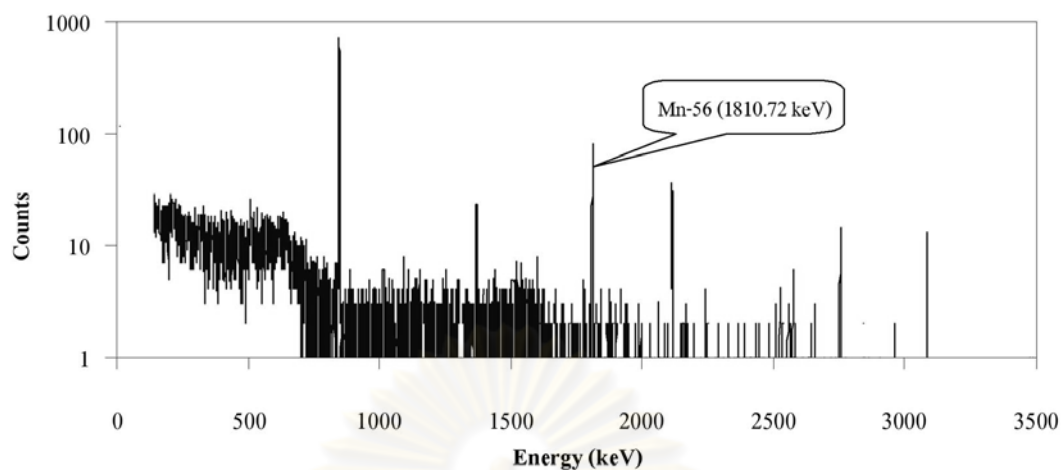
3.6.2.4 การวิเคราะห์ปริมาณเหล็ก นำสารตัวอย่างและสารมาตรฐานกลุ่ม b ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.6.2.1 และ 3.6.2.2 มาเรียงเป็นแถว ๆ ละ 4 ตัวอย่าง โดยจัดให้สารมาตรฐานอยู่กลางสลับกับสารตัวอย่าง แล้วนำไปอบนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ครั้งละ 3 แถว ในห้องอบนิวตรอน A-4 เป็นเวลา 46 ชั่วโมง

หลังจากทิ้งไว้ให้สลายตัวประมาณ 45 วัน จึงนำไปวิเคราะห์ปริมาณของเหล็กจากไอโซโทป Fe-59 โดยการวัดรังสีแกมมาพลังงาน 1099.25 keV ใช้เวลาวัดตัวอย่างละ 600 วินาที

T1b	T5b	T9b
S1b	S4b	S7b
T2b	T6b	T10b
S2a	S5b	S8b
T3b	T7b	T11b
S3a	S6b	S9b
T4b	T8b	T12b

รูปที่ 3.17 ตัวอย่างลักษณะการจัดเรียงสารตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ธาตุเหล็ก

3.6.2.5 การคำนวณปริมาณแมงกานีส และเหล็ก ใช้วิธีเปรียบเทียบพื้นที่ใต้พีคที่กล่าวแล้วในข้อ 3.6.2.3 และ 3.6.2.4 ของสารตัวอย่างกับของสารมาตรฐานที่พลังงานเดียวกัน การคำนวณพื้นที่ใต้พีคใช้วิธีของโคเวลล์ (Covell's method)



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างสเปกตรัมรังสีแกมมาของสารมาตรฐานสำหรับวิเคราะห์ธาตุแมงกานีส

3.7 การหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ด้วยการเปลี่ยนสี

เมื่อหาปริมาณของแมงกานีสและเหล็กได้จากข้อ 3.6 จึงนำมาหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กได้ดังนี้

$$\text{อัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็ก} = \frac{\text{ปริมาณ Mn}}{\text{ปริมาณ Fe}}$$

หลังจากได้อัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กแล้ว นำมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในตัวอย่างที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย






































บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป

จากการตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป พบว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนทั้ง 37 ตัวอย่าง แสดงการมีด-สว่าง สลับกันทุกๆ การหมุน 45 องศา ตลอดการหมุน 360 องศา

































































































ตารางที่ 4.1 แสดงผลการตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป

รหัส	ผลการทดลอง		รหัส	ผลการทดลอง	
	รูปตำแหน่งเริ่มต้น	แสดงผล		รูปตำแหน่งเริ่มต้น	แสดงผล
T01		มีด-สว่าง	T20		มีด-สว่าง
T02		มีด-สว่าง	T21		มีด-สว่าง
T03		มีด-สว่าง	T22		มีด-สว่าง
T04		มีด-สว่าง	T23		มีด-สว่าง
T05		มีด-สว่าง	T24		มีด-สว่าง
T06		มีด-สว่าง	T25		มีด-สว่าง
T07		มีด-สว่าง	T26		มีด-สว่าง
T08		มีด-สว่าง	T27		มีด-สว่าง
T09		มีด-สว่าง	T28		มีด-สว่าง
T10		มีด-สว่าง	T29		มีด-สว่าง
T11		มีด-สว่าง	T30		มีด-สว่าง
T12		มีด-สว่าง	T31		มีด-สว่าง
T13		มีด-สว่าง	T32		มีด-สว่าง
T14		มีด-สว่าง	T33		มีด-สว่าง
T15		มีด-สว่าง	T34		มีด-สว่าง
T16		มีด-สว่าง	T35		มีด-สว่าง
T17		มีด-สว่าง	T36		มีด-สว่าง
T18		มีด-สว่าง	T37		มีด-สว่าง
T19		มีด-สว่าง			

































































































































4.2 ผลการประเมินสีของทัวร์มาลินหลังฉายด้วยรังสีแกมมา

ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินทั้งหมด 37 ตัวอย่าง เทียบกับชุดเทียบสีมาตรฐานตามระบบสีของมันเชลล์ ตามมาตรฐานของ GIA โดยเปรียบเทียบคุณภาพสีก่อนฉายรังสี และหลังฉายรังสี แบ่งเป็น 4 กลุ่ม ตามปริมาณรังสีที่ได้รับ คือ ก่อนฉายรังสีแกมมา, หลังฉายรังสีแกมมา 600 กิโลเกรย์, หลังฉายรังสีแกมมา 800 กิโลเกรย์ และหลังฉายรังสีแกมมา 1000 กิโลเกรย์ ได้ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2









































































ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณต่างๆ

รหัส	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลิน							
	ก่อนฉาย		หลังฉาย 600 kGy		หลังฉาย 800 kGy		หลังฉาย 1000 kGy	
	ทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์
T01		 5GY5/4		 5GY5/4		 5GY5/4		 5GY4/4
T02		 5GY5/6		 2.5GY5/4		 2.5GY5/4		 2.5GY4/6
T03		 5GY5/4		 5GY5/4		 7.5GY5/4		 7.5GY5/4
T04		 2.5GY6/6		 5GY5/4		 2.5GY6/6		 2.5GY6/6
T05		 2.5G9/4		 2.5GY9/4		 2.5G8/4		 2.5G8/4
T06		 7.5GY8/4		 5GY8/2		 5GY8/4		 7.5GY8/4
T07		 2.5G9/2		 10GY9/2		 2.5G8/4		 2.5G9/2
T08		 10GY8/4		 5GY7/4		 5GY7/6		 5GY7/4
T09		 2.5G9/2		 7.5GY9/2		 10GY8/4		 7.5GY8/2
T10		 7.5GY7/4		 5GY7/4		 5GY7/6		 2.5GY7/4
T11		 2.5G8/4		 10GY8/2		 2.5G8/4		 10GY8/2
T12		 2.5RP8/4		 2.5RP6/12		 2.5RP5/12		 2.5RP4/12

ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณต่างๆ (ต่อ)

รหัส	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลิน							
	ก่อนฉาย		หลังฉาย 600 kGy		หลังฉาย 800 kGy		หลังฉาย 1000 kGy	
	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์
T13		 2.5RP9/2		 2.5RP7/8		 2.5RP6/8		 2.5RP5/8
T14		 2.5RP8/2		 2.5RP6/12		 2.5RP5/12		 2.5RP4/12
T15		 5BG9/2		 2.5RP6/12		 2.5RP5/12		 2.5RP4/12
T16		 5RP7/10		 5RP5/12		 5RP4/12		 5RP4/10
T17		 5RP7/8		 5RP6/10		 5RP5/10		 5RP5/12
T18		 2.5RP6/10		 5RP5/10		 2.5RP4/10		 5RP3/10
T19		 5RP6/12		 2.5RP6/10		 2.5RP6/12		 2.5RP5/12
T20		 7.5RP8/6		 7.5RP8/6		 7.5RP8/6		 7.5RP8/6
T21		 5RP7/10		 5RP7/8		 5RP7/8		 5RP7/10
T22		 5RP8/6		 5RP8/6		 5RP8/6		 2.5RP8/6
T23		 2.5RP7/4		 2.5RP7/6		 2.5RP5/8		 2.5RP6/10
T24		 5RP7/4		 2.5RP6/8		 2.5RP5/8		 2.5RP6/10
T25		 2.5RP7/6		 2.5RP5/12		 2.5RP4/12		 2.5RP4/10
T26		 2.5RP7/4		 2.5RP7/6		 2.5RP6/8		 2.5RP6/8
T27		 5RP9/2		 5RP8/6		 7.5RP7/6		 5RP8/6
T28		 7.5RP9/2		 7.5RP8/4		 2.5RP7/4		 7.5RP8/4

ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายด้วยรังสีแกมมาปริมาณต่างๆ (ต่อ)

รหัส	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลิน							
	ก่อนฉาย		หลังฉาย 600 kGy		หลังฉาย 800 kGy		หลังฉาย 1000 kGy	
	ทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์	สีทัวร์มาลิน	สีมันเชลล์
T29		 5RP8/4		 7.5RP7/6		 2.5RP7/6		 5RP8/6
T30		 7.5RP9/2		 7.5RP8/4		 10RP8/4		 7.5RP8/4
T31		 7.5RP8/4		 7.5RP8/4		 5R8/4		 5R8/4
T32		 2.5R8/4		 10RP8/4		 10RP7/6		 10RP7/6
T33		 2.5GY8/4		 2.5Y8/4		 5RP7/8		 5RP7/8
T34		 2.5G9/4		 10GY8/4		 7.5RP8/4		 7.5RP8/4
T35		 7.5RP8/4		 10RP8/4		 10RP7/6		 10RP7/6
T36		 7.5RP6/8		 7.5RP6/8		 7.5RP5/8		 7.5RP5/8
T37		 5RP9/2		 5RP7/6		 5RP7/6		 5RP7/8

หมายเหตุ รายละเอียดค่าสีที่อ่านได้จากทัวร์มาลินหลังฉายรังสีที่ปริมาณต่างๆ แสดงในภาคผนวก ข

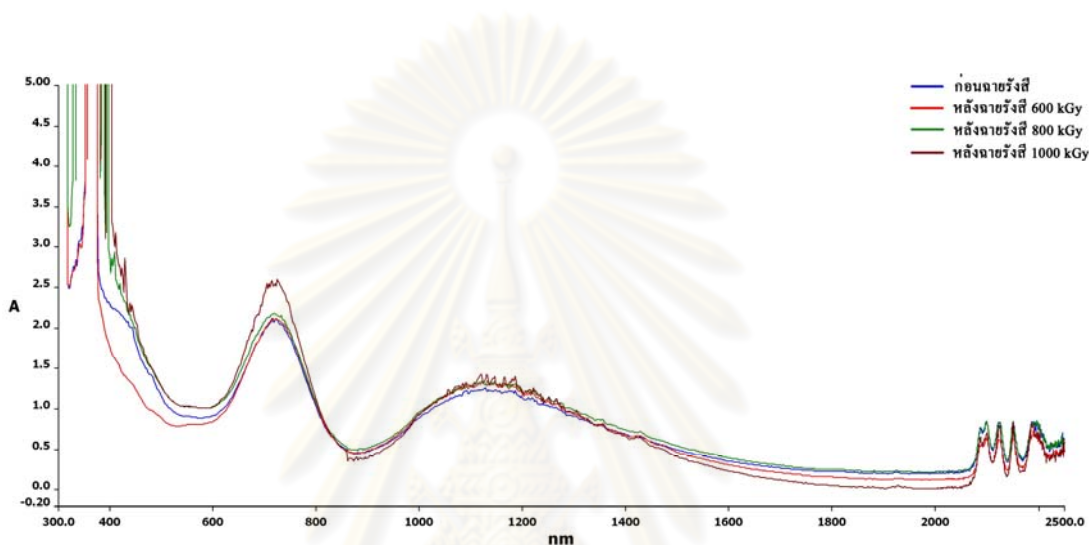
ตัวอย่างค่าสีของมันเชลล์ที่อ่านได้ 5R8/4 หมายถึง Hue = 5R Value = 8 และ Chroma = 4

4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer

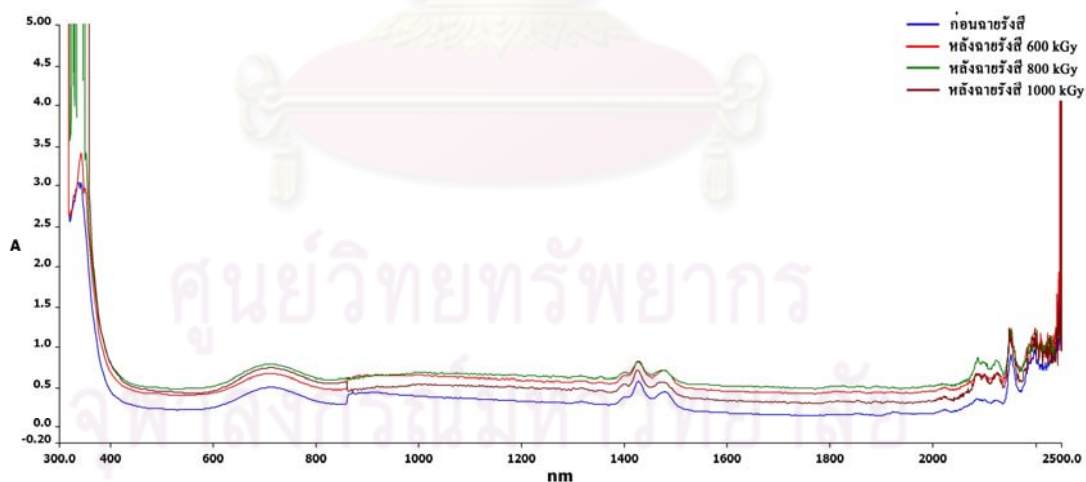
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างทัวร์มาลินด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer โดยให้แสงตกกระทบตั้งฉากกับแกน c (C-axis) แล้วศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง เปรียบเทียบก่อนฉายรังสี หลังฉายรังสี 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ พบว่ามีการดูดกลืนแสงของธาตุเหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) และไทเทเนียม (Ti) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีในทัวร์มาลินดังนี้

3.4.1 ตัวอย่างกลุ่มสีเขียว

ทัวร์มาลินสีเขียว แสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 600-850 นาโนเมตร มีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 718 นาโนเมตร โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวเป็นของ $\text{Fe}^{2+}\text{-Ti}^{4+}$ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีเขียวในทัวร์มาลิน นอกจากนี้ยังแสดงการดูดกลืนของ OH^- ในช่วง 1400 - 1500 นาโนเมตร และแสดงการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 2150- 2350 ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T02

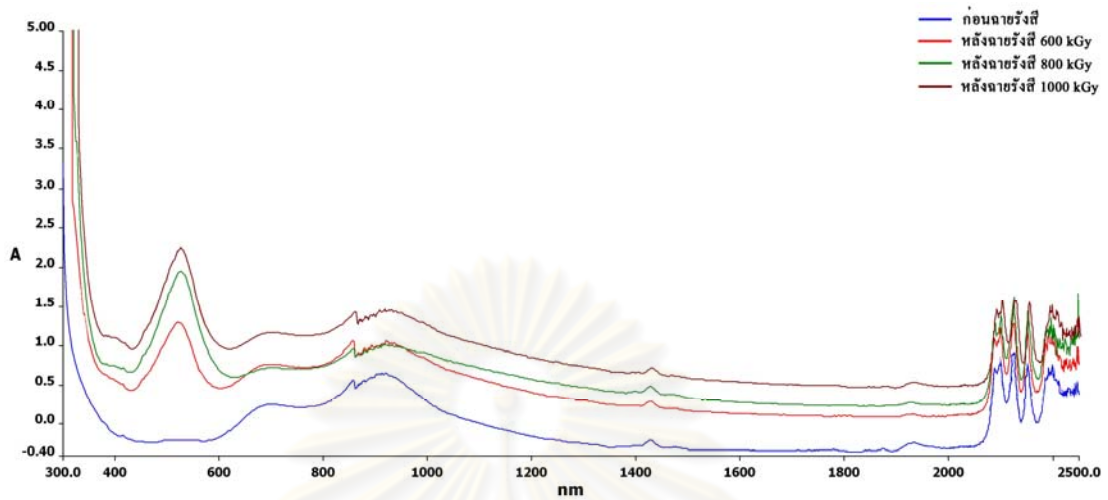


รูปที่ 4.2 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T07

3.4.2 ตัวอย่างกลุ่มที่มีสองสีในเม็ดเดียว

ทัวร์มาลินกลุ่มที่มีสองสีในเม็ดเดียว จะแสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 430-600 นาโนเมตร หลังจากฉายรังสีแกมมา 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ โดยมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 518 นาโนเมตร โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวเป็นของ Mn^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุของ

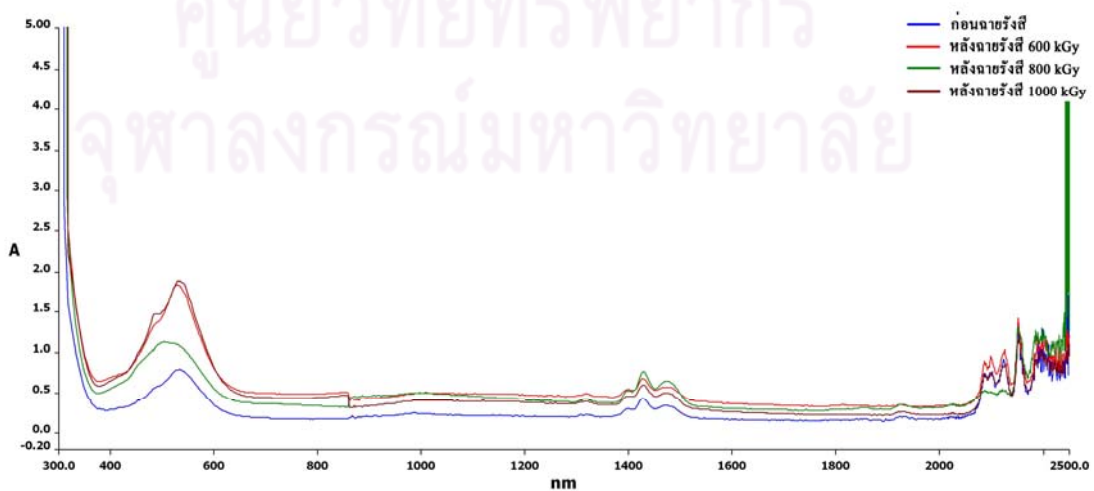
การเกิดสีชมพูในทัวร์มาลีน นอกจากนี้ยังแสดงการดูดกลืนของ OH^- ในช่วง 1400 - 1500 นาโนเมตร และแสดงการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 2150- 2350 ดังรูปที่ 4.3



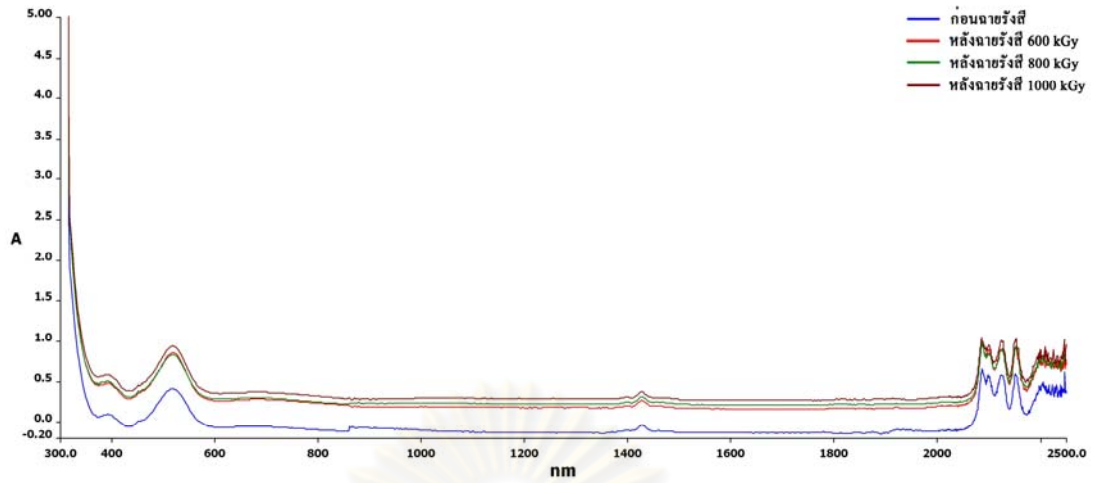
รูปที่ 4.3 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T12

3.4.2 ตัวอย่างกลุ่มสีชมพู

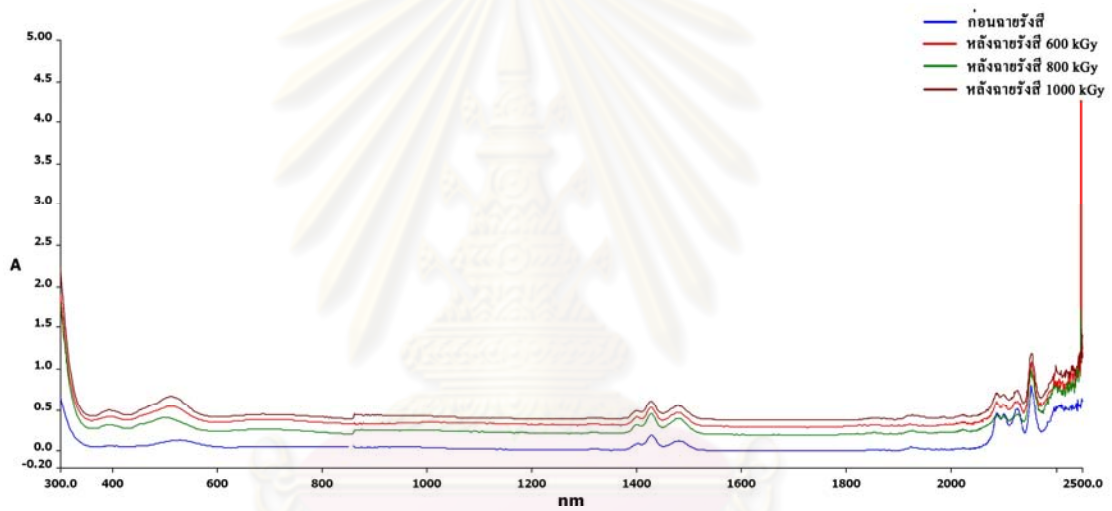
ทัวร์มาลีนกลุ่มสีชมพู จะแสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 350-420 นาโนเมตร มีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 392 นาโนเมตร และ 430-600 นาโนเมตร มีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 518 นาโนเมตร โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวเป็นของ Mn^{2+} และ Mn^{3+} ตามลำดับ ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีชมพูในทัวร์มาลีน นอกจากนี้ยังแสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 600-850 นาโนเมตร มีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 718 นาโนเมตร ซึ่งช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวเป็นของ Fe^{2+} - Ti^{4+} แสดงการดูดกลืนของ OH^- ในช่วง 1400 - 1500 นาโนเมตร และแสดงการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 2150- 2350 ดังรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 และ 4.9



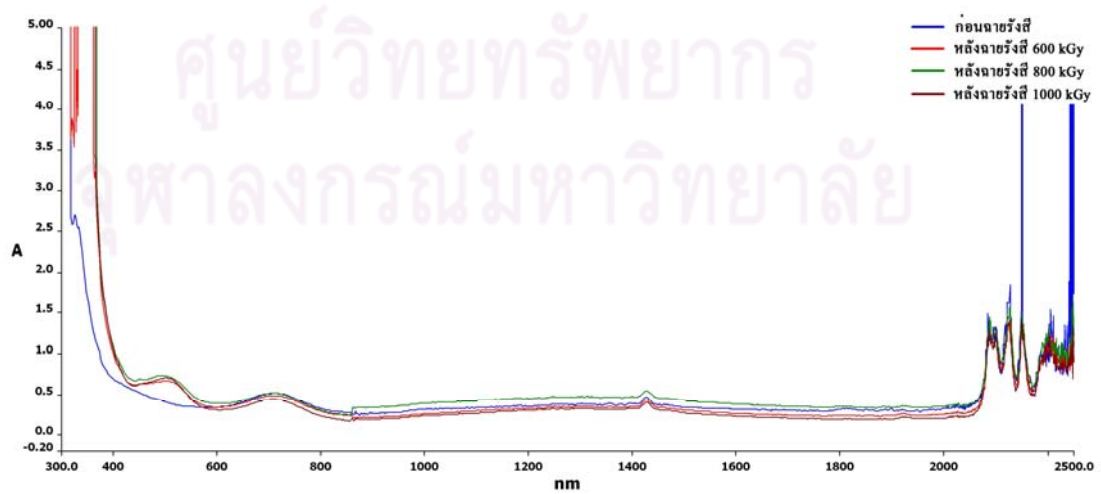
รูปที่ 4.4 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T17



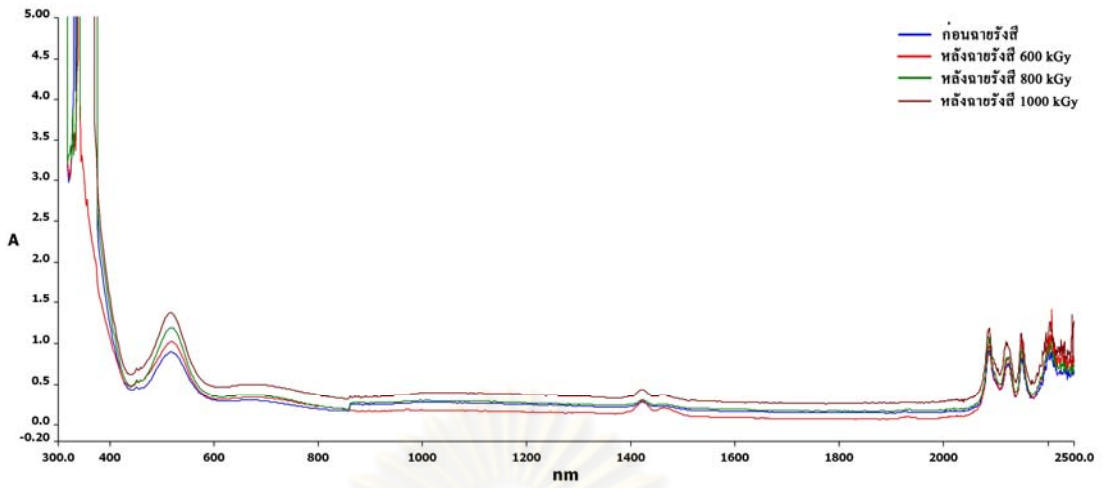
รูปที่ 4.5 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T21



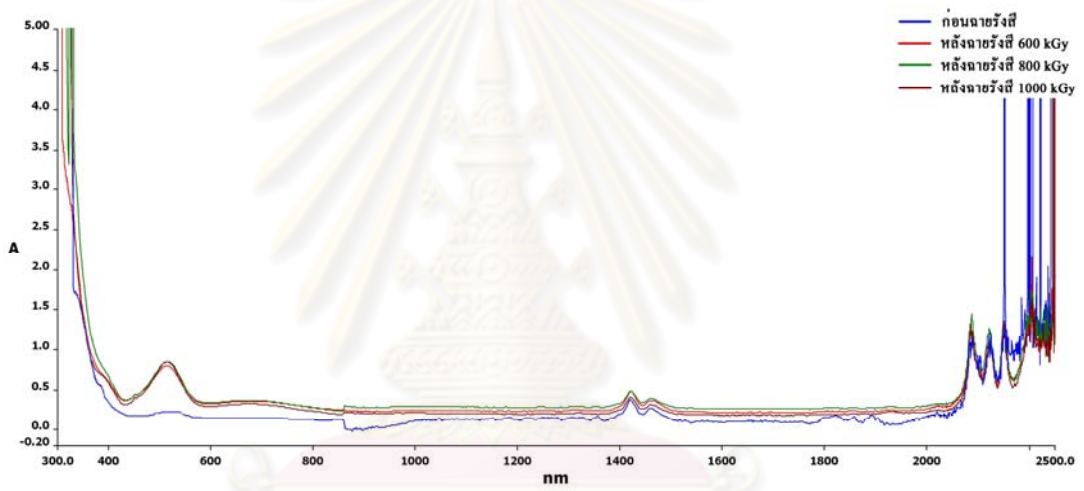
รูปที่ 4.6 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T30



รูปที่ 4.7 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T33



รูปที่ 4.8 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T36



รูปที่ 4.9 การดูดกลืนแสงของตัวอย่าง T37

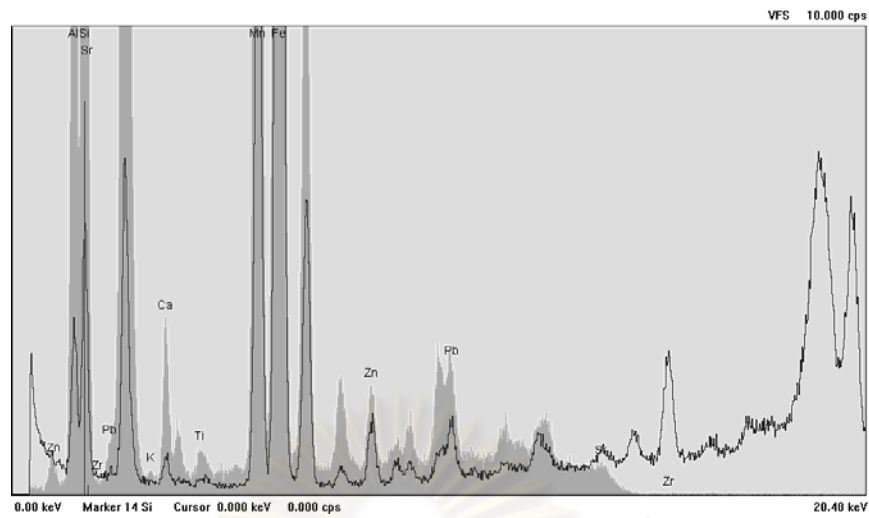
สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงของตัวอย่างทัวร์มาลีนที่เหลือแสดงในภาคผนวก ข

4.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

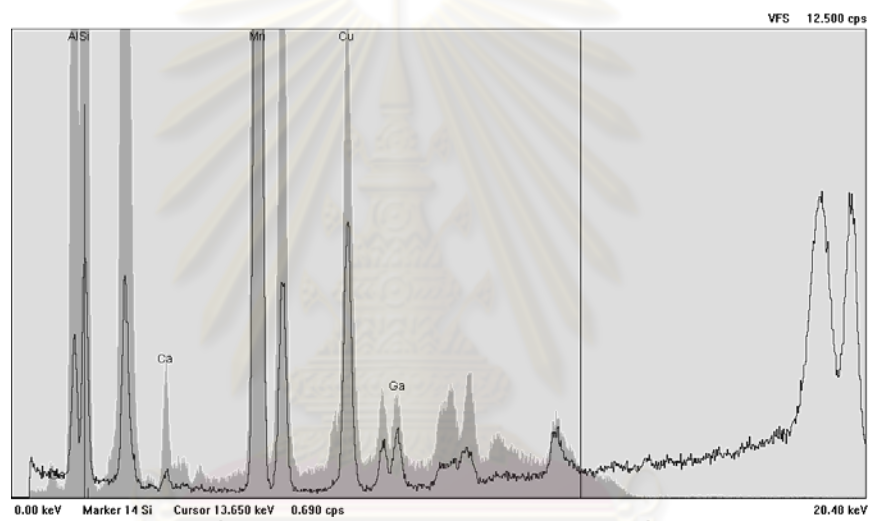
จากการวิเคราะห์ตัวอย่างตัวร่ำมาลินทั้งหมด ได้เอกซ์เรย์สเปกตรัมดังแสดงในภาคผนวก ง และพบธาตุองค์ประกอบที่แตกต่างกัน ดังได้แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ธาตุในตัวอย่างตัวร่ำมาลินที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์

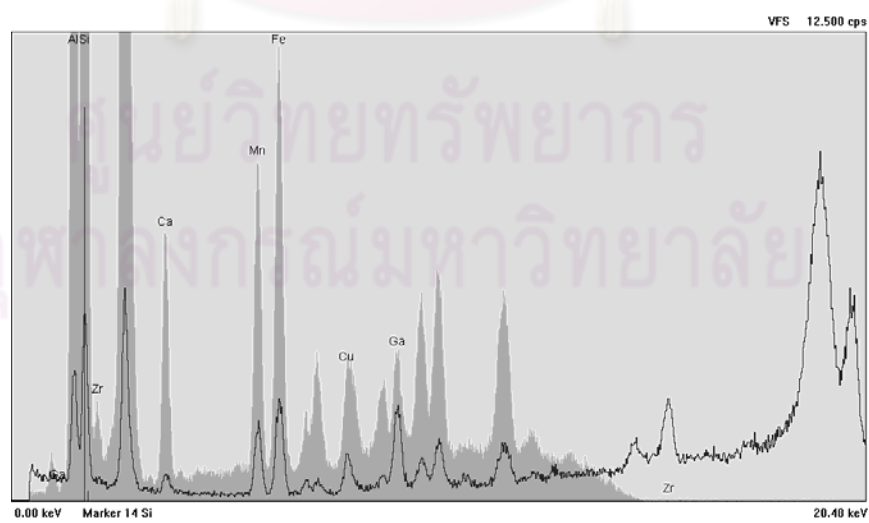
รหัส	ธาตุที่พบ																
	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn	Sr	Zr	Pb	Ge	Cu	V	Ga	Ni	Cr
T01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
T02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓									
T03	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓								
T04	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓					✓
T05	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓				
T06	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓				✓				
T07	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓				
T08	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓			✓			
T09	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓									
T10	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓			✓					
T11	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓			✓						
T12	✓	✓		✓		✓	✓	✓					✓		✓		
T13	✓	✓		✓		✓	✓	✓					✓		✓		
T14	✓	✓		✓		✓	✓	✓					✓		✓		
T15	✓	✓		✓		✓	✓	✓					✓		✓		
T16	✓	✓		✓		✓	✓	✓				✓		✓	✓		
T17	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T18	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T19	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓					✓		
T20	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T21	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T22	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T23	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓				✓		
T24	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T25	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T26	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T27	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓			✓		✓		
T28	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓			✓		✓		
T29	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓					✓		✓	✓	
T30	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓			✓		✓	✓	
T31	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T32	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓				✓		
T33	✓	✓		✓		✓	✓	✓							✓		
T34	✓	✓		✓		✓	✓	✓		✓					✓		
T35	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓				✓		
T36	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓				✓		
T37	✓	✓		✓		✓	✓	✓			✓				✓		



รูปที่ 4.10 เอกซ์เรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T01



รูปที่ 4.11 เอกซ์เรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T12

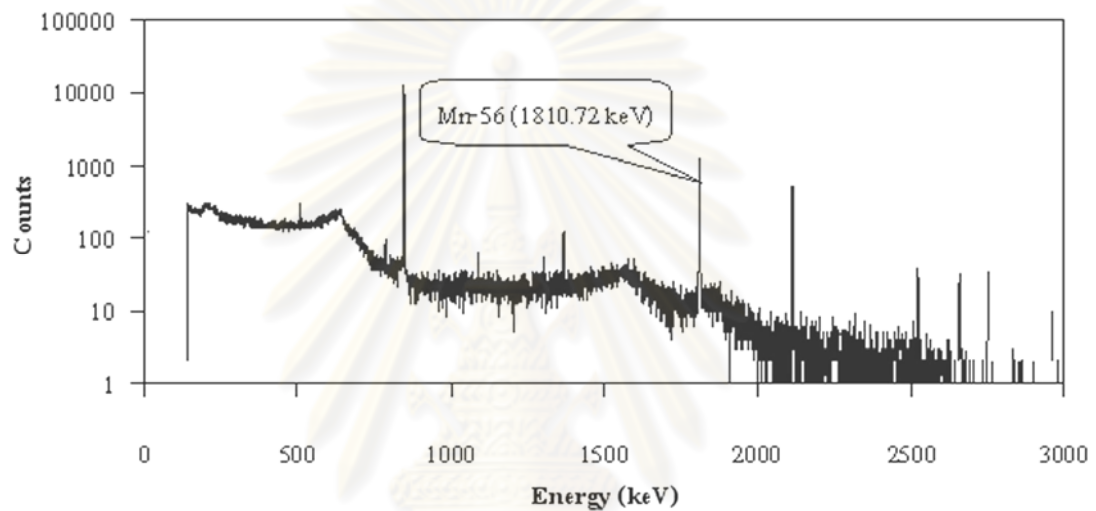


รูปที่ 4.12 เอกซ์เรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T27

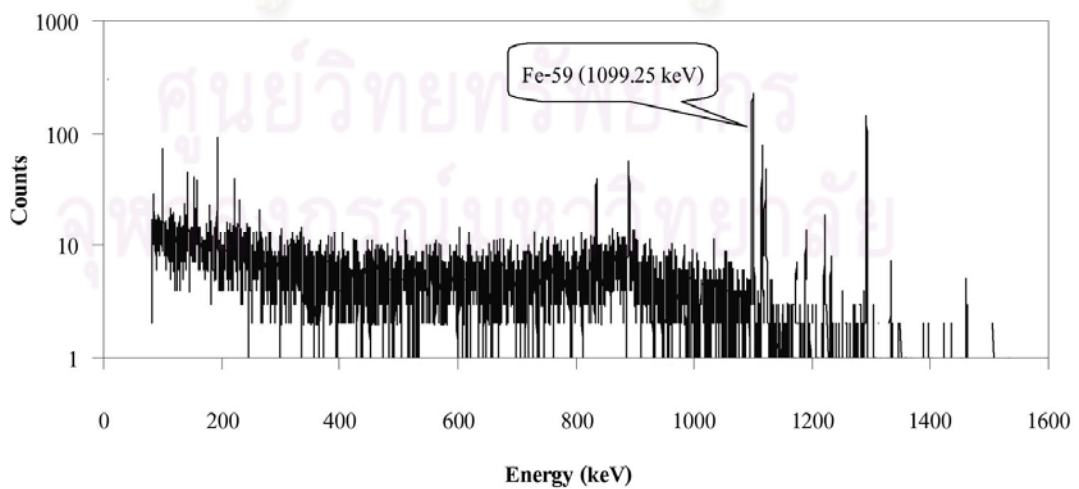
4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณแอมกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน

ในรูปที่ 4.13 และ 4.14 เป็นตัวอย่างแกมมาสเปกตรัมของตัวอย่างทัวร์มาลีนที่วิเคราะห์ธาตุแอมกานีส และธาตุเหล็ก ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบและคำนวณพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน พบว่าทัวร์มาลีนมีปริมาณ

แอมกานีสและเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างที่วิเคราะห์ธาตุแอมกานีส



รูปที่ 4.14 สเปกตรัมรังสีแกมมาของตัวอย่างที่วิเคราะห์ธาตุเหล็ก

ตารางที่ 4.4 ปริมาณแมงกานีสและเหล็กในตัวอย่างที่วิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน

รหัส	ปริมาณแมงกานีส (%)	ปริมาณเหล็ก (%)
T01	0.89±0.00	2.65±0.17
T02	0.74±0.00	2.28±0.14
T03	0.90±0.03	2.24±0.14
T04	0.87±0.03	2.62±0.16
T05	0.10±0.00	0.59±0.01
T06	0.18±0.00	0.75±0.02
T07	0.09±0.00	0.62±0.01
T08	0.47±0.00	1.43±0.03
T09	0.70±0.00	1.31±0.12
T10	0.52±0.00	1.13±0.10
T11	0.67±0.06	1.22±0.11
T12	1.63±0.14	0.01±0.00
T13	1.77±0.30	0.01±0.00
T14	1.67±0.28	Not Detected
T15	1.70±0.08	0.01±0.00
T16	1.03±0.05	0.02±0.00
T17	1.47±0.06	0.02±0.00
T18	1.44±0.06	0.02±0.00
T19	1.61±0.04	0.02±0.00
T20	0.09±0.00	Not Detected
T21	0.06±0.01	0.01±0.00
T22	0.08±0.01	0.03±0.00
T23	1.09±0.03	0.21±0.01
T24	1.16±0.03	0.15±0.02
T25	1.12±0.07	0.16±0.02
T26	1.12±0.07	0.17±0.02
T27	0.08±0.01	Not Detected
T28	0.09±0.01	Not Detected
T29	0.10±0.01	Not Detected
T30	0.10±0.01	0.02±0.00
T31	0.17±0.01	0.07±0.01
T32	0.50±0.02	0.10±0.00
T33	0.59±0.06	0.27±0.00
T34	0.36±0.04	0.37±0.00
T35	0.05±0.00	0.05±0.00
T36	0.16±0.01	0.03±0.00
T37	0.09±0.01	Not Detected

หมายเหตุ แต่ละตัวอย่างทำ 2 ครั้ง และ Not Detected หมายถึง <100 ppm.













































4.6 ผลการหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา

จากผลการทดลองการหาปริมาณแมงกานีสและเหล็กในตัวอย่างที่วิเคราะห์โดยการอาบนิวตรอน ได้นำมาหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กได้ตามสมการ

























































$$\text{อัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็ก} = \frac{\text{ปริมาณ Mn}}{\text{ปริมาณ Fe}}$$

อัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กแสดงดังตารางที่ 4.5


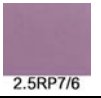










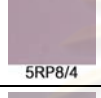
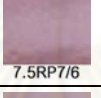
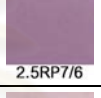









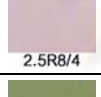

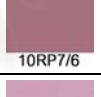
















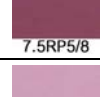

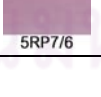
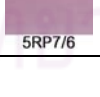

ตารางที่ 4.5 สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กกับการเปลี่ยนสี

รหัส	Mn/Fe Ratio	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลีน (สีมันเชลล์)			
		ก่อนฉาย	หลังฉาย 600 kGy	หลังฉาย 800 kGy	หลังฉาย 1000 kGy
T01	0.34	 5GY5/4	 5GY5/4	 5GY5/4	 5GY4/4
T02	0.32	 5GY5/6	 2.5GY5/4	 2.5GY5/4	 2.5GY4/6
T03	0.40	 5GY5/4	 5GY5/4	 7.5GY5/4	 7.5GY5/4
T04	0.33	 2.5GY6/6	 5GY5/4	 2.5GY6/6	 2.5GY6/6
T05	0.17	 2.5G9/4	 2.5GY9/4	 2.5G8/4	 2.5G8/4
T06	0.24	 7.5GY8/4	 5GY8/2	 5GY8/4	 7.5GY8/4
T07	0.15	 2.5G9/2	 10GY9/2	 2.5G8/4	 2.5G9/2
T08	0.33	 10GY8/4	 5GY7/4	 5GY7/6	 5GY7/4
T09	0.53	 2.5G9/2	 7.5GY9/2	 10GY8/4	 7.5GY8/2
T10	0.46	 7.5GY7/4	 5GY7/4	 5GY7/6	 2.5GY7/4
T11	0.55	 2.5G8/4	 10GY8/2	 2.5G8/4	 10GY8/2

ตารางที่ 4.5 สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กกับการเปลี่ยนสี (ต่อ)

รหัส	Mn/Fe Ratio	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลีน (สีมันแซลล์)			
		ก่อนฉาย	หลังฉาย 600 kGy	หลังฉาย 800 kGy	หลังฉาย 1000 kGy
T12	163.00	 2.5RP8/4	 2.5RP6/12	 2.5RP5/12	 2.5RP4/12
T13	177.00	 2.5RP9/2	 2.5RP7/8	 2.5RP6/8	 2.5RP5/8
T14	-	 2.5RP8/2	 2.5RP6/12	 2.5RP5/12	 2.5RP4/12
T15	170.00	 5BG9/2	 2.5RP6/12	 2.5RP5/12	 2.5RP4/12
T16	51.50	 5RP7/10	 5RP5/12	 5RP4/12	 5RP4/10
T17	73.50	 5RP7/8	 5RP6/10	 5RP5/10	 5RP5/12
T18	72.00	 2.5RP6/10	 5RP5/10	 2.5RP4/10	 5RP3/10
T19	80.50	 5RP6/12	 2.5RP6/10	 2.5RP6/12	 2.5RP5/12
T20	-	 7.5RP8/6	 7.5RP8/6	 7.5RP8/6	 7.5RP8/6
T21	6.00	 5RP7/10	 5RP7/8	 5RP7/8	 5RP7/10
T22	2.67	 5RP8/6	 5RP8/6	 5RP8/6	 2.5RP8/6
T23	5.19	 2.5RP7/4	 2.5RP7/6	 2.5RP5/8	 2.5RP6/10
T24	7.73	 5RP7/4	 2.5RP6/8	 2.5RP5/8	 2.5RP6/10
T25	7.00	 2.5RP7/6	 2.5RP5/12	 2.5RP4/12	 2.5RP4/10

ตารางที่ 4.5 สหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กกับการเปลี่ยนสี (ต่อ)

รหัส	Mn/Fe Ratio	ผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลีน (สีมันแซลล์)			
		ก่อนฉาย	หลังฉาย 600 kGy	หลังฉาย 800 kGy	หลังฉาย 1000 kGy
T26	6.59	 2.5RP7/4	 2.5RP7/6	 2.5RP6/8	 2.5RP6/8
T27	6.47	 5RP9/2	 5RP8/6	 7.5RP7/6	 5RP8/6
T28	-	 7.5RP9/2	 7.5RP8/4	 2.5RP7/4	 7.5RP8/4
T29	-	 5RP8/4	 7.5RP7/6	 2.5RP7/6	 5RP8/6
T30	-	 7.5RP9/2	 7.5RP8/4	 10RP8/4	 7.5RP8/4
T31	5.00	 7.5RP8/4	 7.5RP8/4	 5R8/4	 5R8/4
T32	2.43	 2.5R8/4	 10RP8/4	 10RP7/6	 10RP7/6
T33	5.00	 2.5GY8/4	 2.5Y8/4	 5RP7/8	 5RP7/8
T34	2.19	 2.5G9/4	 10GY8/4	 7.5RP8/4	 7.5RP8/4
T35	0.97	 7.5RP8/4	 10RP8/4	 10RP7/6	 10RP7/6
T36	1.00	 7.5RP6/8	 7.5RP6/8	 7.5RP5/8	 7.5RP5/8
T37	-	 5RP9/2	 5RP7/6	 5RP7/6	 5RP7/8

บทที่ 5

สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 การตรวจสอบด้วยโพลาไรสโคป เมื่อพิจารณาจากการแสดงแถบมืดสลับกับสว่างตลอดการหมุนและดูผ่านแผ่น แอนนาไลเซอร์ของโพลาไรสโคป พบว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนทั้งหมดแสดงคุณสมบัติของอัญมณี anisotropic คือ ผลึกแร่มีอัตราส่วนความยาวแกนพื้นฐานไม่เท่ากัน มีค่าดัชนีหักเหหลายค่า ซึ่งจัดเป็น พวกที่มีความยาวแกนผลึก 2 ค่า จะให้ดัชนีหักเห 2 ค่าเช่นกัน เรียกว่า uniaxial

5.1.2 การประเมินสีของทัวร์มาลีนหลังฉายด้วยรังสีแกมมา จากการประเมินค่าสีของตัวอย่างทัวร์มาลีนทั้งหมดพบว่าการเปลี่ยนสีที่ชัดเจนอยู่ในกลุ่มของทัวร์มาลีนสองสี โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของความสว่างในระบบสีมาตรฐานของ มันทเซลล์ลดลงหนึ่งระดับ เมื่อฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ ตามลำดับ และในตัวอย่างที่ T15 มีการเปลี่ยนแปลงค่าของสีแท้จาก 5BG (น้ำเงินแกมเขียว) เป็น 2.5RP (แดงอมชมพู) เมื่อฉายรังสีแกมมา 600 กิโลเกรย์ ในกลุ่มตัวอย่างสีชมพูส่วนมากการเปลี่ยนแปลงของสีไม่ชัดเจนนัก มีบางตัวอย่างเท่านั้นที่พบการเปลี่ยนสีชัดเจน คือ T16, T17, T18 และ T19 โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสีแท้ ความสว่าง และความอิ่มตัวของสี หลังฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ ตามลำดับ ส่วนในตัวอย่างกลุ่มสีเขียวนั้นถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าของสีแท้ ความสว่าง และความอิ่มตัวของสี แต่ไม่ชัดเจน โดยไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีแต่อย่างใด

5.1.3 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer ผลการวิเคราะห์ที่ตัวอย่างทัวร์มาลีนด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer แล้วศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลีนที่มีสองสีในเม็ดเดียวจะแสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 430-600 นาโนเมตร หลังจากฉายรังสีแกมมา 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ โดยมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่น 518 นาโนเมตร โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวเป็นของ Mn^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีชมพูในทัวร์มาลีนทัวร์มาลีนกลุ่มสีชมพูมีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนแปลงไปในบางตัวอย่าง เช่นในตัวอย่างที่ T33 พบแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 350-420 นาโนเมตร หลังฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ ซึ่งแถบการดูดกลืนดังกล่าวเป็นของ Mn^{2+} หรือในตัวอย่างที่ T37 แสดงแถบการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 430-600 นาโนเมตร หลังฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000

กิโกลเกรย์ ซึ่งแถบการดูดกลืนดังกล่าวเป็นของ Mn^{3+} เป็นต้น สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีเขียวเมื่อเปรียบเทียบกับก่อนฉายรังสีกับหลังฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโกลเกรย์ ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก

5.1.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างทัวร์มาลินในการทดลองนี้ มีองค์ประกอบของธาตุหลักและธาตุรองที่แตกต่างกันออกไป โดยในทุกตัวอย่างจะพบธาตุอะลูมิเนียม ซิลิคอน และแมงกานีส ธาตุโพแทสเซียมและสังกะสีจะพบในตัวอย่างทัวร์มาลินกลุ่มสีเขียว ธาตุแคลเซียมจะพบในกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสองสี และกลุ่มสีชมพู สำหรับธาตุเหล็กพบในตัวอย่างทัวร์มาลิน กลุ่มสีเขียวทุกตัวอย่าง และพบในบางตัวอย่างทัวร์มาลินกลุ่มสีชมพู สำหรับธาตุอื่น ๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว วานาเดียม เป็นต้น พบในบางตัวอย่างเท่านั้น ในการทดลองนี้ได้ทำการวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วย แต่เนื่องจากผลการทดลองออกมาไม่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอน จึงรายงานผลเพียงการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

5.1.5 การวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสและเหล็กด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอนพบธาตุแมงกานีสในตัวอย่างทั้งหมด โดยปริมาณของธาตุแมงกานีสในกลุ่มตัวอย่างสีเขียวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.09-0.90 กลุ่มตัวอย่างสองสีอยู่ในช่วงร้อยละ 1.63-1.77 และในกลุ่มตัวอย่างสีชมพูอยู่ในช่วงร้อยละ 0.05-1.61 สำหรับธาตุเหล็กไม่พบในตัวอย่างที่ T14, T20, T27, T28, T29, T35 และ T37 โดยปริมาณของธาตุเหล็กในกลุ่มตัวอย่างสีเขียวอยู่ในช่วงร้อยละ 0.59-2.65 กลุ่มตัวอย่างสองสีมีค่าร้อยละ 0.01 และในกลุ่มตัวอย่างสีชมพูอยู่ในช่วงร้อยละ 0.01-0.37

5.1.6 การหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลินที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา พบว่า กลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีเขียวมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ในช่วง 0.15-0.55 กลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีชมพูมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ 2 ช่วง คือ ในช่วง 0.97-7.73 และ 51.50-80.50 และกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสองสีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ในช่วง 163.00-177.00

เมื่อพิจารณาถึงสหสัมพันธ์ของอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลินที่ผ่านการฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี พบว่า กลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสองสี เป็นกลุ่มที่มีค่าอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กสูงที่สุด อยู่ในช่วง 163.00-177.00 และเป็นกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงสีหลังฉายรังสีแกมมาชัดเจนที่สุด ดังในตัวอย่างที่ T12 เมื่อฉายด้วยปริมาณรังสีดูดกลืน 600 กิโกลเกรย์ มีการ

เปลี่ยนแปลงค่าของความสว่าง และความอึมตัวของสีในระบบสีมาตรฐานของมันเชลล์ จาก 8 เป็น 6 และ 4 เป็น 12 ตามลำดับ เมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 800 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างจาก 6 เป็น 5 และเมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 1000 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างจาก 5 เป็น 4 ซึ่งตัวอย่างทัวร์มาลินที่เหลือในกลุ่มสองสีจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนที่ฉายให้ทัวร์มาลินในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าตัวอย่างทัวร์มาลินในกลุ่มนี้มีความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลิน การเปลี่ยนแปลงสีหลังฉายรังสีแกมมา และปริมาณรังสีที่ฉายให้กับทัวร์มาลิน

สำหรับกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีชมพูซึ่งอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กรองลงมาจากกลุ่มสองสี คืออยู่ในช่วง 51.50-80.50 ก็เป็นอีกกลุ่มหนึ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงสีหลังฉายรังสีแกมมาค่อนข้างชัดเจน เช่นตัวอย่างที่ T16 เมื่อฉายด้วยปริมาณรังสีดูดกลืน 600 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความสว่างและความอึมตัวของสีในระบบสีมาตรฐานของมันเชลล์จาก 7 เป็น 5 และ 10 เป็น 12 ตามลำดับ เมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 800 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างจาก 5 เป็น 4 และเมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 1000 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความอึมตัวของสีจาก 12 เป็น 10 ตัวอย่างทัวร์มาลินที่เหลือในกลุ่มสีชมพูจะมีการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนที่ฉายให้ทัวร์มาลินในลักษณะเดียวกันคือ มีทั้งการเปลี่ยนแปลงค่าความสว่างและความอึมตัวของสี

ในกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีชมพูซึ่งอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กอยู่ในช่วง 0.97 – 7.73 เป็นกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงสีหลังฉายรังสีแกมมาไม่ชัดเจนนัก มีเพียงบางตัวอย่างเท่านั้นที่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีค่อนข้างชัดเจน เช่นในตัวอย่างที่ T25 ซึ่งมีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กเท่ากับ 7.00 เมื่อฉายด้วยปริมาณรังสีดูดกลืน 600 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงค่าของความสว่าง และความอึมตัวของสีในระบบสีมาตรฐานของมันเชลล์ จาก 7 เป็น 5 และ 6 เป็น 12 ตามลำดับ เมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 800 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความสว่างจาก 5 เป็น 4 และเมื่อฉายรังสีเพิ่มจนได้รับปริมาณรังสีดูดกลืน 1000 กิโลเกรย์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับความอึมตัวของสีจาก 12 เป็น 10

ส่วนในกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินสีเขียวซึ่งเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กน้อยที่สุดคือ อยู่ในช่วง 0.15-0.55 มีการเปลี่ยนแปลงของสีไม่ชัดเจน หลังฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์

เมื่อพิจารณาจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของกลุ่มตัวอย่างทัวร์มาลินกลุ่มสองสีพบว่า หลังฉายรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 600, 800 และ 1000 กิโลเกรย์ มีการแสดงแถบดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ 430-600 นาโนเมตร เป็นของ Mn^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีชมพูใน

ทัวร์มาลีน ซึ่งการแสดงแถบคู่คลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นเดียวกันนี้ยังพบในตัวอย่างทัวร์มาลีนในกลุ่มสีชมพูบางตัวอย่าง แต่ไม่พบในกลุ่มตัวอย่างสีเขียว ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามีผลต่อการเปลี่ยนสี

ทัวร์มาลีนที่ฉายด้วยรังสีแกมมาที่มีการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนในกลุ่มสีชมพูพบว่ามีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กมากกว่า 51.50 และทัวร์มาลีนที่ฉายด้วยรังสีแกมมาในกลุ่มสองสีซึ่งเป็นกลุ่มที่มีการเปลี่ยนแปลงสีชัดเจนที่สุดพบว่ามีอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กมากกว่า 163.00

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากทัวร์มาลีนเป็นอัญมณีที่มีเจดสีหลากหลาย และจากการทดลองนี้ได้เก็บตัวอย่างเพียงสามเจดสี ดังนั้นในการนำมาฉายรังสีแกมมาเพื่อเพิ่มคุณค่าจำเป็นต้องมีการเก็บตัวอย่างที่หลากหลายเพื่อที่จะสามารถกำหนดปริมาณรังสีสำหรับฉายรังสีได้อย่างเหมาะสมต่อไป และนอกจากนี้ยังควรต้องพิจารณาถึงแหล่งกำเนิดของทัวร์มาลีนที่จะนำมาฉายรังสีแกมมาด้วย

5.2.2 ในทางปฏิบัติเทคนิคการวิเคราะห์โดยการก่อกัมมันต์ด้วยนิวตรอนเพื่อหาอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีน มีขั้นตอนและต้องใช้เวลาในการวิจัยมาก ดังนั้นควรพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยการเรืองรังสีเอกซ์ให้มีความถูกต้องแม่นยำ โดยทำการวิเคราะห์ในหลาย ๆ ตำแหน่งบนเม็ดตัวอย่างทัวร์มาลีน หรืออาจทำการบดตัวอย่างก่อนทำการวิเคราะห์ ก็จะสามารถกำหนดปริมาณรังสีแกมมาที่จะฉายเพื่อเปลี่ยนสีให้ได้ตามที่ต้องการได้รวดเร็วขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ชาญชัย อัสววินิจกุลชัยและคณะ. การศึกษาเบื้องต้นความสัมพันธ์ระหว่างธาตุองค์ประกอบกับสีของทัวร์มาลีน. ใน อัญมณีรายรังสี, หน้า 46-55. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2548.
- [2] อัจฉรา แสงอรียวนิชและคณะ. การวิเคราะห์ทัวร์มาลีนสีชมพูด้วยเทคนิคการวาวรังสีเอกซ์. ใน อัญมณีรายรังสี, หน้า 56-61. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2548.
- [3] Marly Bueno De Camargoc and Sadao Isot Ani. Optical absorption spectroscopy of natural and irradiated pink tourmaline. In American Mineralogist, pp. 172-180. Brazil : University of Sao Paulo, 1988.
- [4] เฉลิมชัย จันทาพูน. การทดลองเพื่อเพิ่มคุณภาพทัวร์มาลีนจากแอฟริกาด้วยเทคนิคการฉายรังสี. วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาอัญมณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551.
- [5] ปราณีย์ ไทยเที่ยง. การเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนเมื่อผ่านการฉายรังสีนิวตรอน. วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณี วิทยาลัยอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา, 2549.
- [6] Robert Webster. Gems Their Source, Description and Identification. 4th edition. England : Butterworth & Co (Publishers) Ltd, 1983.
- [7] K. Nassau. The physics and chemistry of color. United States : John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [8] สุมาลี เทพโสพรรณ. วิเคราะห์อัญมณี. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : ด่านสุทธาการพิมพ์, 2551.
- [9] สุมาลี เทพโสพรรณ. ทัวร์มาลีน. สารานุกรมโลกอัญมณี. 1 (2547) : 70-72.
- [10] วัลลภ บุญคง. การเปลี่ยนสีของอัญมณีเมื่อฉายรังสี. ใน อัญมณีรายรังสี, หน้า 6-12. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2548.
- [11] Glenn F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. 3rd ed. New York: John Wiley & sons Inc, 1999.
- [12] แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์, 2535.
- [13] ชลนที อักษรประดิษฐ์ และสุณิสา บุตรภักดิ์. การวิเคราะห์ธาตุในหินทรายและศิลาแลงโดยวิธี ทางนิวเคลียร์. วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- [14] Rolf Woldseth. X-ray Energy Spectrometry. United States: Kevex Corporation, 1973.

[15] ศิวาพร สหวัฒน์. อัญมณีศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1 นนทบุรี: Nudear, 2549.

[16] วรนุช อภรณ์รัตน์. การเปลี่ยนสีโทแพซด้วยการฉายรังสีแกมมา. วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณี วิทยาลัยอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา, 2547.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

รายงานผลการวัดปริมาณรังสีดูดกลืน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานผลการวัดปริมาณรังสีแกมมา

ชื่อโครงการ/งาน การหาสหสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของแมงกานีสและเหล็กในทัวร์มาลีนที่ผ่าน
การฉายรังสีแกมมากับการเปลี่ยนสี

ผู้รายงาน/หน่วยงาน นายอภิเชษฐ์ มณีวงษ์ ศร. สทน

ชนิดของเครื่องฉายรังสี Gammacell 220 Excell

ชนิดของเครื่องวัดปริมาณรังสี Redperspex

วันที่ฉายรังสี 22 มีนาคม 2552

อ้างอิง การกระจายของปริมาณรังสี (Dose Mapping) วันที่.....mapping.....

เลขที่.....

ผลการวัดปริมาณรังสี

No.of Dosimeter	position	Dose (kGy)	Average Dose (kGy)	note
1		9.39	9.67	ใช้เวลาในการฉาย 1 ชั่วโมง
2		9.84		
3		9.61		
4		9.82		

ผู้ทำการวัด/ตรวจสอบผลการวัด

(นายอาร์กษ วิทิตธีรานนท์)

หมายเหตุ

รายงานนี้จัดทำโดยห้องปฏิบัติการมาตรฐานด้านการวัดปริมาณรังสีระดับสูง สำนักงานปรมาณูเพื่อ
สันติ

































ภาคผนวก ข

รายงานผลการประเมินค่าสี่ด้วยชุดเทียบตีมาตรฐานของมันเชลล์

































ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานผลการประเมินค่าสีทัวร์มาลินก่อนและหลังฉายรังสีด้วยชุดเทียบสีมาตรฐานของมันเซลล์

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินที่ก่อนการฉายรังสีเกมมา

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T1		5GY	5	4	 5GY5/4
T2		5GY	5	6	 5GY5/6
T3		5GY	5	4	 5GY5/4
T4		5GY	6	6	 2.5GY6/6
T5		2.5G	9	4	 2.5G9/4
T6		7.5GY	8	4	 7.5GY8/4
T7		2.5G	9	2	 2.5G9/2
T8		10GY	8	4	 10GY8/4
T9		2.5G	9	2	 2.5G9/2
T10		7.5GY	7	4	 7.5GY7/4
T11		2.5G	8	4	 2.5G8/4
T12		2.5RP	8	4	 2.5RP8/4
T13		2.5RP	9	2	 2.5RP9/2
T14		2.5RP	8	2	 2.5RP8/2
T15		2.5BG	9	2	 5BG9/2

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของตัวร้วมาลินที่ก่อนการฉายรังสีแกมมา (ต่อ)

รหัส	สีตัวร้วมาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T16		2.5RP	7	10	 5RP7/10
T17		5RP	7	8	 5RP7/8
T18		2.5RP	6	10	 2.5RP6/10
T19		5RP	6	12	 5RP6/12
T20		7.5RP	8	6	 7.5RP8/6
T21		5RP	7	10	 5RP7/10
T22		2.5RP	8	6	 5RP8/6
T23		2.5RP	7	4	 2.5RP7/4
T24		5RP	7	4	 5RP7/4
T25		2.5RP	7	6	 2.5RP7/6
T26		2.5RP	7	4	 2.5RP7/4
T27		5RP	7	2	 5RP9/2
T28		7.5RP	9	2	 7.5RP9/2
T29		5RP	8	4	 5RP8/4
T30		7.5RP	9	2	 7.5RP9/2
T31		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4

































ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินที่ก่อนการฉายรังสีแกมมา (ต่อ)

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T32		2.5RP	8	4	 2.5R8/4
T33		2.5GY	8	4	 2.5GY8/4
T34		2.5G	9	4	 2.5G9/4
T35		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T36		7.5RP	6	8	 7.5RP6/8
T37		5RP	9	2	 5RP9/2























ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 600 kGy

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T1		5GY	5	4	 5GY5/4
T2		2.5GY	5	4	 2.5GY5/4
T3		5GY	5	4	 5GY5/4
T4		5GY	5	4	 5GY5/4
T5		2.5G	9	4	 2.5GY9/4
T6		5GY	8	2	 5GY8/2
T7		10GY	9	2	 10GY9/2
T8		5GY	7	4	 5GY7/4

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของตัวร้อมาลินหลังฉายรังสีแกมมา 600 kGy (ต่อ)

รหัส	สีตัวร้อมาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T9		7.5GY	9	2	 7.5GY9/2
T10		5GY	7	4	 5GY7/4
T11		10GY	8	2	 10GY8/2
T12		2.5RP	6	12	 2.5RP6/12
T13		2.5RP	7	8	 2.5RP7/8
T14		2.5RP	6	12	 2.5RP6/12
T15		2.5RP	6	12	 2.5RP6/12
T16		5RP	5	12	 5RP5/12
T17		5RP	6	10	 5RP6/10
T18		5RP	5	10	 5RP5/10
T19		2.5RP	6	10	 2.5RP6/10
T20		7.5RP	8	6	 7.5RP8/6
T21		5RP	7	8	 5RP7/8
T22		5RP	8	6	 5RP8/6
T23		2.5RP	7	6	 2.5RP7/6
T24		2.5RP	6	8	 2.5RP6/8

































ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 600 kGy (ต่อ)

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเชลล์
		Hue	Value	Chroma	
T25		2.5RP	5	12	 2.5RP5/12
T26		2.5RP	7	6	 2.5RP7/6
T27		5RP	8	6	 5RP8/6
T28		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T29		7.5RP	7	6	 7.5RP7/6
T30		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T31		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T32		10RP	8	4	 10RP8/4
T33		2.5Y	8	4	 2.5Y8/4
T34		10GY	8	4	 10GY8/4
T35		10RP	8	4	 10RP8/4
T36		7.5RP	6	8	 7.5RP6/8
T37		5RP	7	6	 5RP7/6

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 800 kGy

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเชลล์
		Hue	Value	Chroma	
T1		5GY	5	4	 5GY5/4

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของท้วร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 800 kGy (ต่อ)

รหัส	สีท้วร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T2		2.5GY	5	4	 2.5GY5/4
T3		7.5GY	5	4	 7.5GY5/4
T4		2.5GY	6	6	 2.5GY6/6
T5		2.5G	8	4	 2.5G8/4
T6		5GY	8	4	 5GY8/4
T7		2.5G	8	4	 2.5G8/4
T8		5GY	7	6	 5GY7/6
T9		10GY	8	4	 10GY8/4
T10		5GY	7	6	 5GY7/6
T11		2.5G	8	4	 2.5G8/4
T12		2.5RP	5	12	 2.5RP5/12
T13		2.5RP	6	8	 2.5RP6/8
T14		2.5RP	4	12	 2.5RP4/12
T15		2.5RP	5	12	 2.5RP5/12
T16		5RP	4	12	 5RP4/12
T17		5RP	5	10	 5RP5/10





















ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของตัวร้อมลินหลังฉายรังสีแกมมา 800 kGy (ต่อ)

รหัส	สีตัวร้อมลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T18		5RP	5	10	 5RP5/10
T19		2.5RP	4	10	 2.5RP4/10
T20		7.5RP	8	6	 7.5RP8/6
T21		5RP	7	8	 5RP7/8
T22		5RP	8	6	 5RP8/6
T23		2.5RP	5	8	 2.5RP5/8
T24		2.5RP	5	8	 2.5RP5/8
T25		2.5RP	4	12	 2.5RP4/12
T26		2.5RP	6	8	 2.5RP6/8
T27		7.5RP	7	6	 7.5RP7/6
T28		2.5RP	7	4	 2.5RP7/4
T29		7.5RP	7	6	 2.5RP7/6
T30		10RP	8	4	 10RP8/4
T31		5RP	8	4	 5R8/4
T32		10RP	7	6	 10RP7/6
T33		5RP	7	8	 5RP7/8












ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของท้วร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 800 kGy (ต่อ)

รหัส	สีท้วร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T34		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T35		10RP	7	6	 10RP7/6
T36		7.5RP	5	8	 7.5RP5/8
T37		5RP	7	6	 5RP7/6























ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของท้วร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 1000 kGy

รหัส	สีท้วร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T1		5GY	4	4	 5GY4/4
T2		2.5GY	4	6	 2.5GY4/6
T3		7.5GY	5	4	 7.5GY5/4
T4		2.5GY	6	6	 2.5GY6/6
T5		2.5G	8	4	 2.5G8/4
T6		7.5GY	8	4	 7.5GY8/4
T7		2.5G	9	2	 2.5G9/2
T8		5GY	7	4	 5GY7/4
T9		7.5GY	8	2	 7.5GY8/2
T10		2.5GY	7	4	 2.5GY7/4

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของตัววัสดุหลังฉายรังสีแกมมา 1000 kGy (ต่อ)

รหัส	สีตัววัสดุ	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T11		10GY	8	2	 10GY8/2
T12		2.5RP	4	12	 2.5RP4/12
T13		2.5RP	5	8	 2.5RP5/8
T14		2.5RP	4	12	 2.5RP4/12
T15		2.5RP	4	12	 2.5RP4/12
T16		5RP	4	10	 5RP4/10
T17		5RP	5	12	 5RP5/12
T18		5RP	3	10	 5RP3/10
T19		2.5RP	5	12	 2.5RP5/12
T20		7.5RP	8	6	 7.5RP8/6
T21		5RP	7	10	 5RP7/10
T22		2.5RP	8	6	 2.5RP8/6
T23		2.5RP	6	10	 2.5RP6/10
T24		2.5RP	6	10	 2.5RP6/10
T25		2.5RP	4	10	 2.5RP4/10
T26		2.5RP	6	8	 2.5RP6/8

ตารางแสดงผลการประเมินค่าสีของทัวร์มาลินหลังฉายรังสีแกมมา 1000 kGy (ต่อ)

รหัส	สีทัวร์มาลิน	ค่าสีที่อ่านได้			สีมันเซลล์
		Hue	Value	Chroma	
T27		5RP	8	6	 5RP8/6
T28		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T29		5RP	8	6	 5RP8/6
T30		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T31		5RP	8	4	 5R8/4
T32		10RP	7	6	 10RP7/6
T33		10RP	7	8	 5RP7/8
T34		7.5RP	8	4	 7.5RP8/4
T35		10RP	7	6	 10RP7/6
T36		7.5RP	5	8	 7.5RP5/8
T37		5RP	7	8	 5RP7/8

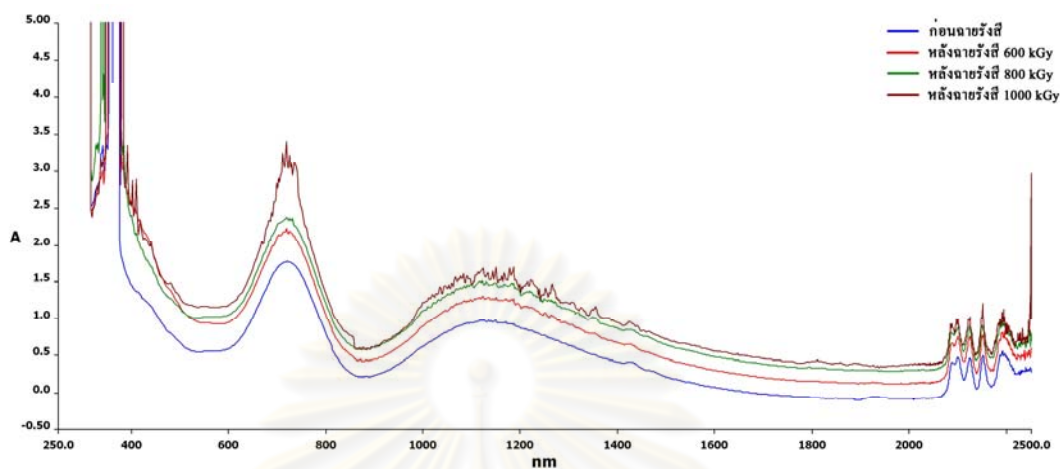


ภาคผนวก ค

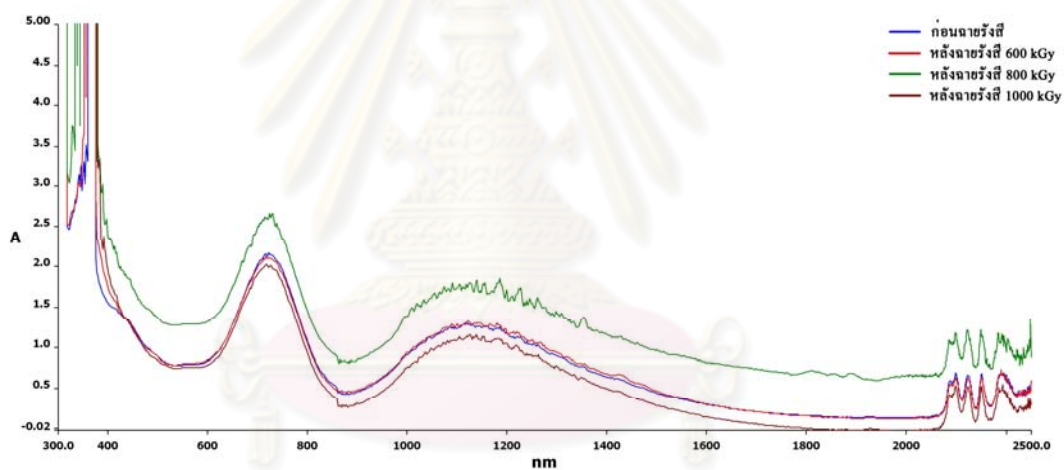
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทัวร์มาลีน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

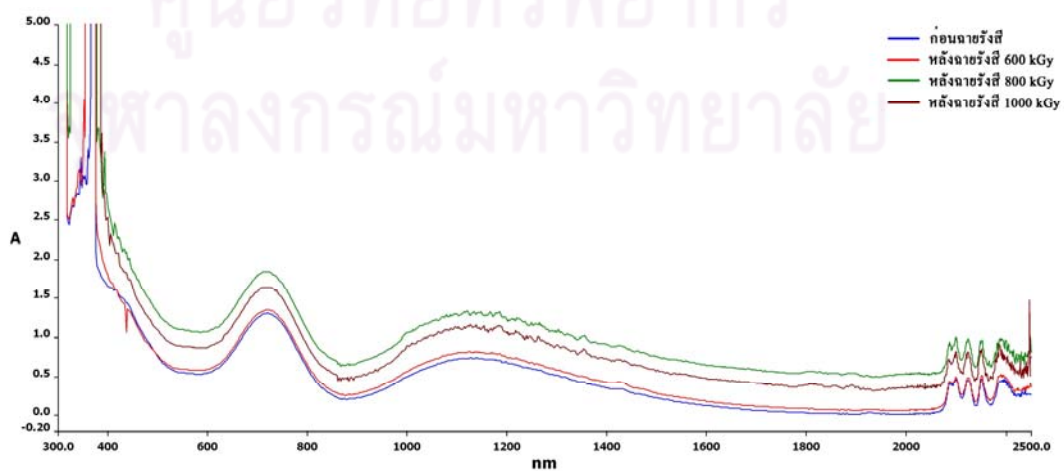
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทัวร์มาลีนก่อนและหลังฉายรังสี



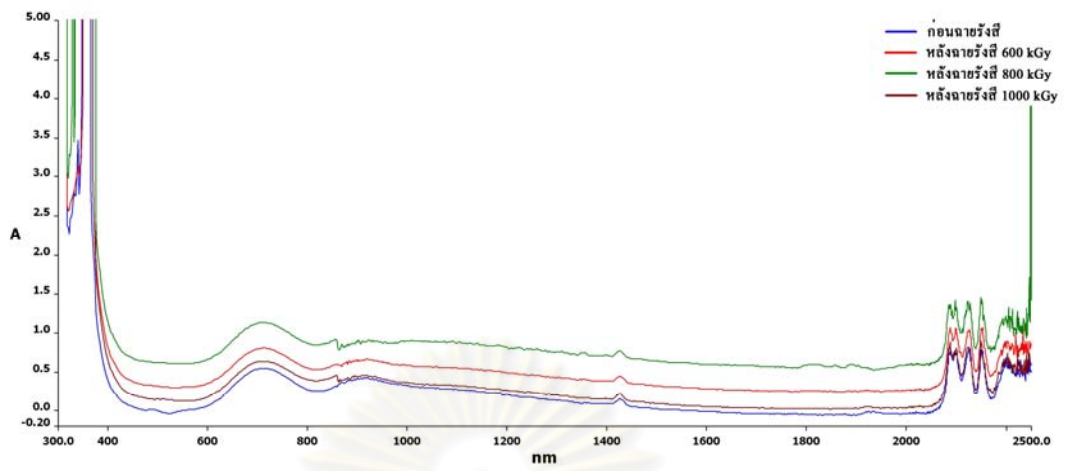
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T1



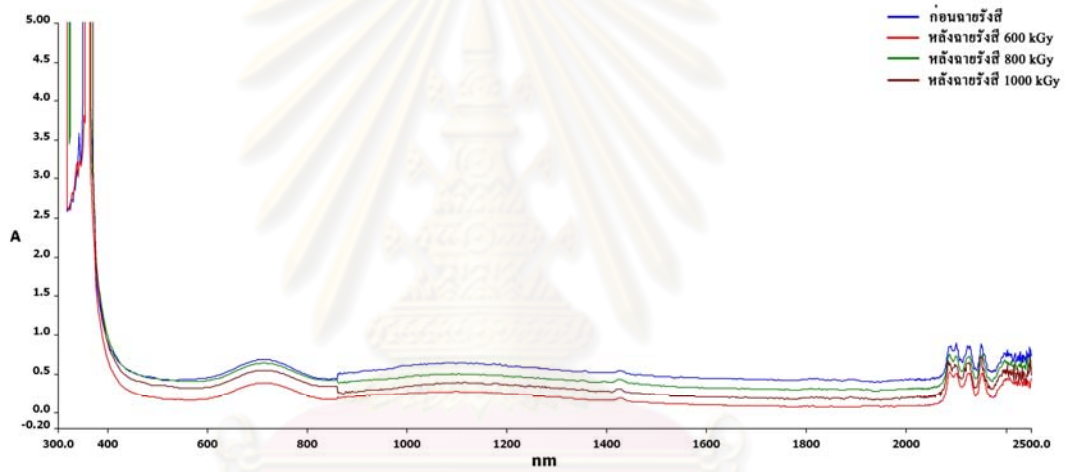
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T3



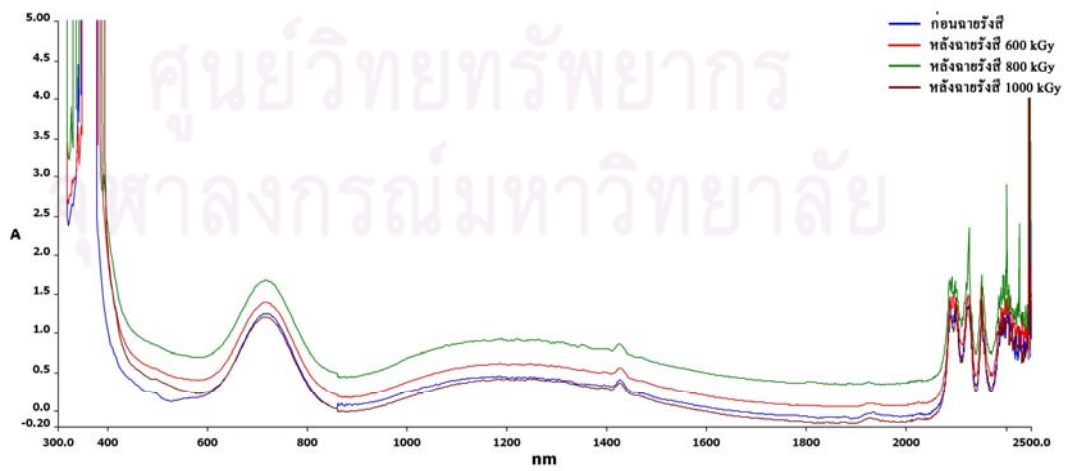
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T4



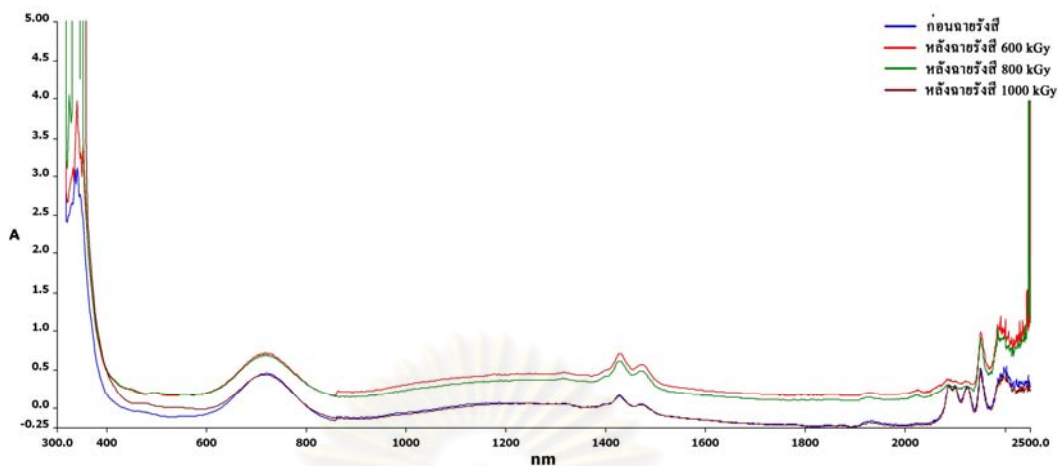
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T5



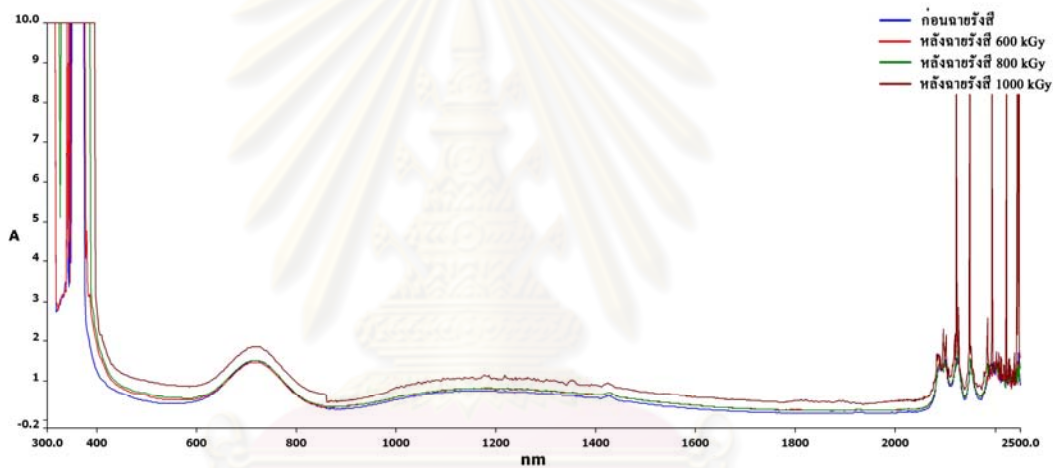
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T6



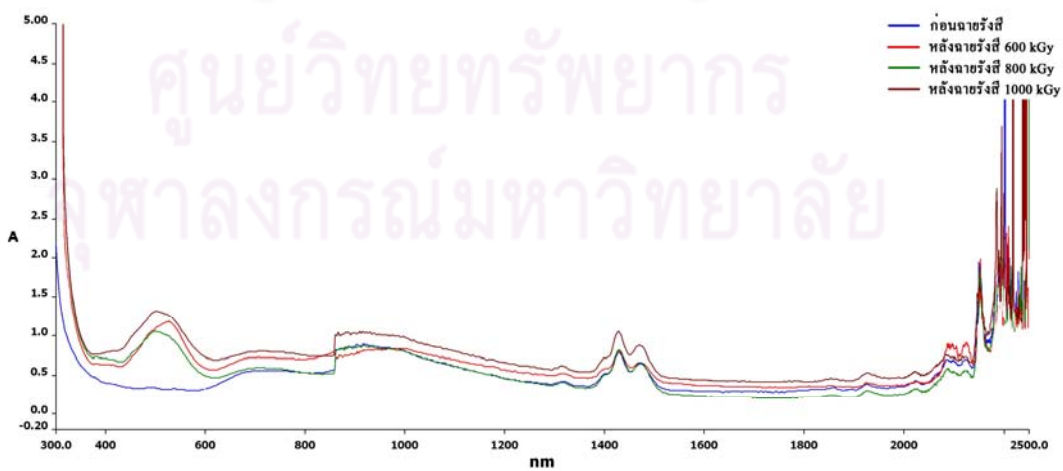
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T8



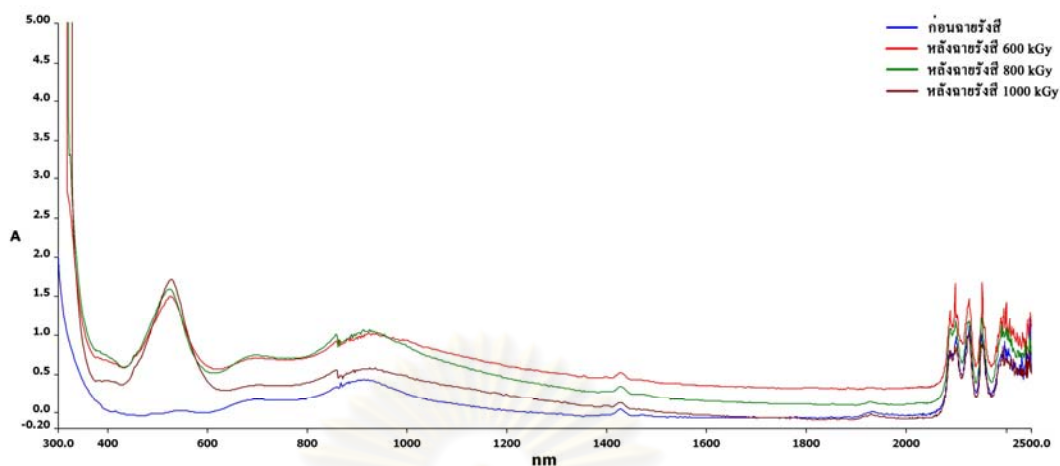
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T9



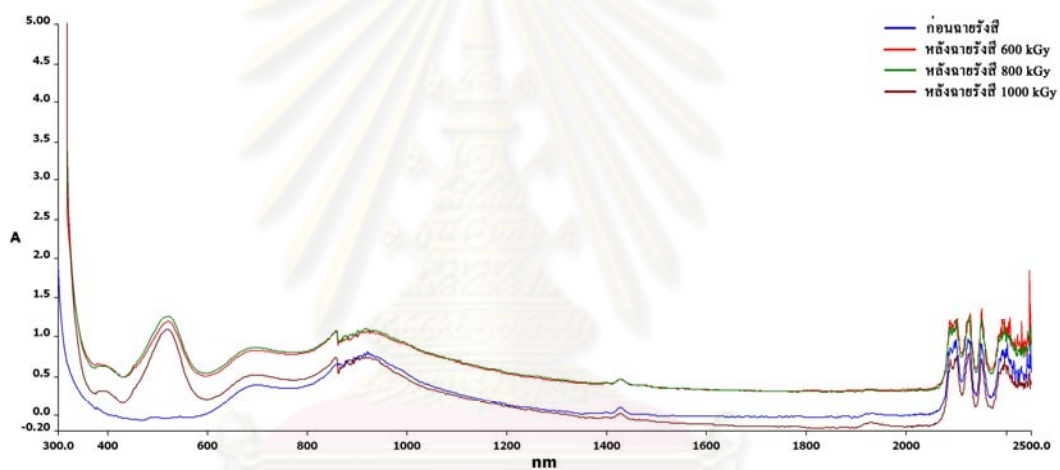
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T11



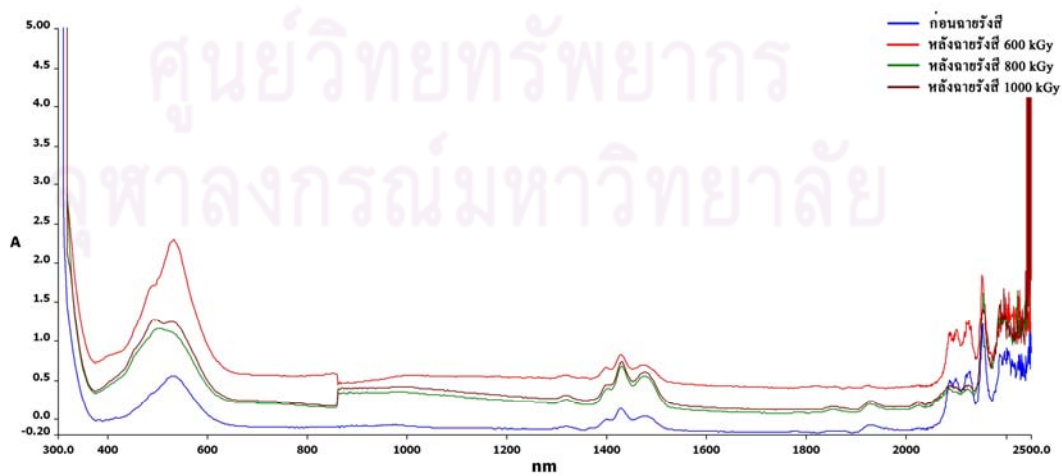
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T13



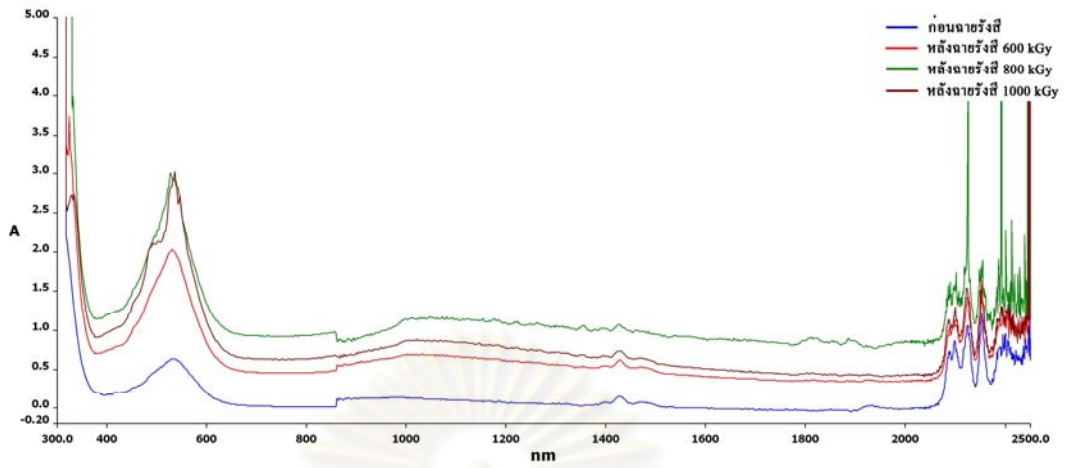
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T14



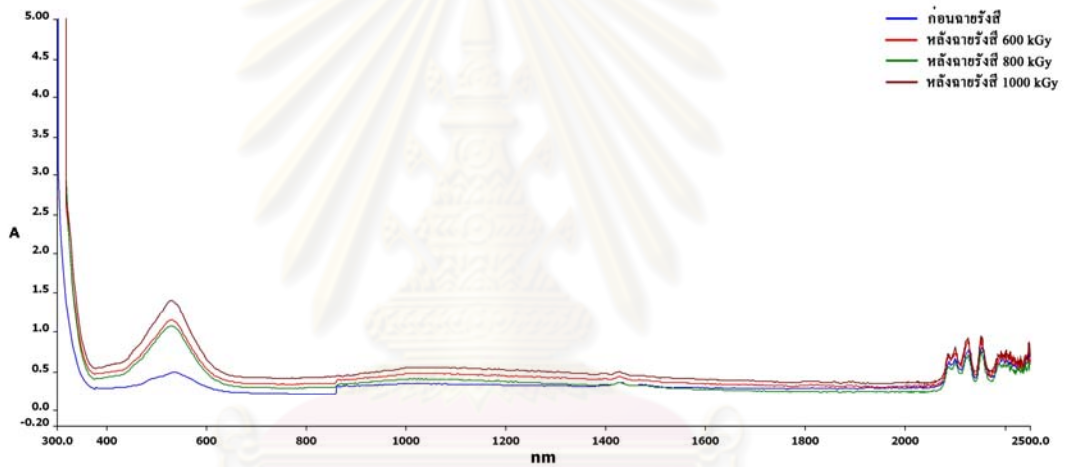
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T15



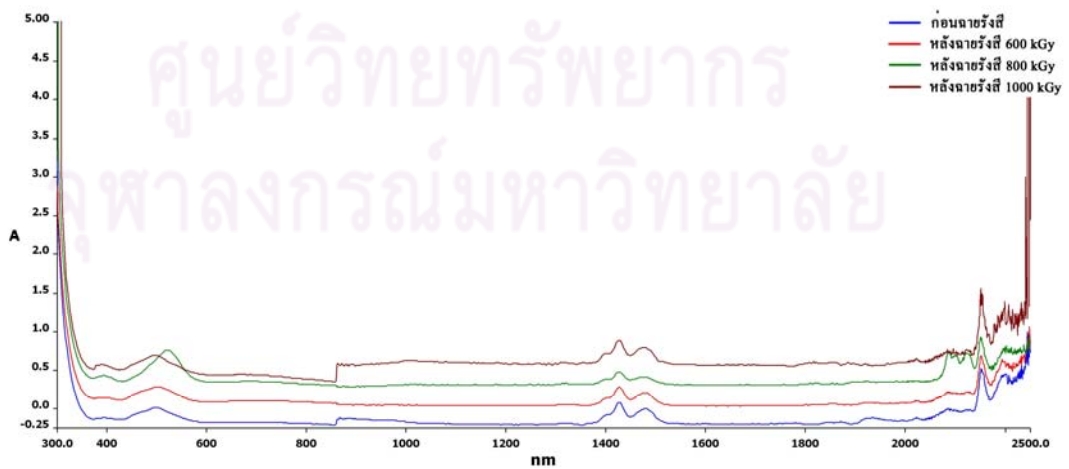
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T16



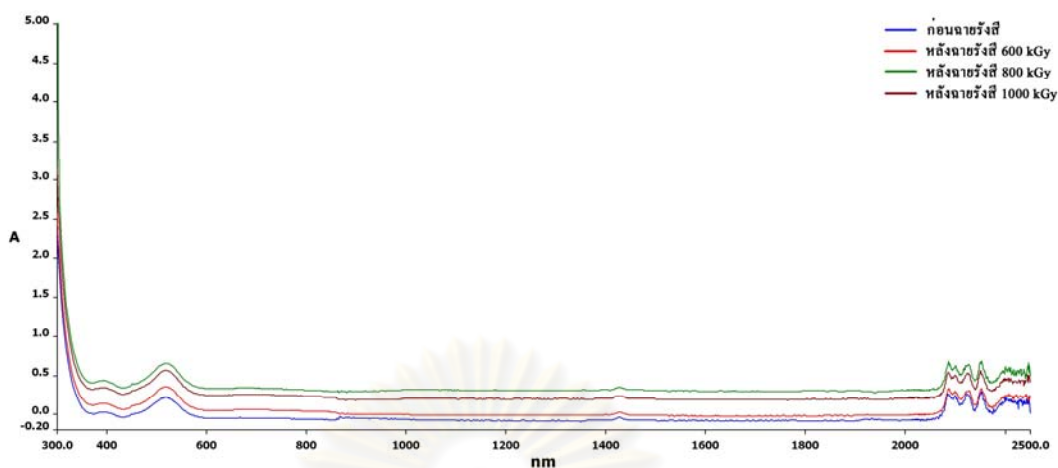
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T18



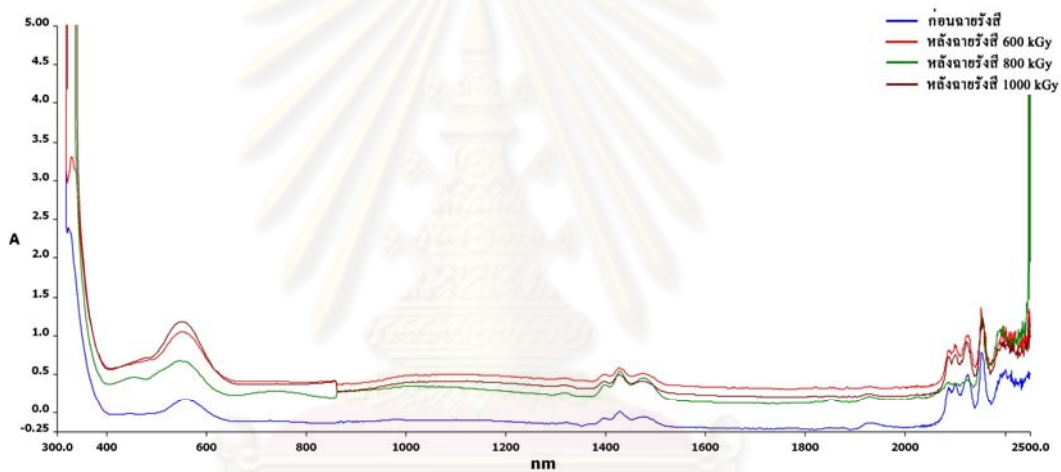
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T19



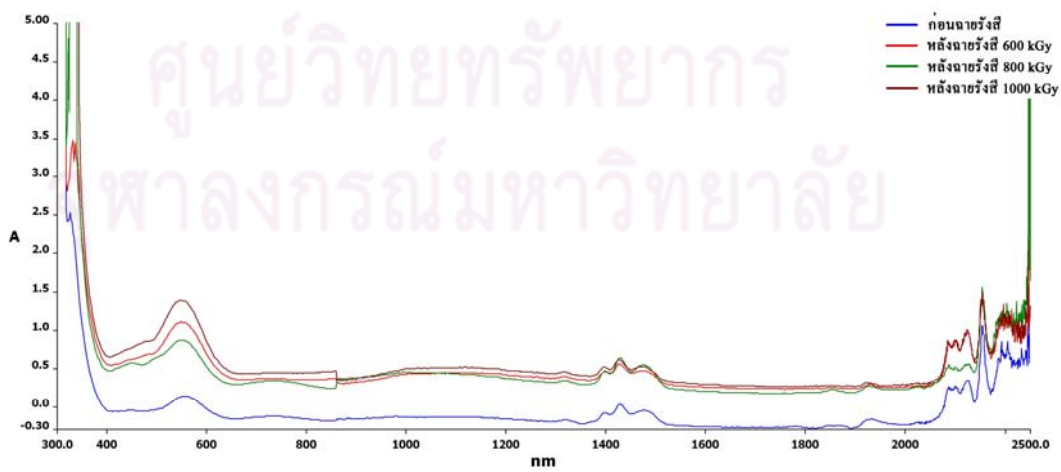
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T20



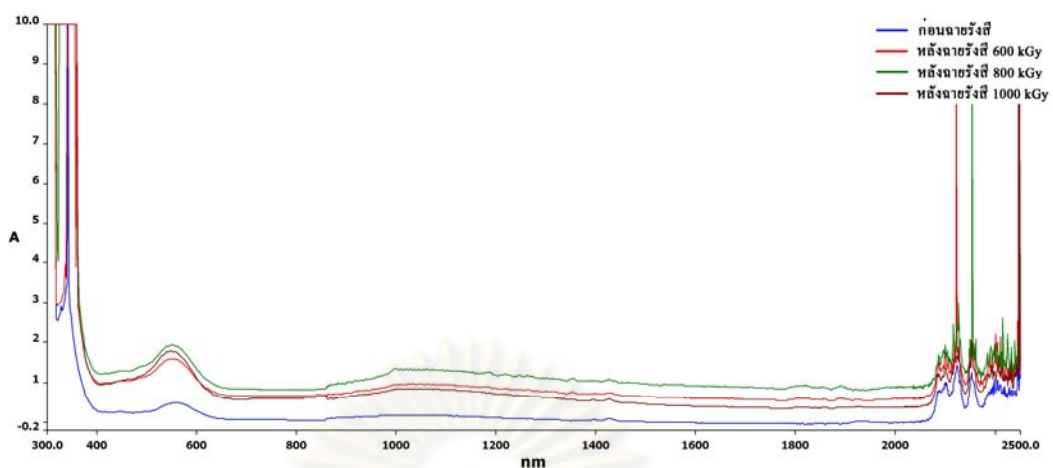
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T22



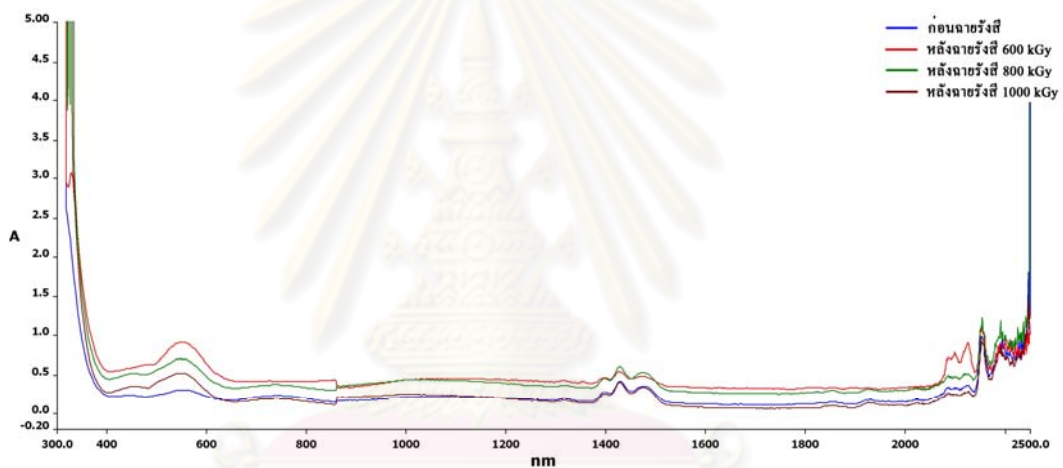
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T23



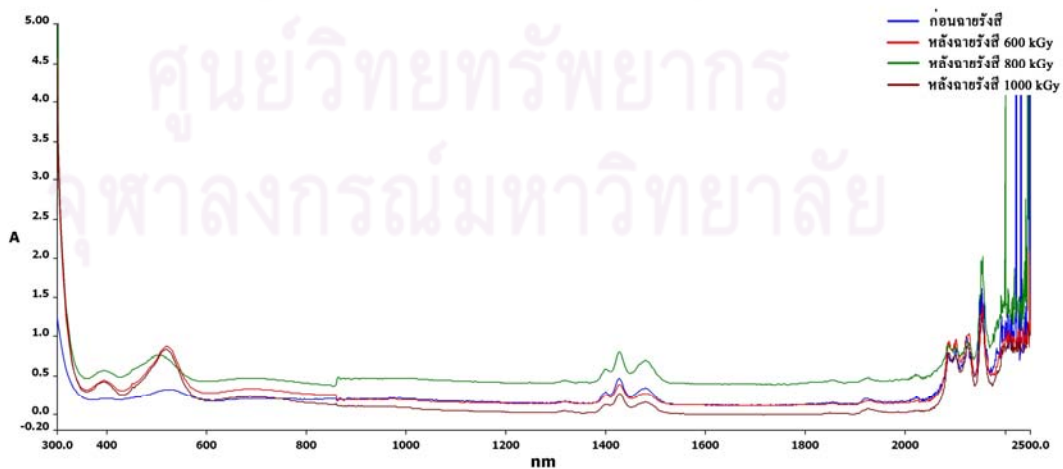
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T24



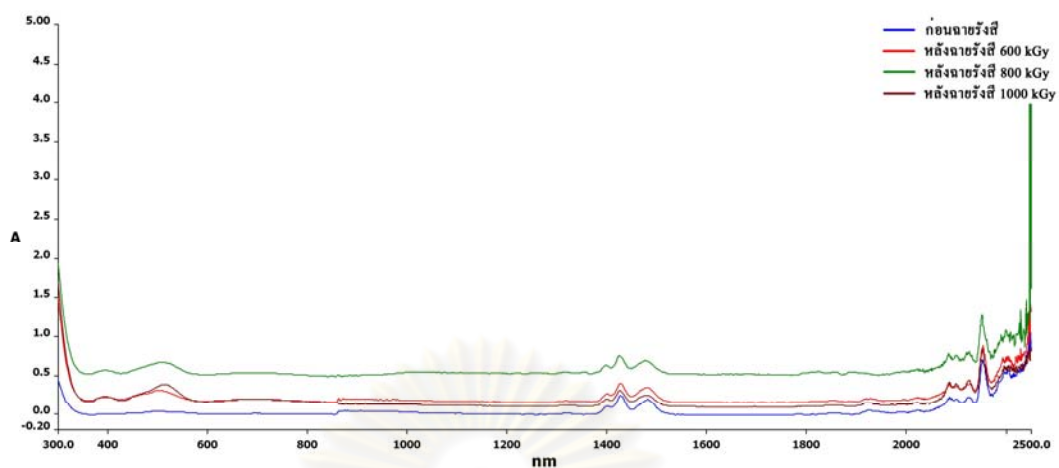
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T25



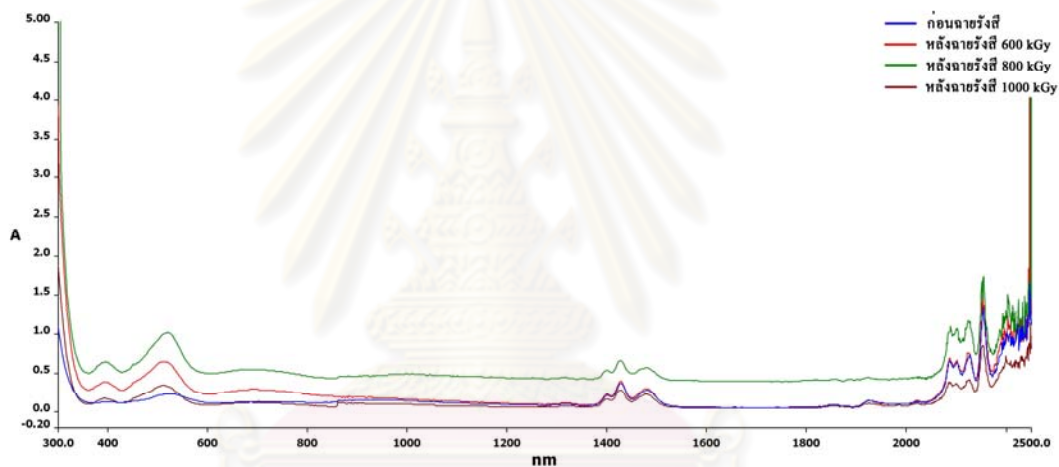
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T26



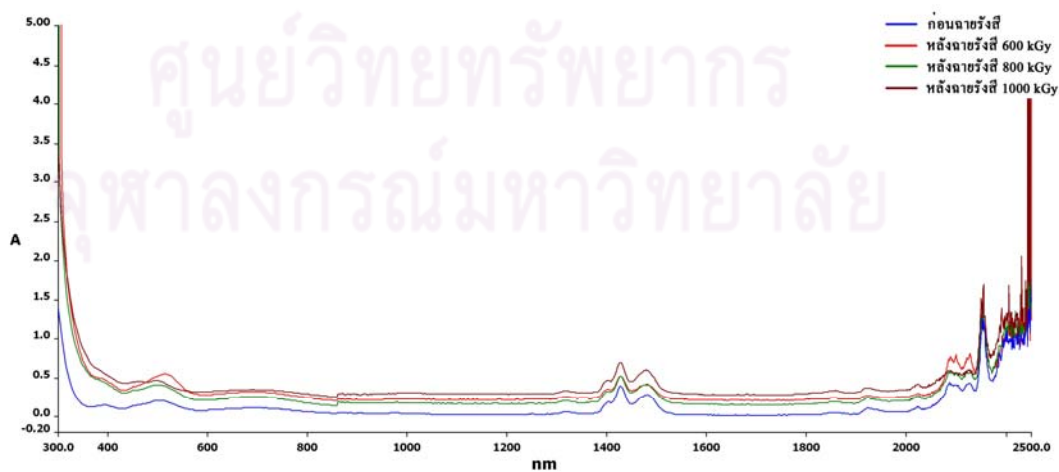
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T27



สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T28

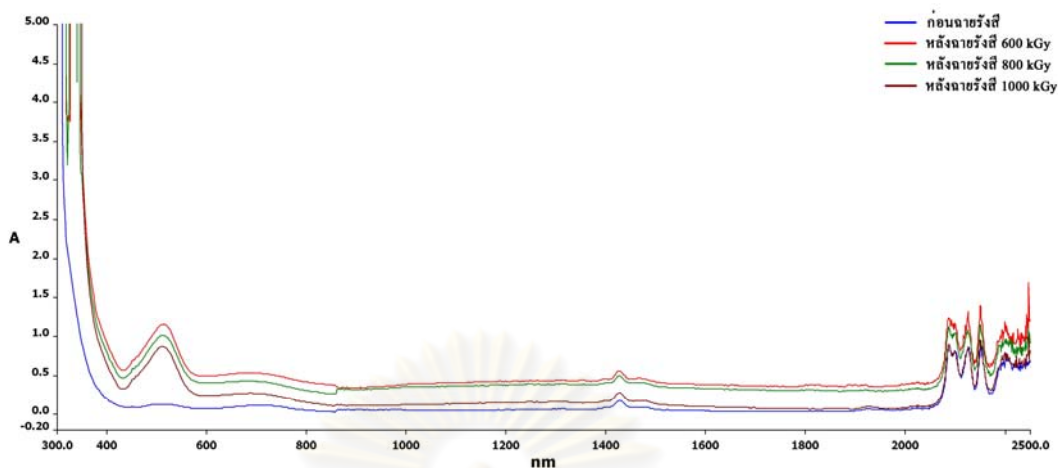


สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T29

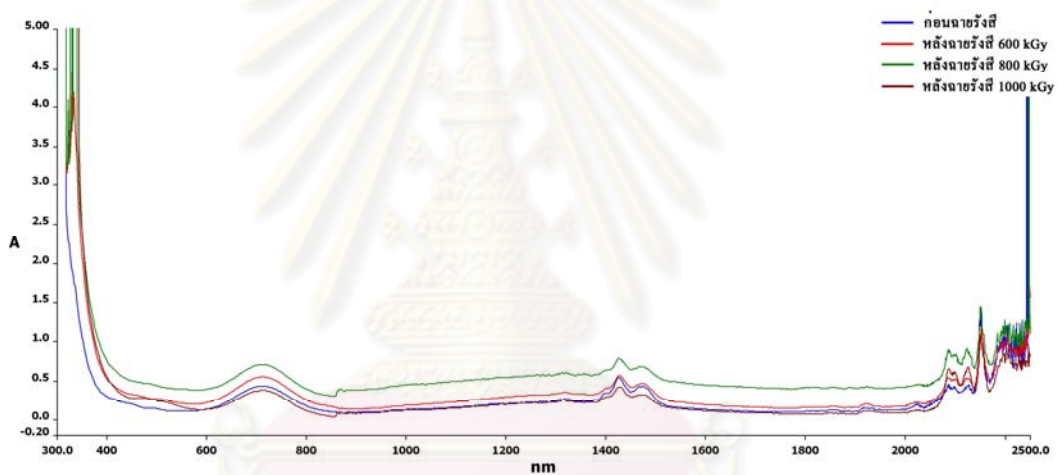


สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T31

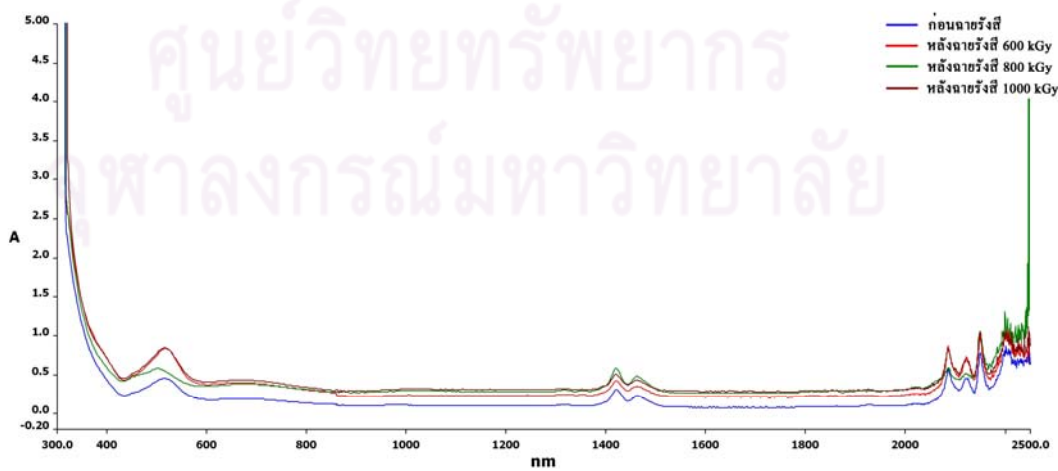
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T32



สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T34



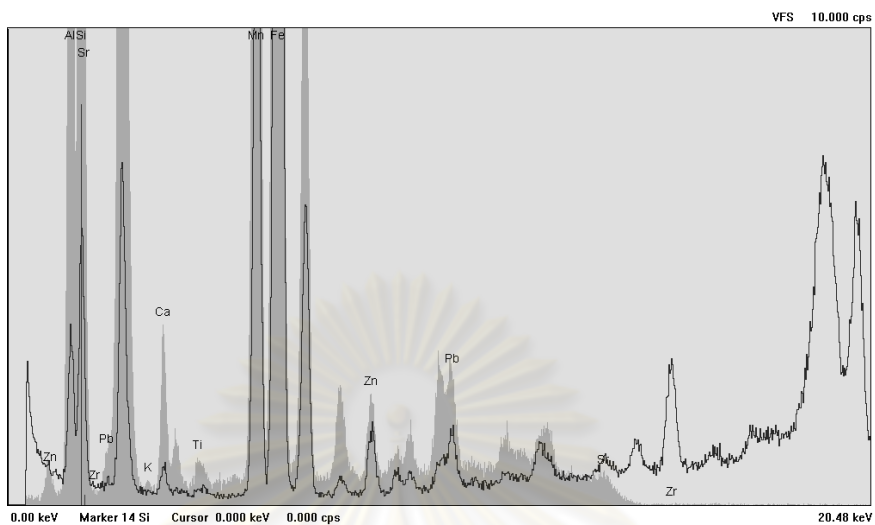
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ T35



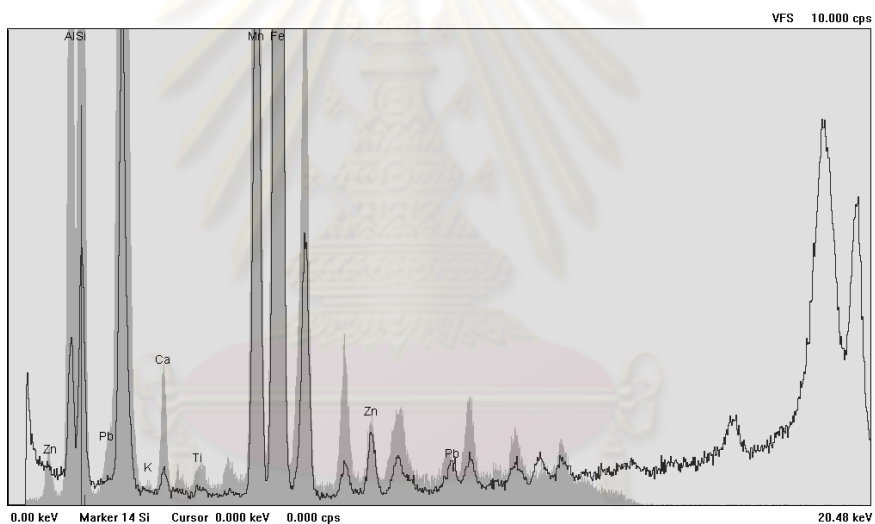
ภาคผนวก ง
เอกซ์เรย์สเปกตรัม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

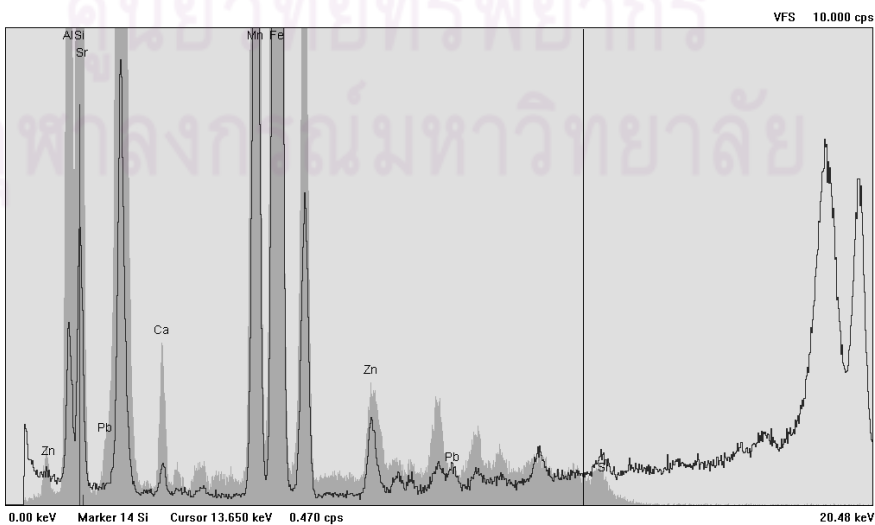
เอกซเรย์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนแต่ละตัวอย่าง



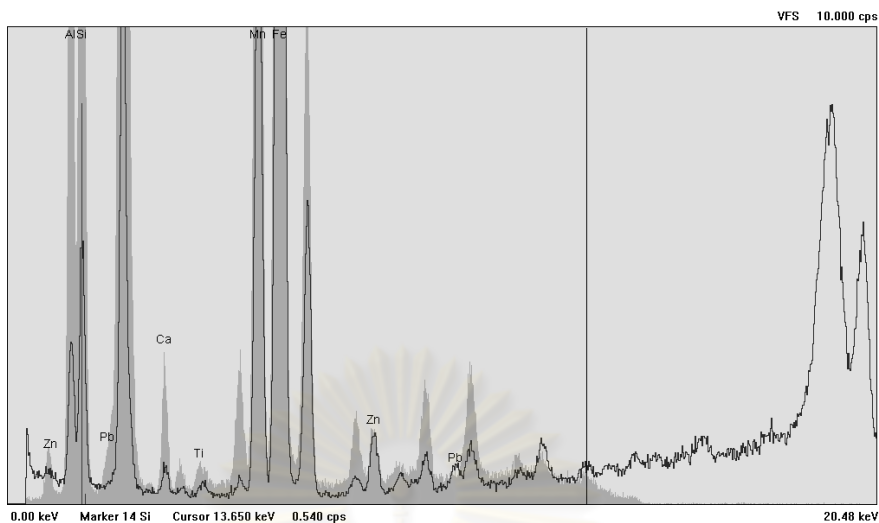
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T01



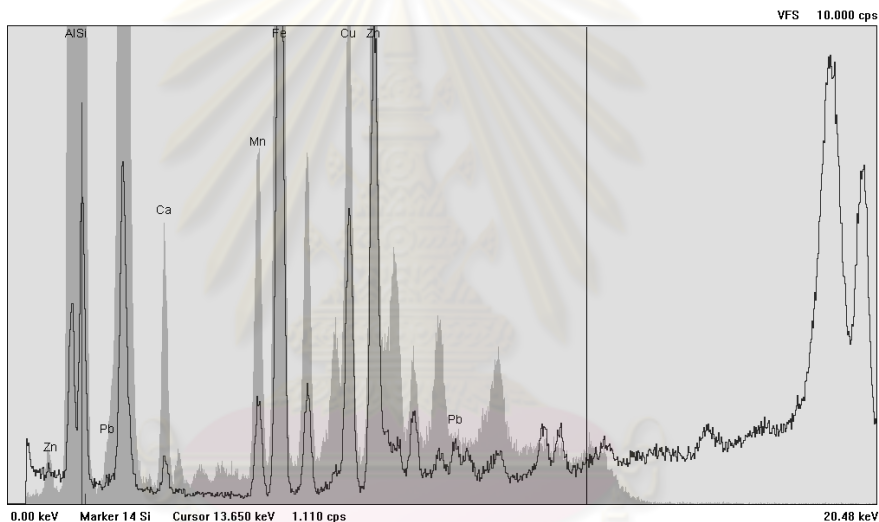
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T02



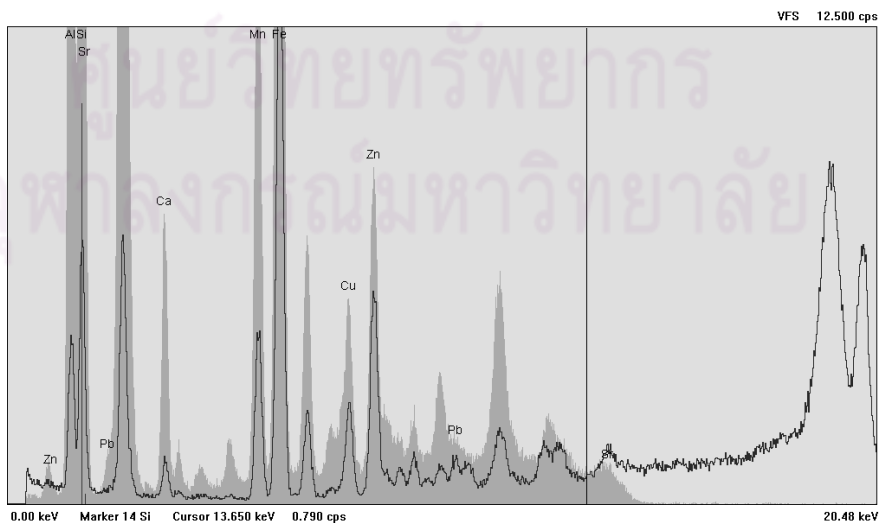
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T03



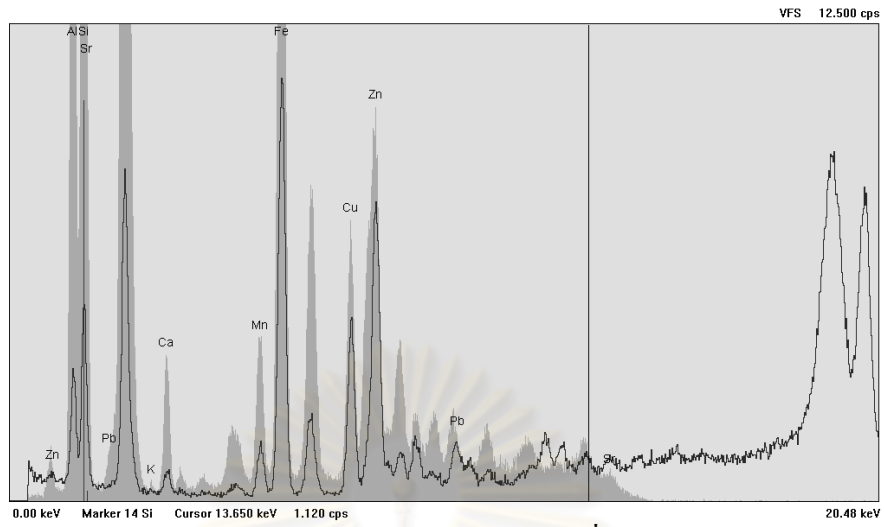
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T04



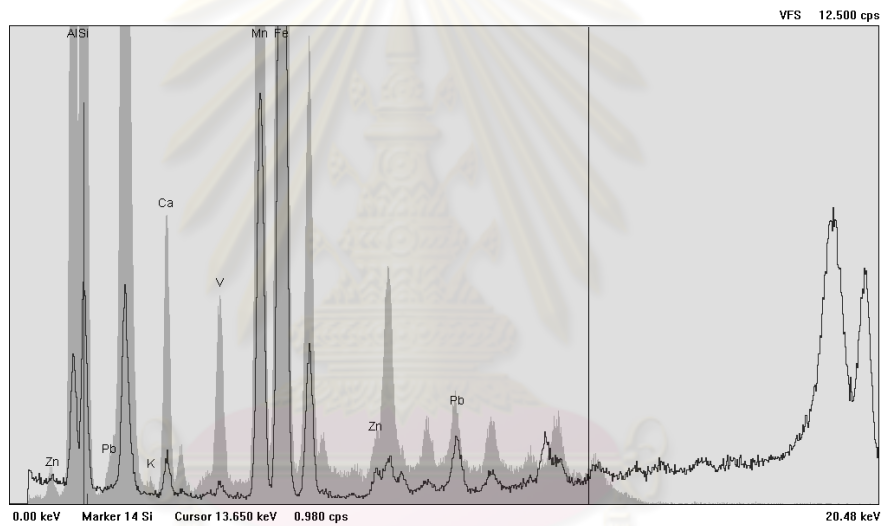
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T05



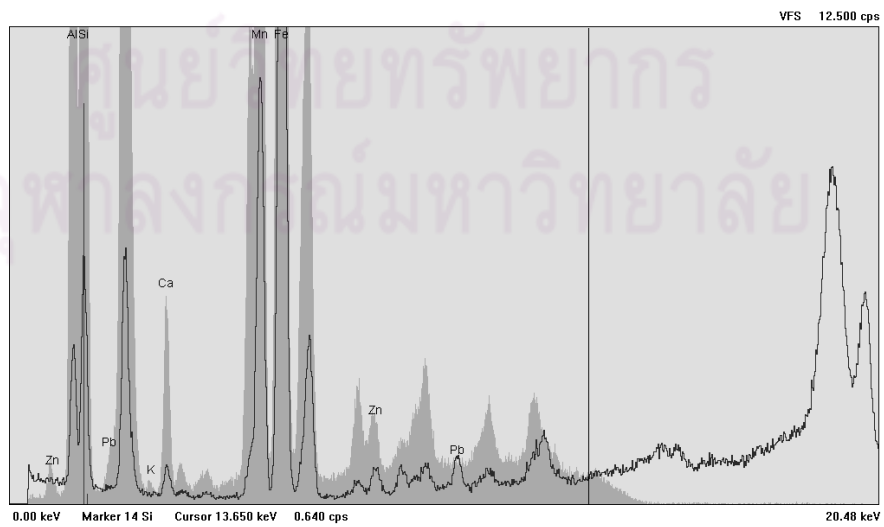
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T06



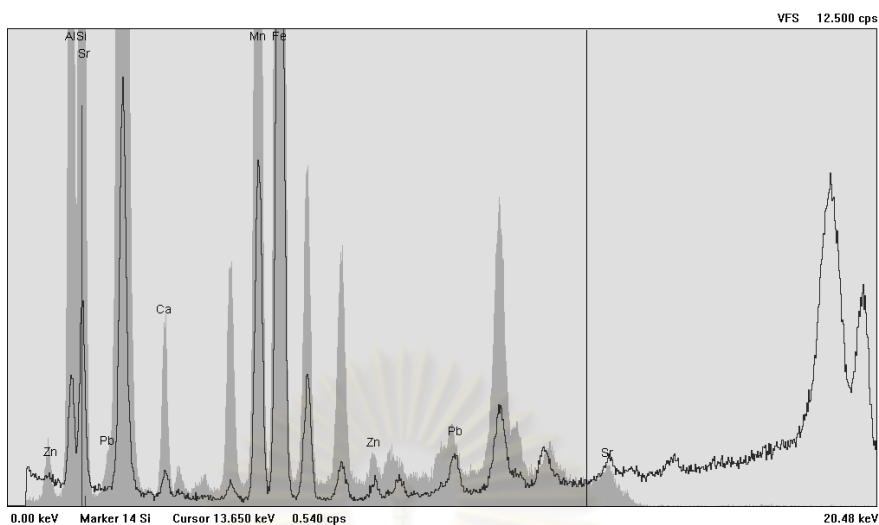
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T07



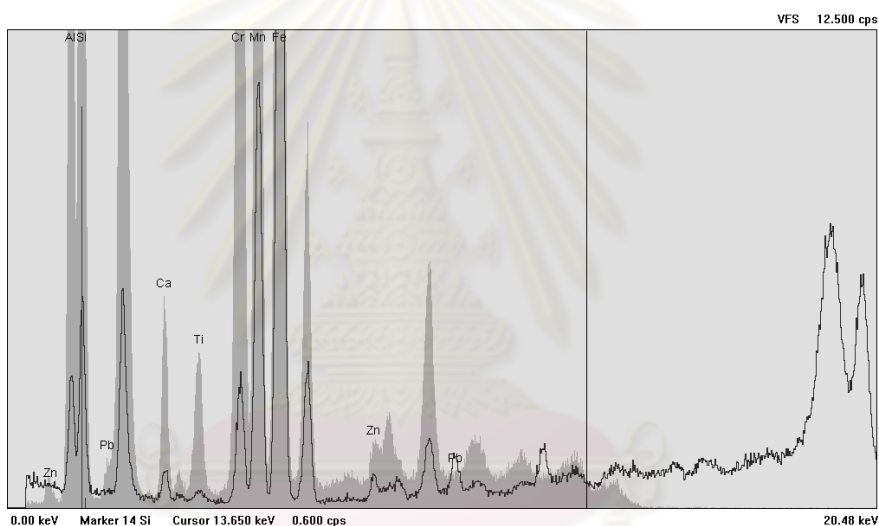
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T08



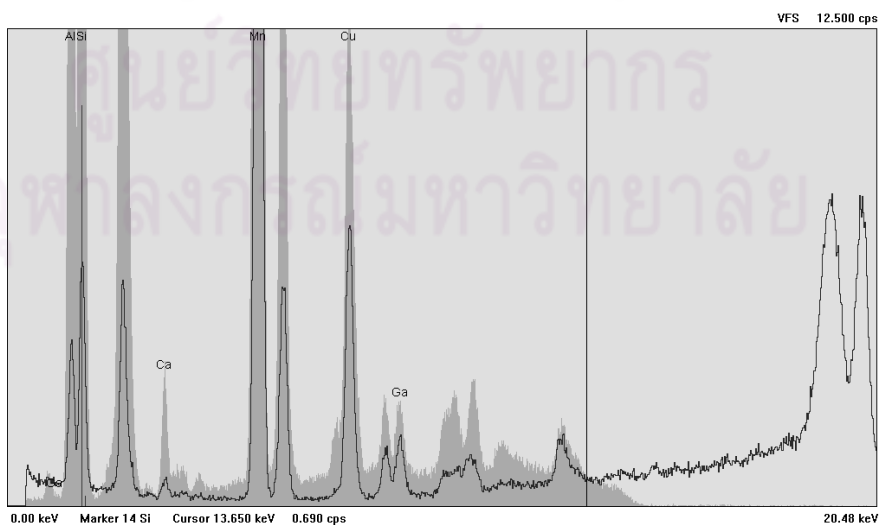
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T09



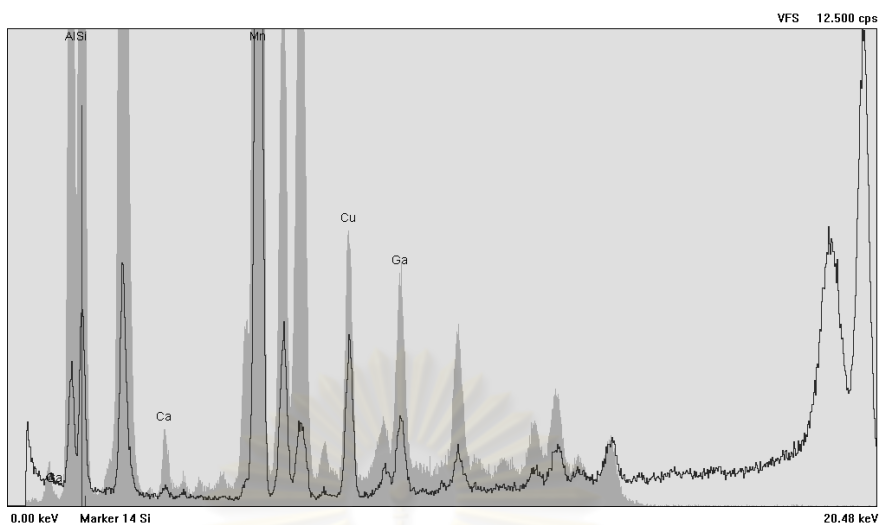
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T10



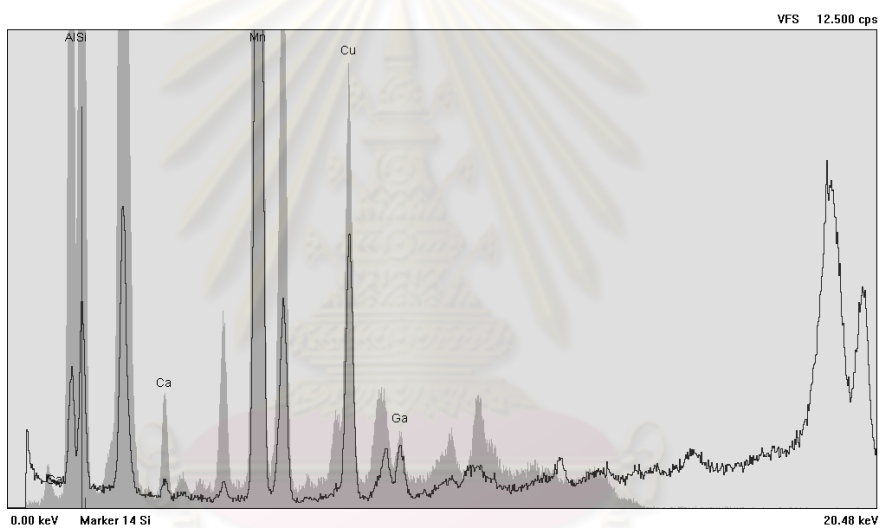
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T11



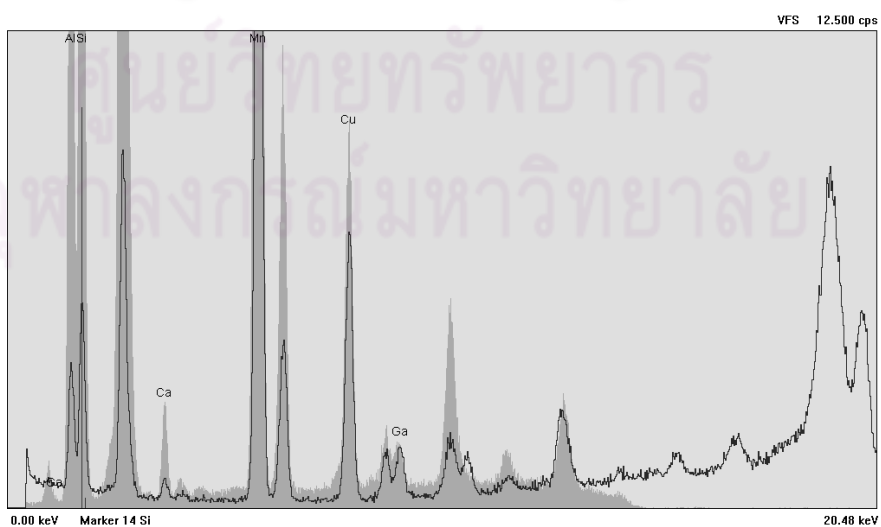
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T12



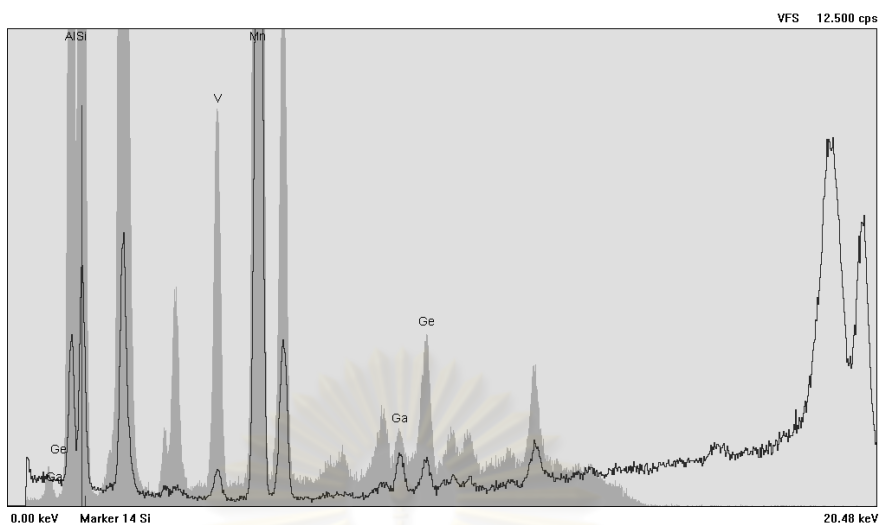
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T13



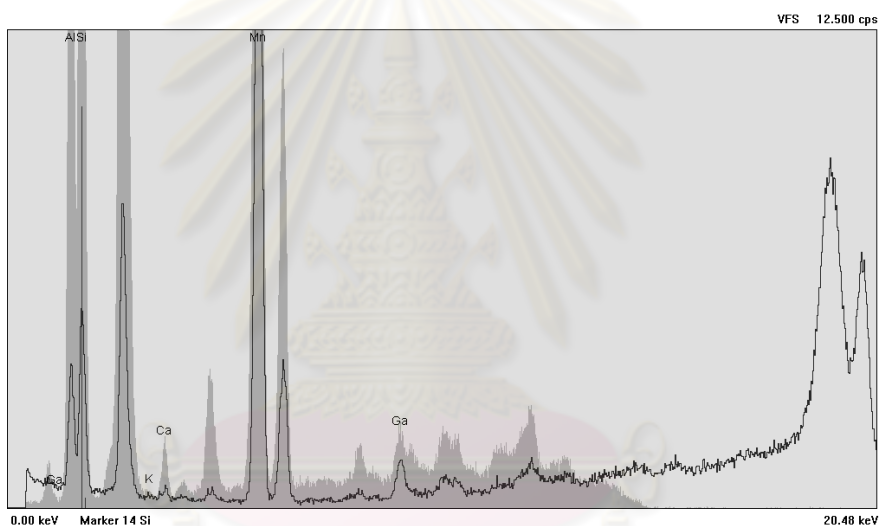
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T14



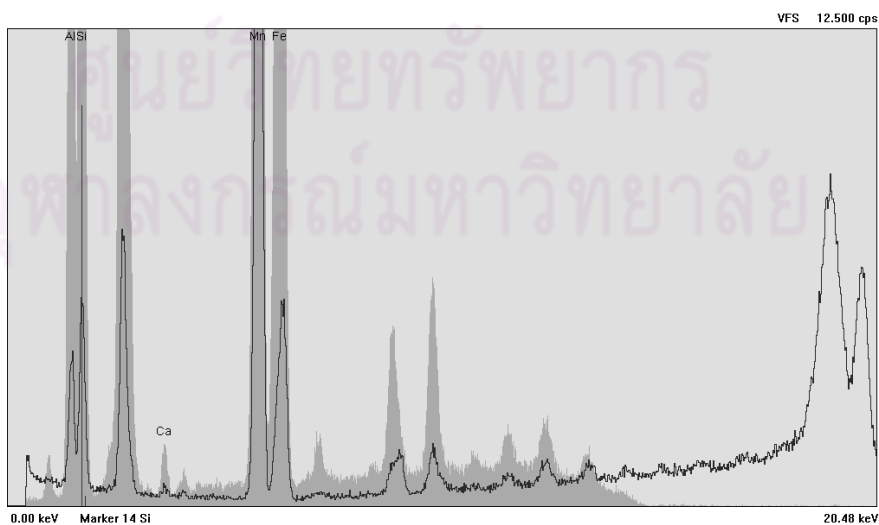
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T15



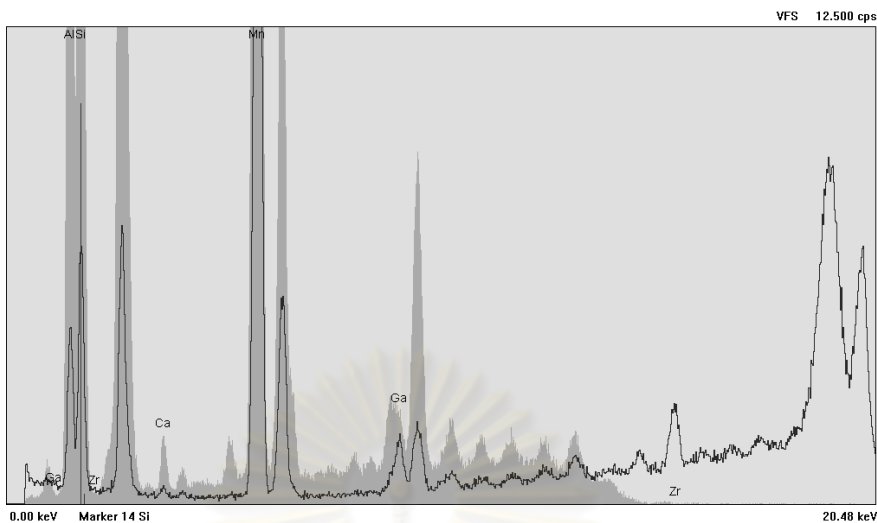
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T16



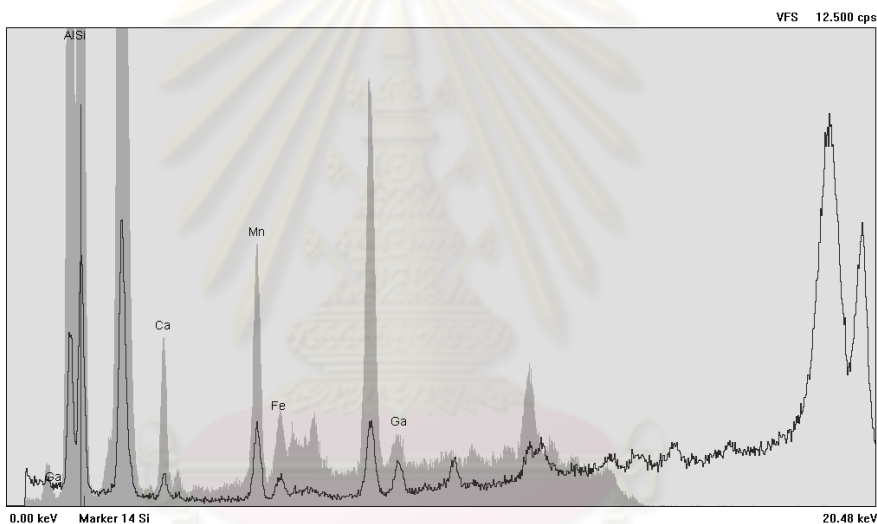
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T17



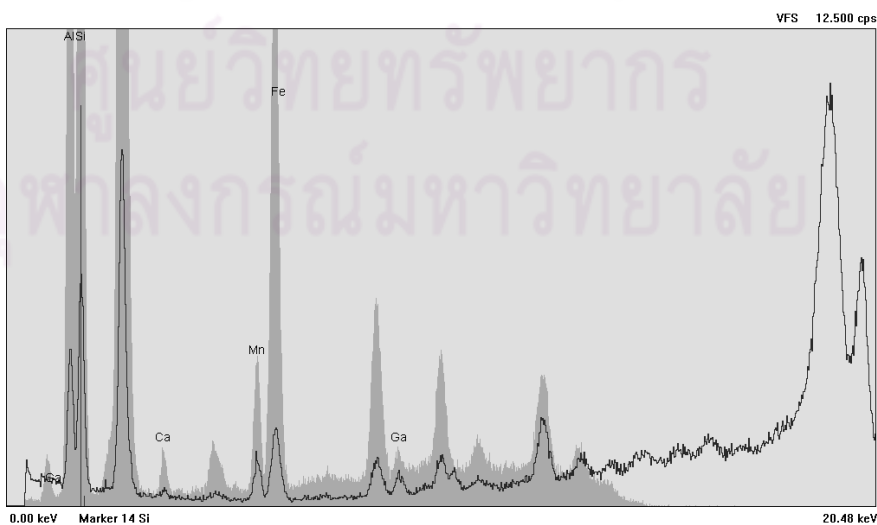
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T18



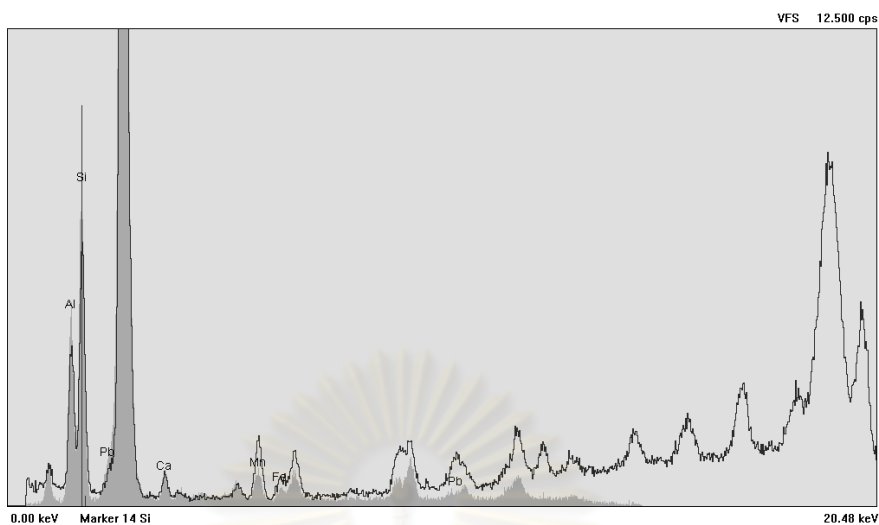
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T19



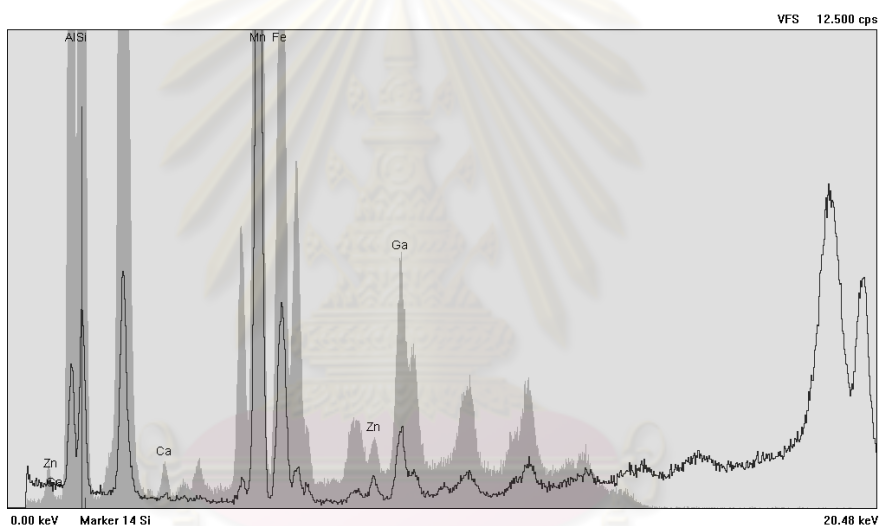
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T20



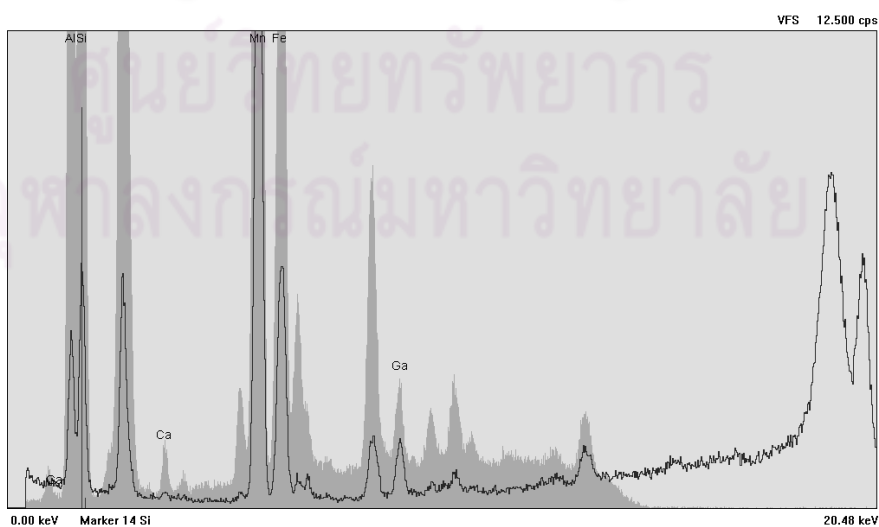
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T21



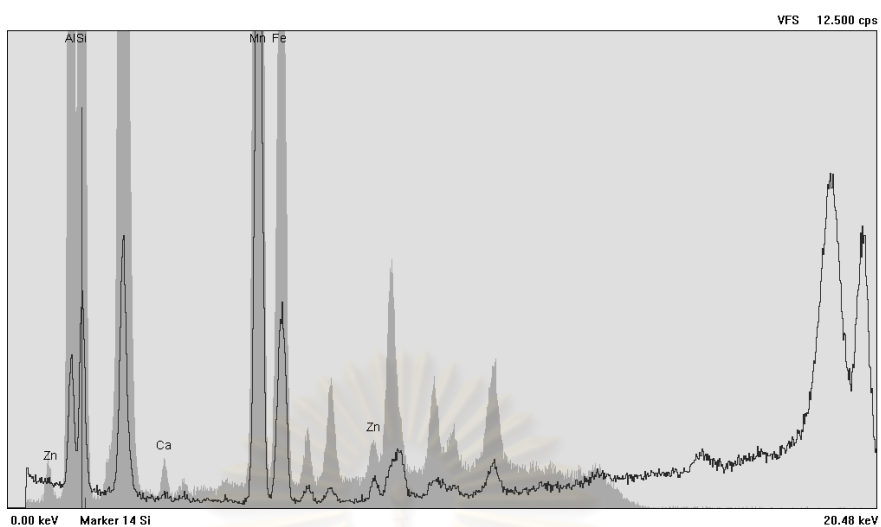
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T22



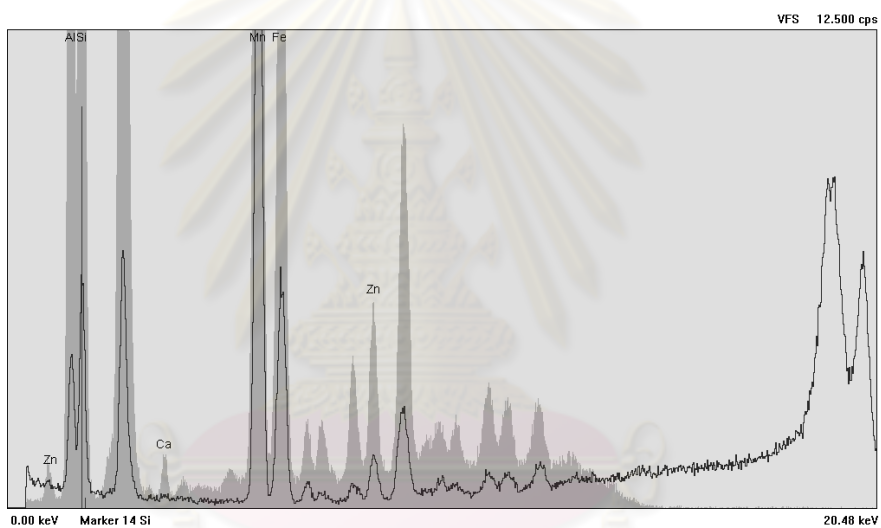
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T23



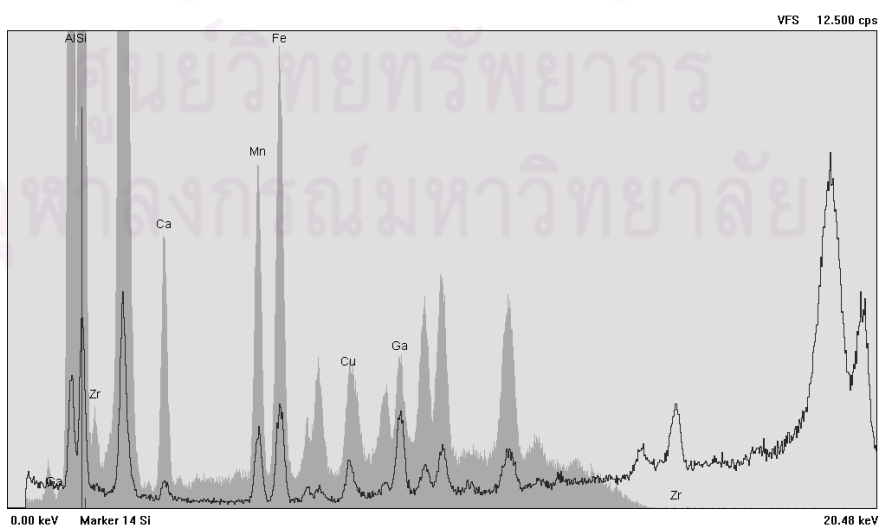
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T24



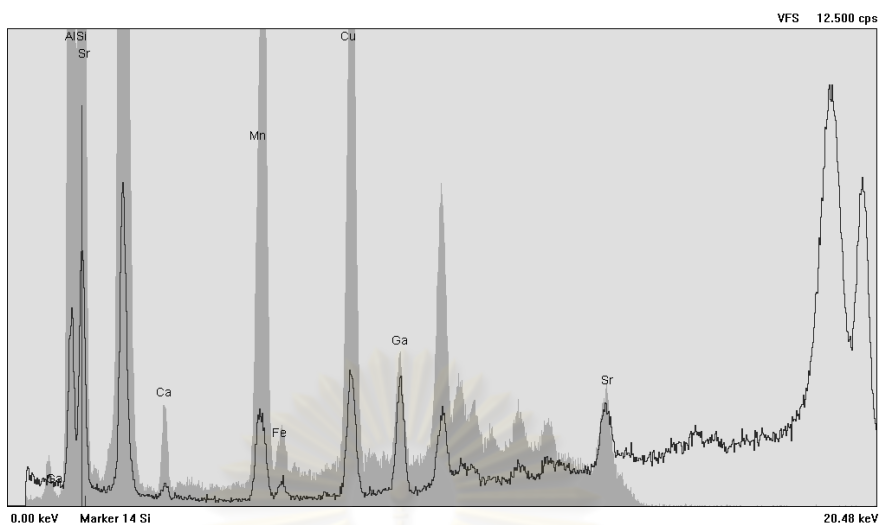
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T25



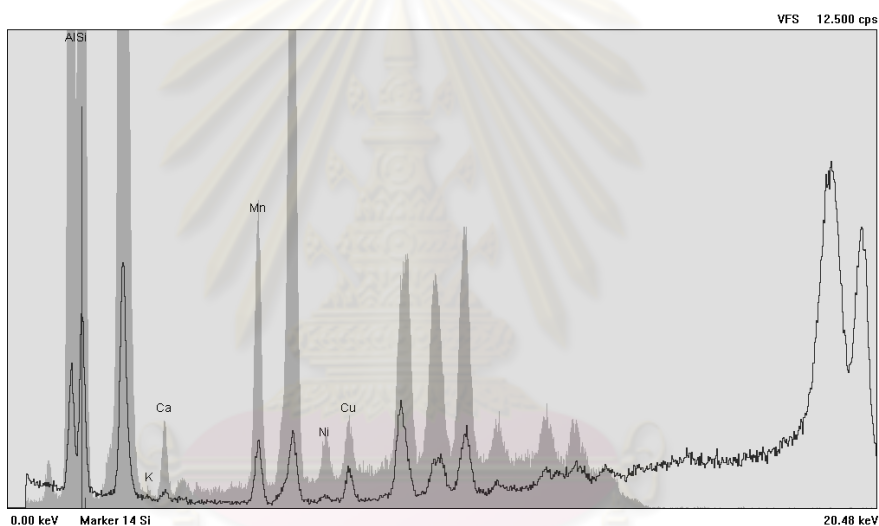
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T26



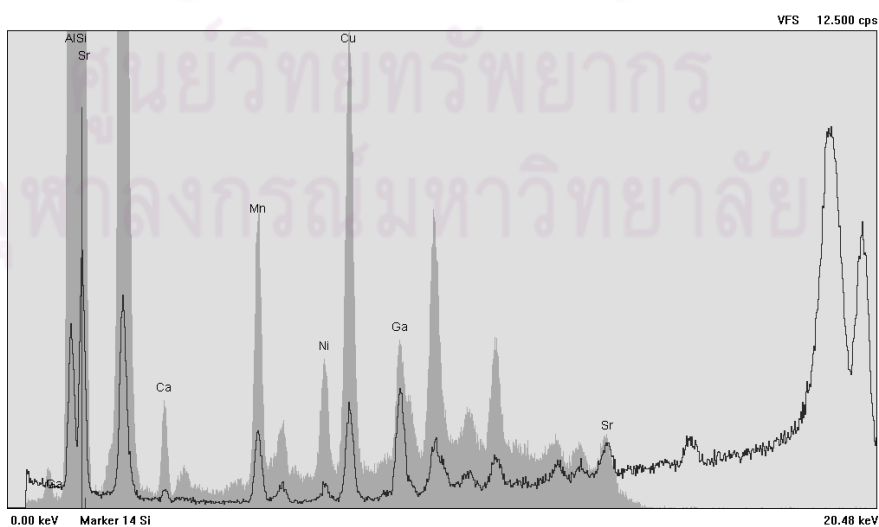
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T27



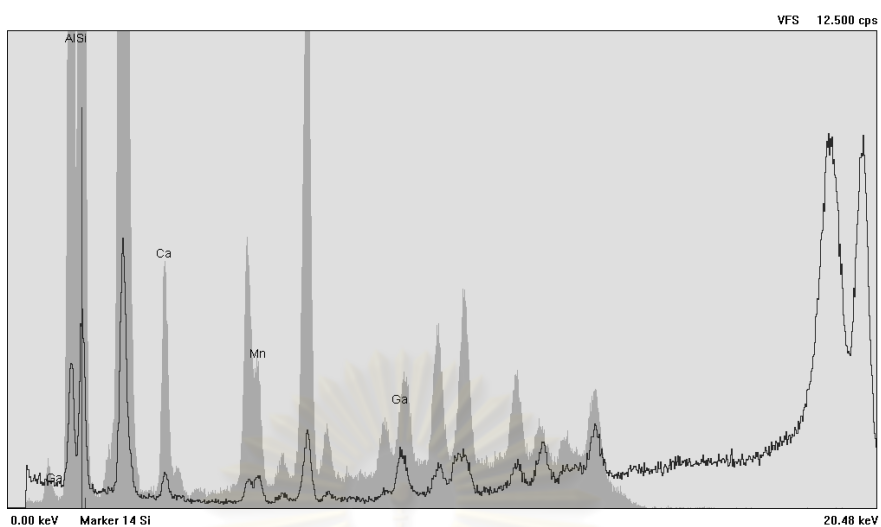
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T28



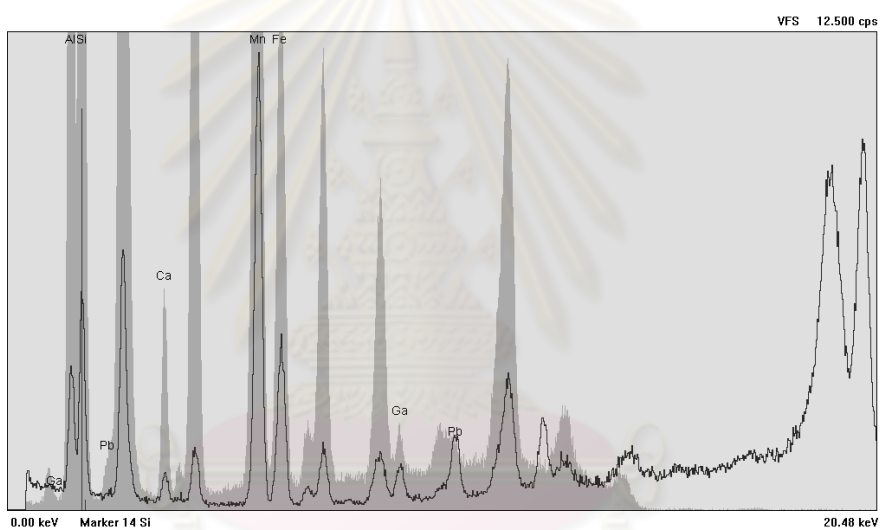
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T29



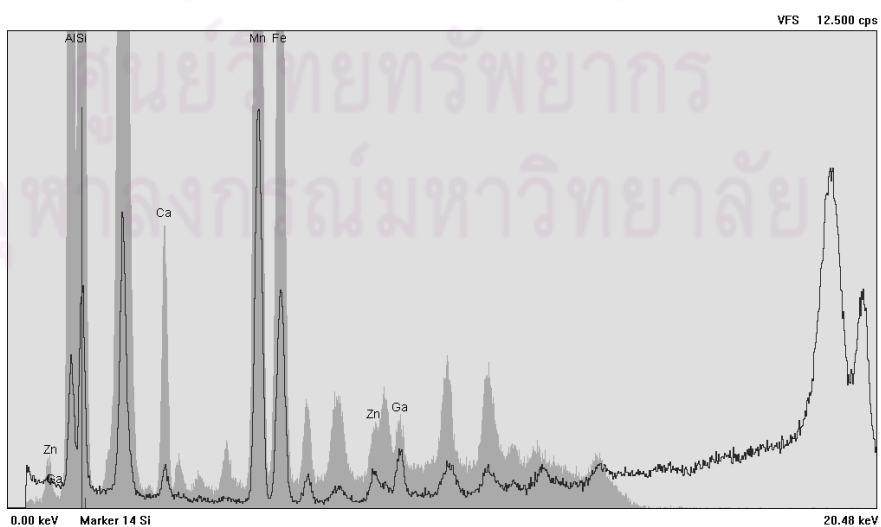
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T30



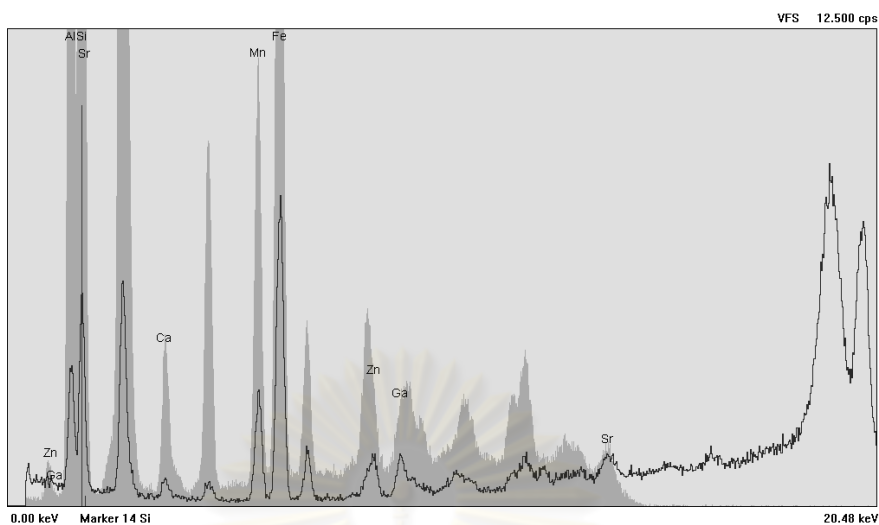
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T31



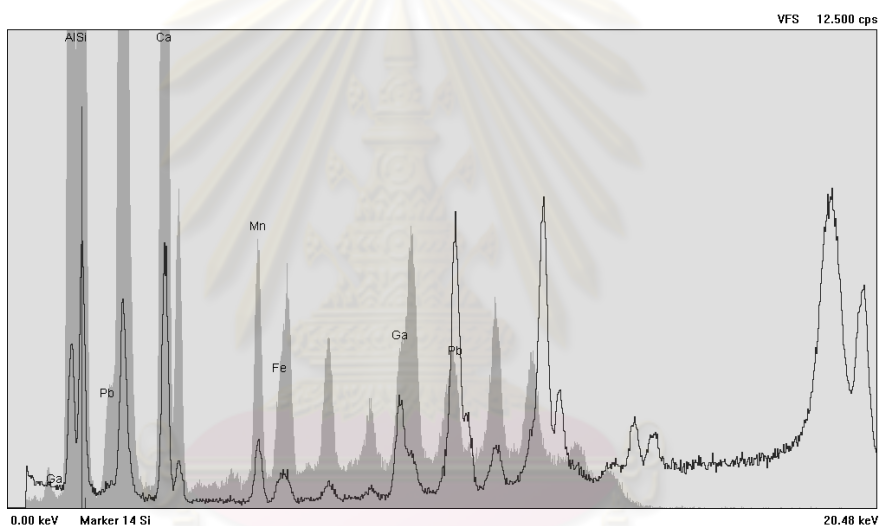
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T32



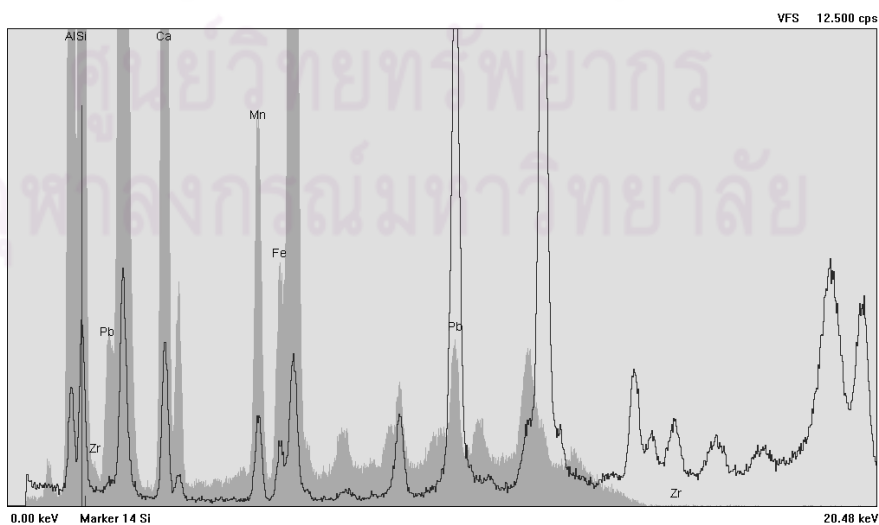
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T33



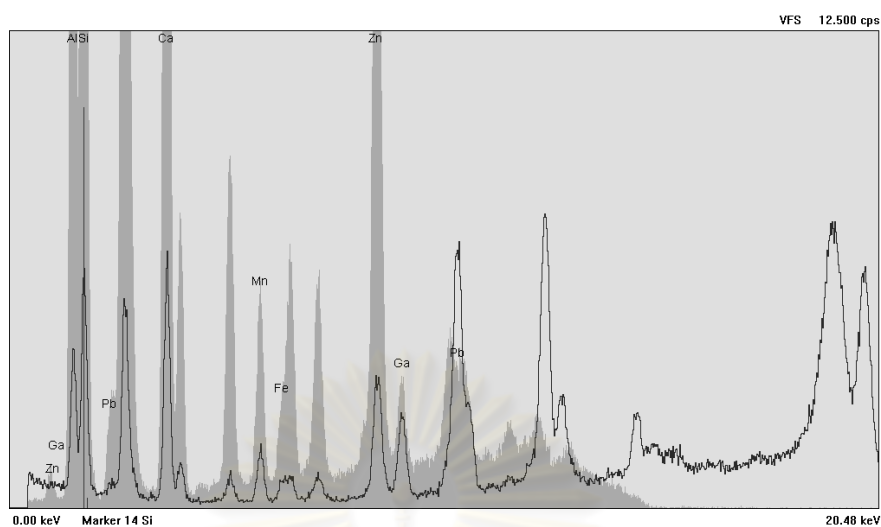
เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T34



เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T35



เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T36



เอกซเรย์สเปกตรัมของตัวอย่างที่ T37



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอภิเชษฐ์ มณีวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2523 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันราชภัฏสวนสุนันทา ในปี พ.ศ. 2546 ซึ่งได้มีผลงานวิจัยเรื่อง การศึกษาปริมาณธาตุองค์ประกอบในนมผงด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์ และในปี พ.ศ. 2549 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจุบันได้ปฏิบัติงานในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ ประจำศูนย์วิจัยรังสีอณูมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นหน่วยงานในสังกัดของกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย