



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง

ผลของการอบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปีเนล $MgAl_2O_4$

The Effects of Irradiation on Characteristics of $MgAl_2O_4$ Spinel

นามผู้วิจัย

นางสาวกัญชานา ยาวออาชัณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการอาบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปิเนล $MgAl_2O_4$

The Effects of Irradiation on Characteristics of $MgAl_2O_4$ Spinel

โดย

นางสาวกชชานา ยาวออาชน์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กุชชานา ยาวออาซัน 2555: ผลของการอาบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปีเนล $MgAl_2O_4$ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, Ph.D. 93 หน้า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการอาบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปีเนล $MgAl_2O_4$ ถูกศึกษาโดยการวัดการดูดกลืนแสงด้วยสเปกโทรมิเตอร์ UV-Vis-NIR และเทคนิค FT-IR เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy พบว่า เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสเปกตรัมการดูดกลืนตรงกับตำแหน่งของการดูดกลืนของโลหะแทรนซิชันที่เป็นความบกพร่องของผลึกสปีเนล การเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของสปีเนล

จากการวัดการดูดกลืนแสงและดัชนีชี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของสีน้ำเงินในตัวอย่างสปีเนล ในขณะที่ Cr^{3+} มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือเกือบคงที่ การศึกษาโดยเทคนิค FT-IR พบว่า ในบริเวณ $700-400\text{ cm}^{-1}$ มีช่วงการดูดกลืนปรากฏอยู่ 2 ช่วงการดูดกลืนใกล้ๆ กัน โดยช่วงการดูดกลืน ν_1 เกิดที่ตำแหน่งความถี่มากสูงกว่ามีความเข้มลดลงและไม่มีการเลื่อนตำแหน่ง เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของพันธะโมเลกุล $Fe^{2+}-O^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไซดต์คองที่ ช่วงการดูดกลืน ν_2 เกิดที่ตำแหน่งความถี่ต่ำกว่า เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของ $Fe^{3+}-O^{2-}$ และ $Cr^{3+}-O^{2-}$ ที่บริเวณออกเตฮีดรอลไซดต์ และช่วงการดูดกลืนมีการเคลื่อนที่ไปทางความถี่ต่ำกว่าหรือมากกว่า เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะของ $M_{octahedral}-O^{2-}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงของพันธะ

การศึกษาสปีเนลในครั้งนี้อย่างพบปรากฏการณ์การเรืองแสงในสปีเนล ซึ่งเกิดในช่วงการดูดกลืน 670-700 nm และพบช่วงการดูดกลืนที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของพันธะโมเลกุล O-H เกิดจากการดูดซับน้ำของตัวอย่างสปีเนลที่บริเวณผิว

Kususana Yaworasan 2012: The Effects of Irradiation on Characteristics of MgAl_2O_4 Spinel. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Mr. Wiwat Wongkokua, Ph.D. 93 pages.

In this work, the effect of irradiation on characteristics of MgAl_2O_4 spinel was studied by measuring the absorption of light using UV-Vis-NIR and FT-IR spectrometers. The irradiation doses were varied as 10 kGy, 20 kGy and 30 kGy respectively. There was some change of absorption spectra intensities which correspond to the transition metal ions which was defect of spinel crystal. The changed was resulted in the color change of spinel.

By measuring optical absorption and color indices showed some changed in the Fe^{2+} to Fe^{3+} , which caused a decrease in the blue color of the spinel while the Cr^{3+} reduced or almost remain constant. For FT-IR technique, there were two close absorption region found in the range $700\text{-}400\text{ cm}^{-1}$. The first region caused by stretching mode of $\text{Fe}^{2+}\text{-O}^{2-}$ at tetrahedral site found at higher frequency ν_1 The intensity reduced but stayed constant in frequency. The second region ν_2 found at lower frequency caused by $\text{Fe}^{3+}\text{-O}^{2-}$, $\text{Cr}^{3+}\text{-O}^{2-}$ at octahedral site. The absorption band moves towards lower or higher due to changes in bond lengths within the metal nuclear $\text{M}_{\text{octahedral}}\text{-O}^{2-}$ which is related to the strength of the bond.

Spinels in this study also showed luminescence which was absorbed in the range of 670-700 nm. The stretching mode of O-H bond of water molecules due to the absorption of water at the spinel surface was also found.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์
จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ นาย อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว ผู้จัดการศูนย์วิจัยรังสีอัญมณี รักษาการ
ในตำแหน่งรองผู้อำนวยการ (บริหาร) ปฏิบัติงานแทนผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์
แห่งชาติ สำหรับอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องอาบรังสีแกมมา

ขอขอบคุณโครงการสร้างขีดความสามารถด้าน การวิจัยและพัฒนาและการแข่งขันของ
ภาคอุตสาหกรรมโดยกลไกความร่วมมือระหว่าง ภาครัฐ เอกชน และมหาวิทยาลัย (University
Industry Research Collaboration Program: U-IRC) ของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำหรับการสนับสนุนทุนการศึกษาในปี พ .ศ. 2551-2552 เป็น
ระยะเวลา 2 ปี

ขอกราบขอพระคุณอาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อัน
เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำ
ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ ด้วยความดีหรือ
ประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมและให้กำลังใจ
ผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

กฤษฎานา ยาวออาซัน
มีนาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	35
ผลและวิจารณ์	37
ผล	37
วิจารณ์	58
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	79
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก NIR Spectrometer	84
ภาคผนวก ข สี (Color)	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ระดับพลังงานของการทรานซิชันของ Fe^{2+} ที่เข้าแทนที่ Mg ในตัวอย่างสปิเนล	8
2	แสดงความยาวคลื่นของแสงวิสิเบิลและสีเติมเต็ม	12
3	แสดงค่ามัลติพลีซิตีของการจัดเรียงอิเล็กตรอนใน p-ออร์บิทัล	14
4	แสดงเทอมสัญลักษณ์ของการจัดเรียงอิเล็กตรอน $d^1 - d^{10}$ ที่มีค่า n เท่ากัน	14
5	แสดงเทอมสัญลักษณ์ที่สถานะพื้นของการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $d^1 - d^{10}$	17
6	แสดงการแยกของเทอมสัญลักษณ์ในสนามผลึกของรูปทรงแปดหน้า	18
7	แสดงลักษณะของตัวอย่างสปิเนลและสี	33
8	แสดงค่าดัชนีหักเหแสงและค่าความถ่วงจำเพาะของสปิเนลธรรมชาติจากแหล่งของประเทศพม่า	37

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของสปิเนล $MgAl_2O_4$	5
2	แผนภาพทานาเบ-ซูกาโน	7
3	วงกลมแสดงสีเติมเต็ม	11
4	แผนภูมิแสดงพลังงานแต่ละเทอมสัญลักษณ์	17
5	แสดงการถ่ายโอนประจุจากลิแกนด์ไปยังโลหะ (CTTM คือ charge transfer to metal)	19
6	การถ่ายโอนประจุจากโลหะไปยังลิแกนด์ (CTTL คือ charge transfer to ligand)	20
7	สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	22
8	เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลมีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน	23
9	แสดงแผนภูมิมิระบบ The Michelson Interferometer	25
10	แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)	26
11	เครื่องฉายรังสีแกมมา Co-60	29
12	เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrometer	30
13	เครื่อง FT-IR Spectrometer	30
14	เครื่องหาความถ่วงจำเพาะ	31
15	เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง	31
16	เครื่องถ่ายภาพอัญมณี (Digital Camera)	32
17	สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp1	38
18	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสี ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	38
19	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธค่า a^* และ b^* ของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	39
20	สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp2	40
21	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสี ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
22	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	41
23	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp3	42
24	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	42
25	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	43
26	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp4	44
27	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	44
28	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	45
29	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp5	46
30	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	46
31	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	47
32	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp6	48
33	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	48
34	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	49
35	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp7	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	50
37	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	51
38	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp8	52
39	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	52
40	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	53
41	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp9	54
42	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	54
43	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	55
44	สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp10	56
45	สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสี ดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	56
46	กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ค่า a* และ b* ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	57
47	สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	63
48	สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
49 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	64
50 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	64
51 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	65
52 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	65
53 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	66
54 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	66
55 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	67
56 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	67
57 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	68
58 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	68
59 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	69
60 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	69
61 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	70
62 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
63 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	71
64 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	71
65 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	72
66 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy	72

ผลของการอาบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปิเนล $MgAl_2O_4$

The Effects of Irradiation on Characteristics of $MgAl_2O_4$ Spinel

คำนำ

จากข้อมูลของกรมการส่งออกปี 2552 ในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤษภาคม อัญมณีและเครื่องประดับเป็นสินค้าส่งออกทำรายได้เป็นอันดับสองของประเทศ คือ 165,777 ล้านบาท เป็นสินค้าส่งออกที่มีอัตราขยายตัวสูง คือ 78.17 % ในขณะที่สินค้าอื่นๆ มีการขยายตัวติดลบ (ยกเว้นเหล็กที่มีการขยายตัวเป็นบวก คือ 6.48%) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญและศักยภาพของสินค้าประเภทอัญมณีและเครื่องประดับ ในปัจจุบันประเทศไทยถือได้ว่าเป็นหนึ่งในศูนย์กลางทางอัญมณีของโลก ไม่ว่าจะเป็นทางด้าน การเจียรนัย การออกแบบ และการส่งออก จึงมีการให้การสนับสนุนทั้งจากภาครัฐและเอกชนเพื่อให้เกิดการพัฒนา ความสามารถของผู้ประกอบการในการแข่งขันกันในตลาดอัญมณี และการมีองค์ความรู้ด้านอัญมณีโดยเฉพาะในด้านของฟิสิกส์และเคมีของอัญมณีนั้นจะช่วยให้ เกิดความรู้และความเข้าใจ อันเป็นพื้นฐานของอัญมณี ซึ่งอาจนำไปสู่การพัฒนาและการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีให้มีมูลค่าสูงขึ้นได้

การวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อสร้างองค์ความรู้พื้นฐานของอัญมณี จึงได้รับความสนใจมากขึ้นจากนักวิจัย เนื่องจากการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของอัญมณีให้มีมูลค่าสูงขึ้น จำเป็นต้องใช้ความรู้เชิงวิทยาศาสตร์เพื่อความเข้าใจในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาตัวอย่างอัญมณี คือ สปิเนล ($MgAl_2O_4$) ซึ่งเป็นหนึ่งอัญมณีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เพราะนอกจากจะใช้เป็นเครื่องประดับแล้ว สปิเนลยังสามารถใช้ในงานอื่นๆ ได้อีก เช่น ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ในทางเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ในอุตสาหกรรมการกำจัดกากของเสียนิวเคลียร์ ฯลฯ จึงทำให้ มีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสปิเนลออกมามากมาย เช่น จากงานวิจัยของ Davanath (Davanath et al., 1996) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและคุณสมบัติทางกลของ $MgAl_2O_4$ ซึ่งเป็นสปิเนลที่มีโครงสร้างของโมเลกุล เป็นผลึกเดี่ยว จากการทดลอง ได้ใช้ Xe^{2+} ที่มีพลังงาน 400 keV ฉายรังสีที่อุณหภูมิ 100 K และปริมาณรังสีที่โดสมีน้อยกว่า 1×10^{20} ion/m² การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เนื่องจากการฉายรังสีบนชั้นผิวศึกษาได้จากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน จากภาพตัดขวางของตัวอย่างที่เลือกและเทคนิค นาโนอินเดนเทนเทชั่น (nano-indentation technique) เพื่อกำหนดคุณสมบัติทางกล และที่ปริมาณโดสน้อยๆ วัตถุจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก โดยมีการเปลี่ยนแปลงหรือการจัดรูปแบบใหม่ของไอออนบวก (ความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวก) จากการเปลี่ยนแปลงสภาพครั้งนี้ทำ

ให้วัตถุมียังมอดุลัสและความแข็งเพิ่มขึ้น 10% และ 15% ตามลำดับเมื่อเทียบกับสปีเนลที่ไม่มีการฉายรังสี เหตุผลที่ได้เหล่านี้นำไปเชื่อมโยงกับผลวิจัยที่ได้จากการจำลองวิธีการคำนวณเมื่อเร็วๆ นี้ ทำให้ได้องค์ความรู้ที่สำคัญ นั่นก็คือ ความสามารถในการทนทานของ $MgAl_2O_4$ ต่อรังสี

และจากความต้องการอัญมณีที่เพิ่มขึ้น ขณะที่แหล่งวัตถุดิบและการผลิตกลับลดลง จึงมีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในกระบวนการ ทางธรรมชาติให้มีความรวดเร็วมากขึ้น โดย การปรับปรุงสีของอัญมณีด้วยการอาบรังสีหรือใช้ความร้อนมากขึ้น การอาบรังสีจะเกิดรังสีไอออไนซ์ (ionizing radiation) คือรังสีที่มีพลังงานสูงพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุล (กลุ่มอะตอม) เมื่อรังสีนั้นชนกับอะตอมหรือเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุอะตอมหรือโมเลกุลจะมีประจุบวก เมื่อสูญเสียอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ การสูญเสียอิเล็กตรอนหรือได้รับเพิ่มขึ้น เรียกว่า การไอออไนซ์ (ionization) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้เราจะใช้รังสีแกมมาในการ อาบรังสีต่อสปีเนล เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของสปีเนลก่อน อาบรังสีและหลัง อาบรังสีแกมมา โดยทั่วไปจะใช้ รังสีแกมมา จากโคบอลต์ -60 (cobalt-60) รังสีแกมมาไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึกของพลอย การเปลี่ยนสีขึ้นกับตำแหน่งที่อิเล็กตรอนกลับคืนลงในโครงสร้างของผลึก และประจุของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียง เป็นตัวกำหนดลักษณะการดูดกลืนแสงหรือการให้สีของผลึก

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาธาตุมลทิน (impurities) ในสปีเนลจากการดูดกลืนแสงของเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ UV-Vis-NIR
2. ศึกษาเบื้องต้นถึงผลของการฉายรังสีต่อสปีเนลโดยใช้เครื่องสเปกโทรมิเตอร์ FT-IR และเครื่องสเปกโทรมิเตอร์ UV-Vis-NIR ซึ่งเป็นการประยุกต์ความรู้ทางฟิสิกส์เพื่อใช้ศึกษาอัญมณี
3. สร้างองค์ความรู้พื้นฐานเพื่อใช้ในการศึกษาตัวอย่างอัญมณีอื่นๆ

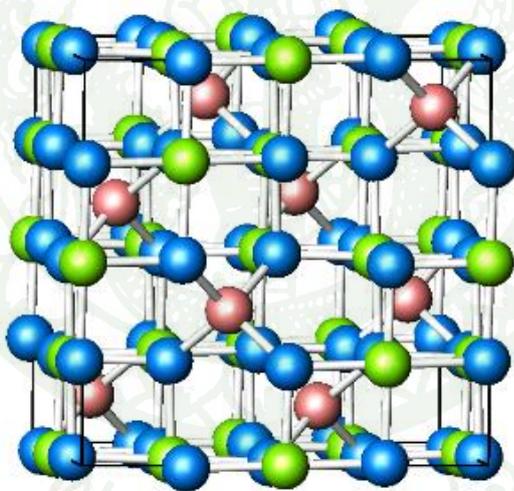
การตรวจเอกสาร

สปิเนล มาจากภาษาลาตินว่า Spina หมายถึง หนาม เป็นอัญมณีที่บุคคลทั่วไปอาจจะไม่คุ้นเคยกับชื่อมากนัก เพราะไม่มีชื่อไทยให้เรียกเป็นการเฉพาะ แต่ในกลุ่มของสปิเนลที่คุ้นเคยเป็นอย่างดีได้แก่ นิล และทับทิมบ่อใหม่ ซึ่งมีสีแดงคล้ายทับทิมแต่ไม่ใช่ทับทิม และนอกจากนี้จะเรียกชื่อเป็นสปิเนลตามด้วยสีต่าง ๆ เช่น สปิเนลสีชมพู สปิเนลสีม่วง เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้วสปิเนลจะหมายถึงแร่ที่มีสูตรโครงสร้างคือ $A^{2+}B_2^{3+}O_4^{2-}$ และมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก เช่น $MgAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$, $(Fe, Mn, Zn)(Fe, Mn)_2O_4$, $(Fe, Mg)Cr_2O_4$, Fe_3O_4 (Deer *et al.*, 1992) ในงานวิจัยนี้สปิเนลจะหมายถึง แมกนีเซียมสปิเนล ($MgAl_2O_4$) ซึ่งจัดเป็นอัญมณีชนิดหนึ่ง สำหรับสปิเนลปกติ (Normal Spinel) Mg จะอยู่ในตำแหน่งที่มีสมมาตรแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral) และ Al อยู่ในตำแหน่งที่มีสมมาตรแบบออกตะฮีดรอล (octahedral) โดยมักเขียนสูตรของสปิเนลเป็น $[Mg] (Al_2) O_4$ เมื่อ [] แทนตำแหน่งที่มีสมมาตรแบบเตตระฮีดรอล และ () แทนตำแหน่งที่มีสมมาตรแบบออกตะฮีดรอล สำหรับสปิเนลที่มีการสลับตำแหน่งระหว่าง Mg และ Al จะถูกเรียกว่า อินเวอร์สสปิเนล โดยจะมีสูตรเป็น $(Al_2) [Mg Al] O_4$ การแผ่หรือการอาบรังสีบางชนิด เช่น รังสีนิวตรอน (High dose neutron-irradiation) สามารถทำให้สปิเนลปกติเปลี่ยนเป็นอินเวอร์สสปิเนลได้ ซึ่งเกิดจากการสลับตำแหน่งระหว่างไอออนบวก คือ Mg^{2+} และ Al^{3+} กระบวนการเปลี่ยนตำแหน่งแบบนี้ทำให้เกิดการกระจายตัวของไอออนบวก (Cation distribution) หรือความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวก (Cation disorder) ซึ่งความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวกนี้มีผลต่อคุณสมบัติทางแสง (Optical property) ของสปิเนลเป็นอย่างมาก ซึ่งเห็นได้จากความต่างระหว่างแถบช่องว่างพลังงานของสปิเนลปกติและอินเวอร์สสปิเนล (Gupta, 2006)

โดยความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวกนั้นจะเกิดขึ้น ที่อุณหภูมิที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุในตัวอย่างสปิเนล โดยพบว่าในตัวอย่างที่มี Cr^{3+} นั้นอุณหภูมิที่จะเกิดความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวกนั้นจะเริ่มที่ $700\text{ }^{\circ}C$ ในขณะที่ในตัวอย่างที่มี Fe^{3+} นั้นความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวกนั้นจะเริ่มที่ $550\text{ }^{\circ}C$ โดยเริ่มจากการสลับตำแหน่งของ Fe^{3+} และ Mg ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจึงเป็นการย้ายตำแหน่งของ Al และ Mg (Matigano *et al.*, 2003) และจากการศึกษาความไม่เป็นระเบียบของไอออนบวกโดยการฉายรังสีแกมมา พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนจนถึง 10 kGy แถบของการดูดกลืนรังสีจะเพิ่มขึ้น (Roberto *et al.*, 2006)

สปิเนลมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก โดยมีสเปซกรุป (space groupe) คือ $Fd3m (O_h^7)$ ขนาดของยูนิตเซลล์ของสปิเนลบริสุทธิ์จากการทดลองมีค่า 8.08 \AA^0 (Hill *et al.*, 1979) จากการคำนวณมีค่าที่ได้ต่างกัน เช่น 8.078 \AA^0 (Lodziana and Piechota, 2006) 8.12 \AA^0 (Bacorisen *et al.* 2006) คุณสมบัติพื้นฐานของสปิเนลมีดังนี้ ลักษณะของผลึกเป็นแบบคิวบิกหรือออกตะฮีดรอลมีความแข็ง 8 ตามโมห์สเกล มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.58-3.98 และมีดัชนีหักเหเดี่ยว 1.712-1.800 มักพบบ่อยู่ในลักษณะเป็นก้อนกรวดทรายตามลำน้ำต่างๆ เพราะสปิเนลเป็นอัญมณีแข็งและทนทานต่อการสึกกร่อน อาจพบร่วมกับพลอยคอร์รัมด์ัม โดยสปิเนลจะมีลักษณะสีเหมือนแก้วและมีประกายเหมือนเพชร องค์ประกอบเคมีของ $MgAl_2O_4$ มี MgO 28.2% , Al_2O_3 71.8% และมีธาตุส่วนน้อย เช่น เหล็กฟอสฟอรัส สังกะสี และแมงกานีส อาจแทนที่แมกนีเซียมได้ในอัตราส่วนต่างๆกัน เหล็กเฟอริกและโครเมียม อาจจะแทนที่ส่วนของอะลูมิเนียมได้ (Webster, 1977)

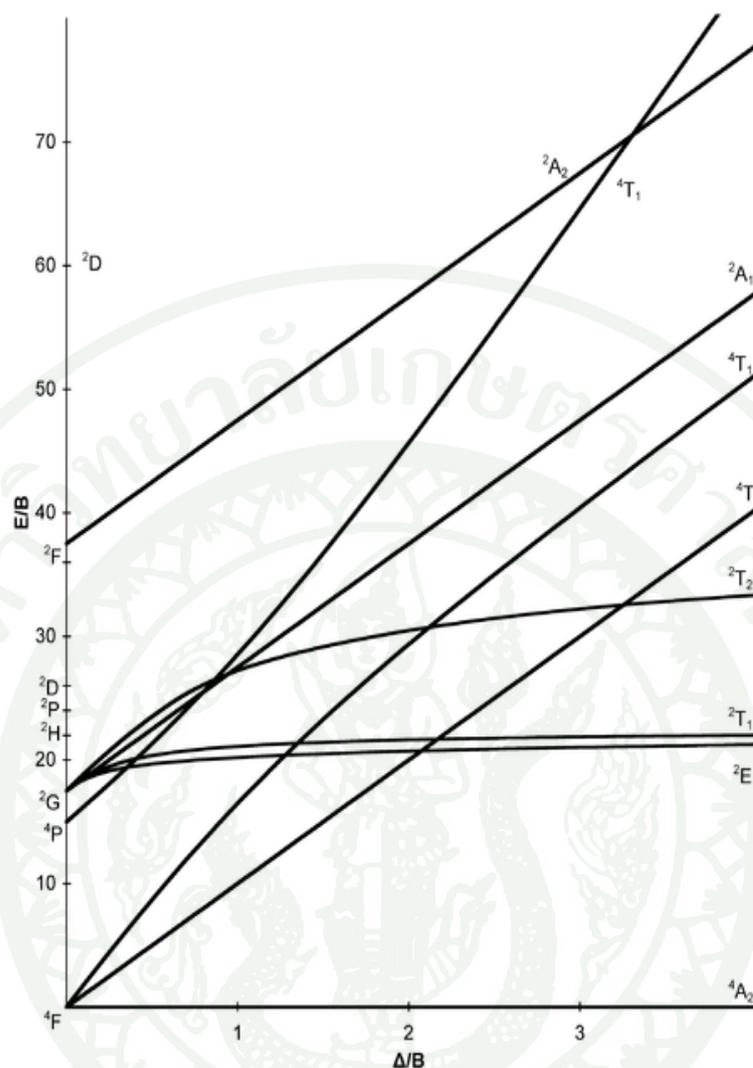


ภาพที่ 1 โครงสร้างผลึกของ $MgAl_2O_4$

สีของสปีเนล

สีของสปีเนลนั้นมีได้หลากหลายสี เช่น ชมพู แดง เขียว น้ำเงิน น้ำตาล ไปจนถึงดำ เนื่องจากสปีเนลและอินเวอร์สสปีเนลบริสุทธิ์จะใสไม่มีสีเนื่องจากช่องว่างระดับพลังงาน (energy gap) ที่มีขนาดใหญ่ คือ 7.8 และ 5.51 eV ตามลำดับ (Mo and Ching, 1996) สีของสปีเนลนั้นจึงเกิดจากธาตุมลทิน (impurities) ที่เข้าไปแทนที่ไอออนบวก (Mg^{2+} , Al^{3+}) ธาตุมลทินเหล่านี้ส่วนมากเป็นธาตุโลหะ เช่น Ti, Mn, V, Co, Cr, Ni เมื่ออยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามผลึก (Crystal field) จาก O^{2-} ระดับพลังงานของธาตุเหล่านี้ในแถบช่องว่างระดับพลังงานจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงบางช่วงได้ จึงทำให้สปีเนลเกิดสีได้

จากการศึกษาเชิงทฤษฎี (Macfarlane, 1963) และการทดลอง (Wood *et al.*, 1968) เป็นที่ยอมรับกันว่าสีชมพูหรือแดงในสปีเนลนั้นเกิดจาก Cr^{3+} แทนที่ Al^{3+} เมื่อ Cr^{3+} เข้ามาแทนที่ในตำแหน่งของ Al^{3+} ซึ่งมีสมมาตรแบบออกตะฮีดรอนั้น จะมีระดับพลังงานเป็น ${}^4A_{2g}$, 2E_g , ${}^2T_{1g}$, ${}^2T_{2g}$, ${}^4T_{2g}$, ${}^4T_{1g}$, ${}^4T_{1g}...$ สามารถพิจารณาได้จากแผนภาพทานาเบ-กาโน (Tanabe-Sugano diagram) สำหรับ d^3 ดังที่แสดงในภาพที่ 3 การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นได้โดยการทรานซิชันแบบอนุญาติ คือ จากสถานะพื้น ${}^4A_{2g}$ ไปยังสถานะกระตุ้น ${}^4T_{2g}$, ${}^4T_{1g}$, ${}^4T_{1g}$ แต่เนื่องจากขนาดของไอออนที่ต่างกันของ Al^{3+} และ Cr^{3+} เมื่อ Cr^{3+} แทนที่ตำแหน่งของ Al^{3+} จะทำให้โครงสร้างโดยรวมบิดไปจากการทดลอง เช่น โดยเทคนิคแมกเนติกเรโซแนนซ์ (Stahl-Brada and Low, 1959) แสดงว่าโครงสร้างที่บิดไปนี้เปลี่ยนจากออกตะฮีดรอลไปเป็นแบบไตรโกนัล ทำให้สถานะกระตุ้น เช่น ${}^4T_{2g}$, ${}^4T_{1g}$ เกิดการแยกออก เนื่องจากสมมาตรที่ลดลงเป็น ${}^4T_2 \rightarrow ({}^4E_g, {}^4A_{1g})$ และ ${}^4T_{1g} \rightarrow ({}^4E_g, {}^4A_{2g})$



ภาพที่ 2 แผนภาพทานาเบ-ซูกาโน

จากการทดลองโดย Wood และคณะ (Wood *et al.*, 1968) พบว่าการทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยัง ${}^4T_{2g}$ (4E_g , ${}^4A_{1g}$) ทำให้เกิดฟิสิกการดูดกลืนที่ 18520 cm^{-1} (540 nm) โดยที่ไม่สามารถสังเกตการแยก 4E_g และ ${}^4A_{1g}$ ได้ การทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยัง ${}^4A_{1g}$ (${}^4T_{1g}$) ทำให้เกิดฟิสิกการดูดกลืนที่ 24100 cm^{-1} (415 nm) และการทรานซิชันจากสถานะพื้นไปยัง ${}^4A_{1g}$ (${}^4T_{1g}$) ทำให้เกิดฟิสิกการดูดกลืนที่ 25800 cm^{-1} (387.6 nm) นอกจากนี้ไอออนแล้วยังสามารถสังเกตเห็นฟิสิกของการเปล่งแสง (emission) ที่เกิดการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้น 2E_g ไปยัง ${}^4A_{2g}$ ที่ประมาณ 690 nm (Izumi *et al.*, 2007)

และสีแดงที่เกิดจากโครเมียมในสปีเนล เกิดจากการทรานซิชันจากสถานะพื้น ${}^4A_{2g}$ ไปยัง ${}^4T_{1g}$ ทำให้เกิดฟิสิกการดูดกลืนที่ 400 nm และการทรานซิชันจากสถานะพื้น ${}^4A_{2g}$

ไปยัง ${}^4T_{2g}$ ทำให้เกิดพีคการดูดกลืนที่ 550 nm ที่ตำแหน่ง B-site (Lou and Ballentyne, 1968) และการเกิดทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากสถานะการกระตุ้นที่ต่ำสุด 2E_g ไปยัง ${}^4A_{2g}$ (สถานะพื้น) ทำให้เกิดพีคการดูดกลืนที่ 687 nm หรือเป็นพีคของการเปล่งแสงสีแดง (Red emission) นอกจากนี้สัขมพูหรือแดงแล้ว Cr^{3+} ยังสามารถให้สีเขียวสำหรับสปีเนลสังเคราะห์ได้ โดยสปีเนลที่สังเคราะห์จะมีสีได้นั้นขึ้นอยู่กับวิธีการในการสังเคราะห์ โดยตำแหน่งพีคของการดูดกลืนจะเลื่อนไปทางสีแดง (Garapon *et al.*, 1991; deren *et al.*, 1996)

สปีเนลสีน้ำเงินจะมีธาตุ Fe คือ Ferrous ion (Fe^{2+}) มีสเปกตรัมการดูดกลืนที่ 458 Å (Webster, 1977) โดยที่ Fe^{2+} อยู่ที่ตำแหน่งเตตระฮีดรอล (tetrahedral site) และ Fe^{3+} อยู่ที่ตำแหน่งออกตะฮีดรอล (octahedral site) (Giusta *et al.*, 1996; Michail and Koch-Müller, 2005) ซึ่งธาตุโลหะของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} รายละเอียดยังไม่สมบูรณ์ (Fritch and Rossman, 1988) สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีฟ้ามากที่สุดน่าจะเป็นการแลกเปลี่ยนประจุ (Charge transfer) ของ Fe^{3+} และ Fe^{2+}

Gaffney (Gaffney 1973) ได้ทำการศึกษาโดยการคำนวณและระบุ ช่วงการดูดกลืนเนื่องจาก Fe^{2+} ดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับพลังงานของการทรานซิชันของ Fe^{2+} ที่เข้าแทนที่ Mg ในตัวอย่างสปีเนล

การทรานซิชัน	พลังงาน	
	cm^{-1}	nm
$[Fe^{2+}] \quad {}^5E \longrightarrow {}^5T_2$	4390	2277.904
${}^5E \longrightarrow {}^3T_1$	14290	699.7901

ตารางที่ 1 (ต่อ)

การทรานซิชัน	พลังงาน		
	cm ⁻¹	nm	
[Fe ²⁺] ⁵ E → ³ T ₁	18130	551.572	
	21410	467.0715	
	26000	384.61554	
	⁵ E → ³ A ₂	19600	510.2041
	⁵ E → ³ E	21830	458.0852
	27040	369.8225	
⁵ E → ³ T ₂	28250	353.9823	

ที่มา: Gaffney (1973)

ช่วงการดูดกลืนที่ 649 nm Taran (Taran *et al.*, 2005) เสนอว่า มาจากการทรานซิชันระหว่าง ⁶A_{1g} และ ⁴T_{1g} ของ Fe³⁺ ในตำแหน่งออกต ะฮีตรอลโดยต้องมี Fe²⁺ ในตำแหน่งเตตระฮีตรอลอยู่ใกล้เคียง คือมองว่าเกิดการอันตรกิริยาของคู่ (Fe³⁺) – [Fe²⁺] โดยการทดลองเผาตัวอย่างในบรรยากาศแบบไม่มีออกซิเจนพบว่าช่วงการดูดกลืนนี้ลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า มาจากการเปลี่ยนประจุของ Fe³⁺ เป็น Fe²⁺ และช่วงการดูดกลืนแสงของ Fe²⁺ /Ti⁴⁺ Furguson and Fielding (Furguson and Fielding, 1971) พบว่า เกิด intervalence charge transfer (IVCT) แสดงถึงการเกิดสีน้ำเงิน และการเปลี่ยนแปลงของ Fe²⁺ ไปเป็น Fe³⁺ ทำให้สีน้ำเงินลดลง และสีเหลืองเข้มชัดเจนมากขึ้น

ธาตุโลหะ Co^{2+} ที่อยู่ในสปีเนลจะให้สีน้ำเงิน ซึ่งสปีเนลจะมีลักษณะคล้ายกับ เพชรสีน้ำเงิน มีช่วงการดูดกลืนที่ 450 nm และสีเหลือง มีช่วงการดูดกลืนที่ 600 nm เกิดจากการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้น ${}^4T_1 ({}^4P)$ ไปยังสถานะพื้น ${}^4A_2 ({}^4F)$ นอกจากนี้ Co^{2+} เป็นธาตุโลหะที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนลสังเคราะห์ โดย Co^{2+} เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Mg^{2+} ระดับพลังงานของ Co^{2+} ทำให้ดูดกลืนแสงในช่วงสีแดง (Izumi *et al.*, 2007)

ส่วนธาตุโลหะที่ให้สีเขียวต่อสปีเนลคือ Mn^{2+} เกิดการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้นต่ำสุด 4T_1 ไปยังสถานะพื้น 6A_1 ที่ตำแหน่ง A-Site ทำให้เกิดช่วงการดูดกลืนที่ 520 nm และมีการทรานซิชันจากสถานะพื้น 6A_1 ไปยัง ${}^4T_2 ({}^4G)$ ทำให้เกิดช่วงการดูดกลืนที่ 450 nm และการทรานซิชันจากสถานะพื้น 6A_1 ไปยัง ${}^4A_1/{}^4E ({}^4G)$ ทำให้เกิดช่วงการดูดกลืนที่ 425 nm และการทรานซิชันจากสถานะพื้น 6A_1 ไปยัง ${}^4T_2 ({}^4D)$ ทำให้เกิดช่วงการดูดกลืนที่ 385 nm และการทรานซิชันจากสถานะพื้น 6A_1 ไปยัง ${}^4T_1 ({}^4P)/{}^4E ({}^4D)$ ทำให้เกิดช่วงการดูดกลืนที่ 360 nm

จากการทดลองของ Ayana Tomita และคณะ (Ayana Tomita *et al.*, 2004) พบว่า การโดป Mn^{2+} ต่อสปีเนลทำให้เกิดลูมิเนสเซนส์แชนเนล (Luminescence channels) บริเวณ 520 nm ซึ่งเกิดการทรานซิชันจากสถานะกระตุ้นต่ำสุด 4T_1 ไปยัง 6A_1 และกราฟทรานซิมิชชันเพิ่มขึ้นตามอัตราการโดปที่เพิ่มขึ้นของสปีเนล การเกิดลูมิเนสเซนส์ในสปีเนล สามารถพิจารณาได้จากสปีเนลธรรมชาติสีแดง ซึ่งจะมีการเปล่งแสงสีแดงเข้มออกมาภายใต้แสง UV โดยจะมีการเปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นยาว (long wave) ดีกว่าช่วงความยาวคลื่นสั้น (short wave) ซึ่งกราฟที่ได้จากการเกิดลูมิเนสเซนส์จะมีลักษณะเหมือนคลื่นเสียง (organpipe wave) มีการดูดกลืนหลายพีคติดกัน ในช่วงความยาวคลื่น 686 nm, 675 nm และ 696 nm (Anderson, 1971)

สเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน

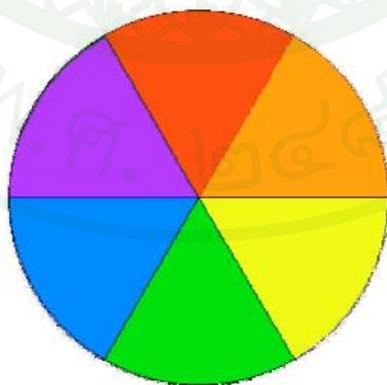
(Electronic Spectro of Coordination Compounds)

สารประกอบโคออร์ดิเนชันหรือสารประกอบเชิงซ้อน โดยทั่วไปประกอบด้วยไอออนเชิงซ้อน (complex ion) และไอออนที่มีประจุตรงข้าม (counter ion) ไอออนเชิงซ้อนประกอบด้วย โลหะที่มีประจุบวกตรงกลาง (central metal cation) เกิดพันธะกับโมเลกุลหรือไอออนตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไป โดยโมเลกุลหรือไอออนที่ล้อมรอบโลหะที่อยู่ตรงกลาง เรียกว่า ลิแกนด์ (ligand) ลิแกนด์จะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่ไม่ได้ใช้ ในการเกิดพันธะโคเวเลนต์ (unshared pair of valence electrons) อยู่อย่างน้อย 1 คู่

ความประทับใจของสารประกอบโคออร์ดิเนชันของโลหะทรานซิชัน คือ เป็น สารประกอบที่มีสีสดใส ตัวอย่างเช่น สีพรัสเซียนบลู (prussian blue) ใช้เป็นสีย้อมมาแล้วกว่า สองศตวรรษ และยังคงใช้ในการทำพิมพ์เขียว (blue prints) สารประกอบโคออร์ดิเนชันนี้มี Fe^{2+} และ Fe^{3+} เกิดสารประกอบทรงแปดหน้าโดยมี CN^- เป็นลิแกนด์ เพชรพลอยที่มีสีสวยงาม เป็นผลมาจากมีโลหะทรานซิชันรวมอยู่ในผลึกของเพชรพลอยเหล่านั้น ตัวอย่างเช่น มรกตเป็น พลอยสีเขียวเนื่องจากมี Cr^{3+} จำนวนเล็กน้อยรวมอยู่ในผลึก $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ อะเมทิส (amethysts) เป็นพลอยสีม่วงเนื่องจากมี Fe^{2+} Fe^{3+} และ Ti^{4+} อยู่ในผลึก Al_2O_3 ทับทิมเป็น พลอยสีแดง เนื่องจากมี Cr^{3+} อยู่ในผลึก Al_2O_3 สีแดงของเลือดเกิดจากเหล็กในฮีโมโกลบิน เป็นต้น เป็นที่น่ายินดีที่เราสามารถทราบได้ว่าเพราะเหตุใดสารประกอบโคออร์ดิเนชันจึงมีสี ซึ่งตรง ข้ามกับสารอินทรีย์ที่ส่วนมากจะใส ก่อนที่จะศึกษาถึงการเกิดสีของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน ควรศึกษาเรื่องการดูดกลืนแสงและการวัดขนาดของแสงที่ถูกดูดกลืน

การดูดกลืนแสง (absorption of light)

สารประกอบโคออร์ดิเนชันเป็นสารประกอบที่มีสีสดใสสามารถอธิบายได้ด้วย ความสัมพันธ์กับสีเติมเต็ม (complementary colors) ถ้าสารประกอบดูดกลืนแสงสีหนึ่ง เรา สามารถมองเห็นสารนั้นเป็นสีเติมเต็มของสีที่ถูกดูดกลืน ตัวอย่าง เช่น แสงสีขาวซึ่ง ประกอบด้วยสเปกตรัมของแสงที่มีความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ดัด คือ สีม่วง น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง ถ้าสารประกอบดูดกลืนแสงสีแดงเราจะมองเห็นว่าสารประกอบนั้นมีสีเขียว เนื่องจากสีเขียวเป็นสีเติมเต็มของสีแดง สีเติมเต็มอื่นแสดงในวงกลมข้างล่างนี้



ภาพที่ 3 วงกลมแสดงสีเติมเต็ม

การทำนายสีของสารประกอบโคออร์ดิเนชันโดยตรงเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการดูดกลืนแสงของสารประกอบนั้นสามารถดูดกลืนได้สองสีหรือมากกว่า ซึ่งสีที่ดูดกลืนนั้นมีพลังงานและความเข้มต่างกัน มีผลทำให้สีที่มองเห็นของสารนั้นเป็นไปตามสีที่มีอิทธิพลเหนือกว่า (predominate) และไม่ปฏิบัติตามสเปกตรัมของแสงวิสิเบิล ในตารางที่ 2 แสดงความยาวคลื่น เลขคลื่น และเติมเต็มของแสงวิสิเบิล

ตารางที่ 2 แสดงความยาวคลื่นของแสงวิสิเบิลและสีเติมเต็ม

ความยาวคลื่น (nm)	เลขคลื่น (cm^{-1})	สี	สีเติมเต็ม
< 400	> 25,000	อัลตราไวโอเล็ต	-
400 - 450	22,000 – 25,000	ม่วง	เหลือง
450 - 490	20,000 – 22,000	น้ำเงิน	ส้ม
490 - 550	18,000 – 20,000	เขียว	แดง
550 - 580	17,000 -18,000	เหลือง	ม่วง
580 - 650	15,000 – 17,000	ส้ม	น้ำเงิน
650 – 700	14,000 – 15,000	แดง	เขียว
> 700	< 14,000	อินฟราเรด	-

กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer – Lambert absorption law)

กฎของเบียร์และแลมเบิร์ตสามารถนำมาใช้อธิบายการดูดกลืนแสงของสารประกอบได้ โดยไม่คิดถึงการกระเจิงแสง (Scattering of light) และการสะท้อนกลับ (reflection) ของแสงบนผิวของภาชนะใส่สารตัวอย่าง เมื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นของแสง และชนิดของสารตัวอย่าง สามารถคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบได้

จากกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืนกับความเข้มข้นของสารตัวอย่างดังนี้

$$\log I_0/I = A = \epsilon lc \quad (1)$$

กำหนดให้ I_0 คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ (intensity of incident light)

I คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านออกมา (intensity of transmitted light)

A คือ แอ็บซอร์เบอานซ์ (absorbance)

ϵ คือ ค่าสภาพดูดกลืนโมลาร์ (molar absorptivity) มีหน่วยเป็น $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$

l คือ ความยาวของสารละลายที่แสงผ่าน มีหน่วยเป็น cm

c คือ ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น $mol \cdot L^{-1}$

เลขควอนตัมของอะตอมหลายอิเล็กตรอน (quantum numbers of multielectron atoms)

ในอะตอมที่มีอิเล็กตรอนหลายตัวการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมเหล่านั้นต้องคำนึงถึงกฎเหล่านี้คือ

1. เมื่อจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบใดแล้วอะตอมนั้นต้องมีพลังงานน้อยที่สุด
2. หลักการกีดกันของเพาลี (Pauli exclusion principle) กล่าวว่า อิเล็กตรอน สองตัวในอะตอมเดียวกัน จะมีเลขควอนตัมเหมือนกันทั้งสี่ค่าไม่ได้
3. กฎของฮุนด์ (Hund's rule) การจัดอิเล็กตรอนลงในออร์บิทัลจะต้องทำให้ สปินรวมมีค่าสูงสุด หรือกล่าวว่าจะต้องมีจำนวนสปินขนาน (parallel spin) สูงสุด อิเล็กตรอนสองตัวจัดอยู่ในออร์บิทัลเดียวกันจะมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่จัดอยู่ในออร์บิทัลละหนึ่งตัว เพราะอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเดียวกันมีแรงผลัทางไฟฟ้าสถิตซึ่งกันและกัน ค่ามัลติพลิตี (multiplicity) หมายถึง จำนวนอิเล็กตรอนเดี่ยวบวก 1 หรือ $n + 1$ ตารางที่ 3 แสดงค่ามัลติพลิตีของการจัดเรียงอิเล็กตรอน 1-6 ตัวในแบบต่างๆ ของ p-ออร์บิทัล

ตารางที่ 3 แสดงค่ามัลติพลีซิตีของการจัดเรียงอิเล็กตรอนใน p-ออร์บิทัล

จำนวนอิเล็กตรอน	การจัดเรียงอิเล็กตรอนใน p – ออร์บิทัล	จำนวนอิเล็กตรอน เดี่ยว	ค่ามัลติพลีซิตี
1	$\uparrow \quad - \quad -$	1	2
2	$\uparrow \quad \uparrow \quad -$	2	3
3	$\uparrow \quad \uparrow \quad \uparrow$	3	4
4	$\uparrow\downarrow \quad \uparrow \quad \uparrow$	2	3
5	$\uparrow\downarrow \quad \uparrow\downarrow \quad \uparrow$	1	2
6	$\uparrow\downarrow \quad \uparrow\downarrow \quad \uparrow\downarrow$	0	1

ตารางที่ 4 แสดงเทอมสัญลักษณ์ของการจัดเรียงอิเล็กตรอน $d^1 - d^{10}$ ที่มีค่า n เท่ากัน

การจัดเรียง อิเล็กตรอน	เทอมสัญลักษณ์
d^1	2D
d^2	${}^1S \quad {}^1D \quad {}^1G \quad {}^3P \quad {}^3F$
d^3	${}^2D \quad {}^4P \quad {}^4F \quad {}^2P \quad {}^2D \quad {}^2F \quad {}^2G \quad {}^2H$
d^4	${}^5D \quad {}^1S \quad {}^1D \quad {}^1G \quad {}^3P \quad {}^3F \quad {}^3P \quad {}^3D \quad {}^3F \quad {}^3G \quad {}^3H \quad {}^1S \quad {}^1D \quad {}^1F \quad {}^1G \quad {}^1I$
d^5	${}^2D \quad {}^4P \quad {}^4F \quad {}^2P \quad {}^2D \quad {}^2F \quad {}^2G \quad {}^2H \quad {}^2S \quad {}^2D \quad {}^2F \quad {}^2G \quad {}^2I \quad {}^4D \quad {}^4G \quad {}^6S$
d^6 เหมือน d^4	
d^7 เหมือน d^3	
d^8 เหมือน d^2	
d^9 เหมือน d^1	

ตารางที่ 4 (ต่อ)

การจัดเรียง	เทอมสัญลักษณ์
อิเล็กตรอน	
d^{10}	$1s$

จากตารางที่ 4 การจัดเรียงอิเล็กตรอน d^1 กับ d^9 มีเทอมสัญลักษณ์เหมือนกัน เนื่องจากมีอิเล็กตรอนเดี่ยวเท่ากันรวมทั้ง d^2 กับ d^8 d^3 กับ d^7 และ d^4 กับ d^6 ก็เช่นกัน

สถานะพลังงาน (energy states) ของเทอมสัญลักษณ์

แต่ละเทอมสัญลักษณ์ของอะตอมจะมีพลังงานแตกต่างกันในการหาสถานะพลังงานของเทอมสัญลักษณ์ใช้กฎของฮุนด์ดังนี้

1. เทอมสัญลักษณ์ที่มีพลังงานต่ำสุด (สถานะพื้น) จะต้องมีย่านสปินมัลติพลิตีตีสูงสุด เช่น อะตอมคาร์บอนมีเทอมสัญลักษณ์คือ $1D, 1S, 3P$ เทอมที่มีพลังงานต่ำสุดคือ $3P$ หรือเรียกว่า $3P$ คือ สถานะพื้น

2. เทอมสัญลักษณ์ที่มีค่าสปินมัลติพลิตีตีเท่ากัน เทอมที่มีค่า L สูงสุดจะมีพลังงานต่ำสุด เช่น $4P, 4F$ พบว่า $4F$ มีพลังงานต่ำกว่า $4P$ เนื่องจาก $4F$ มีค่า $L = 3$ แต่ $4P$ มีค่า $L = 1$ อะตอมหรือไอออนที่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ d^2 เช่น Ti^{2+} มีเทอมสัญลักษณ์ ดังนี้คือ $3F, 3P, 1S, 1D, 1G$ จากกฎทั้งสองข้อสามารถทำนายการเรียงลำดับพลังงานเทอมสัญลักษณ์เหล่านี้ได้ดังนี้

$${}^3F < {}^3P < {}^1G < {}^1D < {}^1S$$

แต่จากการศึกษาทางสเปกโทรสโกปีของ Ti^{2+} พบว่าลำดับพลังงานของเทอมสัญลักษณ์ต่างไปจากการทำนายคือ

${}^3F < {}^1D < {}^3P < {}^1G < {}^1S$ (Shriver and Atkins, 1999) แสดงว่าเราไม่สามารถใช้กฎเหล่านี้ทำนายลำดับพลังงานที่ถูกต้องของเทอมสัญลักษณ์เหล่านี้ได้

3. เทอมสัญลักษณ์มีค่า S และ L เท่ากัน ให้พิจารณาระดับพลังงานของเทอมสัญลักษณ์จากค่า J คือ J ที่มีค่าน้อยจะมีพลังงานต่ำสุดถ้าอิเล็กตรอนในชั้นย่อย (subshell) น้อยกว่า

จำนวนครึ่งหนึ่ง (half-filled) ของชั้นย่อยนั้น และ J ที่มีค่ามากจะมีพลังงานต่ำสุดถ้ามีอิเล็กตรอนในชั้นย่อยมากกว่าจำนวนครึ่งหนึ่งของชั้นย่อยนั้น ถ้ามีอิเล็กตรอนในชั้นย่อยจำนวนครึ่งหนึ่งของการบรรจุในชั้นย่อยนั้น ค่า J จะมีเพียงค่าเดียว

ตัวอย่างการหาค่า J สำหรับเทอมสัญลักษณ์ของ $2p^2$ ซึ่งมี 3 เทอม คือ 3D , 1S และ 3P

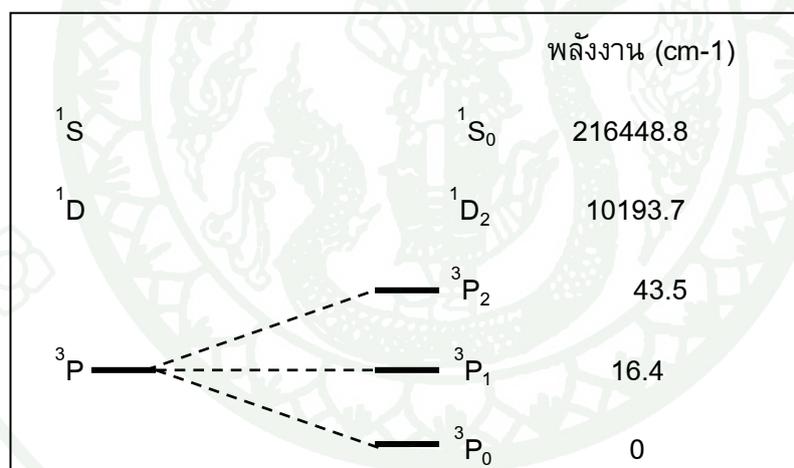
1S มีค่า $L = 0$ $S = 0$ ดังนั้น $J = 0+0 = 0$ เทอมสัญลักษณ์ของ 1S คือ 1S_0

1D มีค่า $L = 2$ $S = 0$ ดังนั้น $J = 2+0 = 2$ เทอมสัญลักษณ์ของ 1D คือ 1D_2

3P มีค่า $L = 1$ $S = 1$ ดังนั้น $J = 1+1$ $1+1-1$ $1+1-2$ J จึงมีได้ 3 ค่า คือ 2, 1 และ 0

เทอมสัญลักษณ์ของ 3P จึงมี 3 เทอมคือ 3P_2 , 3P_1 และ 3P_0

จากกฎข้อ 3 กล่าวได้ว่า 3P_0 มีพลังงานต่ำสุด แผนภูมิต่อไปนี้แสดงพลังงานของแต่ละเทอมสัญลักษณ์ ที่มีการศึกษาไว้แล้ว (Miessler and Tarr, 2004) ดังนี้



ภาพที่ 4 แผนภูมิแสดงพลังงานแต่ละเทอมสัญลักษณ์

จากกฎทั้ง 3 ข้อ สามารถหาพลังงานของเทอมสัญลักษณ์ที่สถานะพื้นของการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $d^1 - d^{10}$ ได้ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงเทอมสัญลักษณ์ที่สถานะพื้นของการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ $d^1 - d^{10}$

การจัดเรียงอิเล็กตรอน	เทอมสัญลักษณ์ที่สถานะพื้น
d^1 และ d^9	2D
d^2 และ d^8	3F
d^3 และ d^7	4F
d^4 และ d^6	5D
d^5	6S

การแยกเทอมสัญลักษณ์ของไอออนอิสระในสนามผลึก

สารประกอบโคออร์ดิเนชันรูปทรงแปดหน้า ลิแกนด์ (มอโนเดนเทต) ทั้ง 6 ตัว จะทำให้เกิดสนามผลึกมีผลทำให้พลังงานของออร์บิทัลต่างๆ แตกต่างกัน ด้วยค่า Δ_0 ดังนั้น เทอมสัญลักษณ์ต่างๆ ของไอออนอิสระหรืออะตอมอิสระเมื่ออยู่ในสนามผลึกก็จะมีพลังงานต่างกัน เทอมสัญลักษณ์เหล่านี้จะแยกออกเป็นเทอมสัญลักษณ์ย่อยหรือสถานะย่อย (substate) เหมือนออร์บิทัลต่างๆ ดังนี้

เทอมสัญลักษณ์ S แยกได้เช่นเดียวกับ s- ออร์บิทัล

เทอมสัญลักษณ์ P แยกได้เช่นเดียวกับ p- ออร์บิทัล

เทอมสัญลักษณ์ D แยกได้เช่นเดียวกับ d- ออร์บิทัล

เทอมสัญลักษณ์ F แยกได้เช่นเดียวกับ f- ออร์บิทัล

ตัวอย่างการแยกเทอมสัญลักษณ์เป็นเทอมสัญลักษณ์ย่อยหรือสถานะย่อยที่อยู่ในสนามทรงแปดหน้าแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงการแยกของเทอมสัญลักษณ์ในสนามผลึกของรูปทรงแปดหน้า

เทอมสัญลักษณ์	เทอมสัญลักษณ์ย่อยในสนามผลึก
S	A_{1g}
P	T_{1g}
D	$E_g + T_{2g}$
F	$A_{2g} + T_{1g} + T_{2g}$
G	$A_{1g} + E_g + T_{1g} + T_{2g}$
H	$E_g + 2T_{1g} + T_{2g}$
I	$A_{1g} + A_{2g} + E_g + T_{1g} + 2T_{2g}$

จากตารางที่ 6 เทอมสัญลักษณ์ย่อยต่างๆ ที่เกิดในสนามผลึกทรงแปดหน้าจะมี A, E และ T ซึ่งมีความหมายดังนี้

A หมายถึง เทอมที่มีระดับพลังงานเดี่ยวที่เท่ากัน (single degenerate)

E หมายถึง เทอมที่มีสองระดับพลังงานที่เท่ากัน (doubly degenerate)

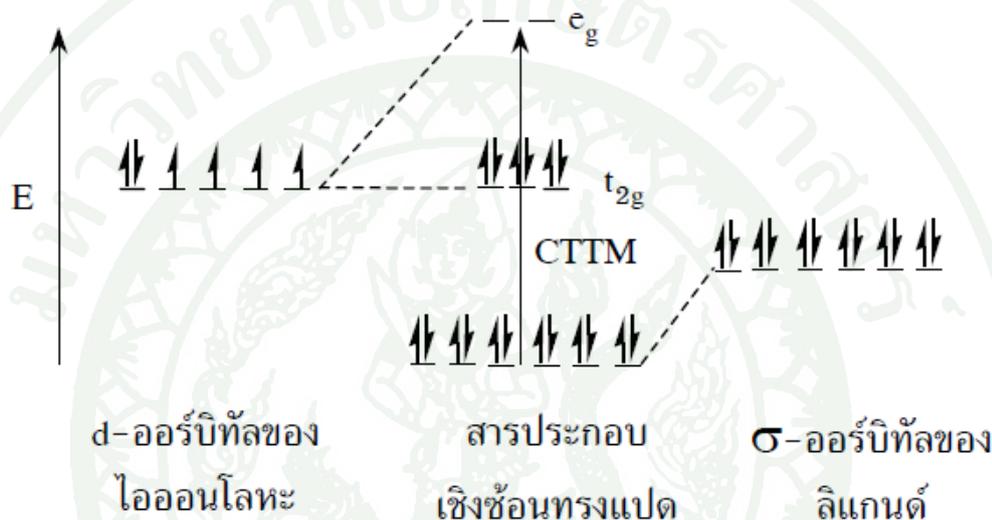
T หมายถึง เทอมที่มีสามระดับพลังงานที่เท่ากัน (triple degenerate)

เทอมสัญลักษณ์ย่อยทุกตัวมีตัวห้อยข้างทำเป็น g ทั้งหมด เนื่องจากโมเลกุลหรือไอออนรูปทรงแปดหน้า เป็นโมเลกุลที่มีศูนย์กลางสมมาตร เทอมสัญลักษณ์ P และ F มีตัวห้อยข้างทำเป็น g เช่นกัน ทั้งๆ ที่ p-ออร์บิทัลเมื่ออยู่ในสนามผลึกจะแยกเป็น T_{1u} (ตัวห้อยข้างทำเป็น u) ส่วน f-ออร์บิทัลจะถูกแยกเป็น a_{2u} , t_{2u} และ t_{1u} กรณีโมเลกุลหรือไอออนรูปทรงสี่หน้า เทอมสัญลักษณ์ย่อยทุกตัวไม่มีตัวห้อยข้างทำเป็น เหมือนของโมเลกุลทรงแปดหน้า เนื่องจากเป็นโมเลกุลที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตร เช่น เทอมสัญลักษณ์ D แยกเป็นเทอมสัญลักษณ์ย่อย T_2 และ E เป็นต้น

สเปกตรัมการถ่ายโอนประจุ (charge-transfer spectra)

ในสารประกอบเชิงซ้อนนอกจากจะมีแทรนซิชันที่เกิดจาก $d \rightarrow d$ ออร์บิทัลแล้วยังมีแทรนซิชันยินยอมที่เรียกว่า แแถบการถ่ายโอนประจุซึ่งแถบการถ่ายโอนประจุนี้มีความเข้มมากกว่า (ค่า $\epsilon = 50,000 \text{ Lmol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ หรือมากกว่า) แถบที่เกิดจาก d-d แทรนซิชัน (ค่า $\epsilon = 20$

$\text{Lmol}^{-1} \text{cm}^{-1}$ หรือน้อยกว่า) แถบการถ่ายโอนประจุจะเกิดขึ้นในช่วงของอัลตราไวโอเลต และช่วงต่อกับวิสิเบิล แถบที่เกิดขึ้นจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลเชิงโมเลกุลของลิแกนด์ไปยังไอออนของโลหะ หรือเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลเชิงโมเลกุลของโลหะไปยังลิแกนด์ตัวอย่างของสารประกอบเชิงซ้อนทรงแปดหน้าที่ยึดเรียงอิเล็กตรอนแบบ d^6 ซึ่งมีลิแกนด์ชนิดผู้ให้แบบซิกมา (σ -donor) ดังแสดงในภาพที่ 5

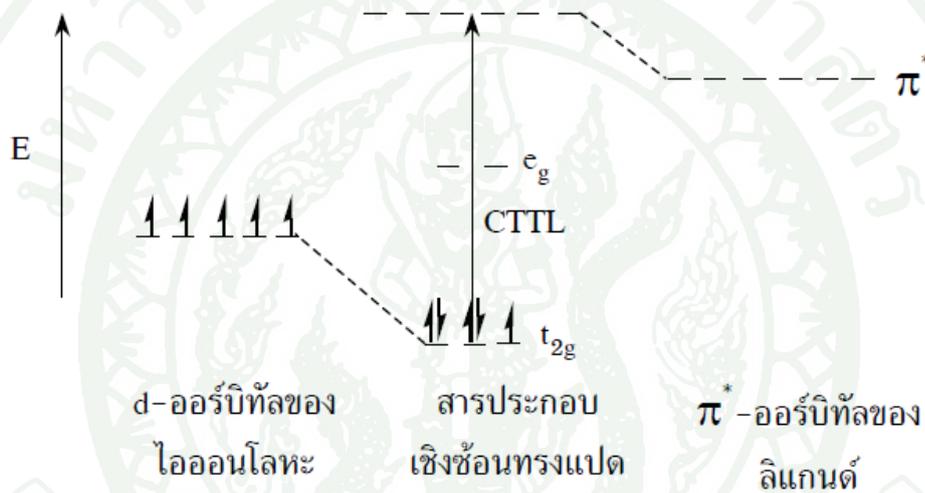


ภาพที่ 5 แสดงการถ่ายโอนประจุจากลิแกนด์ไปยังโลหะ (CTTM คือ charge transfer to metal)

จากภาพที่ 5 อิเล็กตรอนสามารถเกิดแทรนซิชันได้โดยกระโดดจาก σ -ออร์บิทัลของลิแกนด์ไปยัง e_g -ออร์บิทัลของไอออนโลหะ เรียกว่าการถ่ายโอนประจุไปยังโลหะ (charge transfer to metal) การเกิดแทรนซิชันแบบนี้เหมือนไอออนโลหะรับอิเล็กตรอนจึงเรียกว่า การถ่ายโอนประจุแบบรีดักชัน (reduction charge transfer) ตัวอย่างเช่น การเกิดสเปกตรัมของไอออนเชิงซ้อน $[\text{IrBr}_6]^{2-}$ (d^5) และ $[\text{IrBr}_6]^{3-}$ (d^6) สเปกตรัมของไอออนทั้งสองสามารถพบแถบดูดกลืนเนื่องจากการถ่ายโอนประจุดังนี้

$[\text{IrBr}_6]^{2-}$ มีแถบดูดกลืน 2 แถบ คือ แถบที่เกิดใกล้ 600 nm และแถบใกล้ 270 nm เป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเกิดแทรนซิชันจาก σ -ออร์บิทัล ไปยัง t_{2g} -ออร์บิทัล และ e_g -ออร์บิทัล ในกรณีของ $[\text{IrBr}_6]^{3-}$ t_{2g} -ออร์บิทัลของไอออนโลหะบรรจุอิเล็กตรอนเต็ม (รูปที่ 5) แทรนซิชันของอิเล็กตรอนในกรณีนี้เกิดขึ้นระหว่าง σ -ออร์บิทัล กับ e_g -ออร์บิทัลเท่านั้น เพราะฉะนั้นแถบดูดกลืนที่พลังงานต่ำจึงไม่สามารถสังเกตเห็น แต่จะเห็นแถบดูดกลืนที่ใกล้ 250 nm จึงสัมพันธ์

กับการถ่ายโอนประจุไปยัง e_g -ออร์บิทัล ตัวอย่างของสารประกอบเชิงซ้อนทรงสี่หน้าที่เกิดแถบดูดกลืนเนื่องจากการถ่ายโอนประจุ เช่น MnO_4^- ซึ่งมีสีม่วง เนื่องจากเกิดการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนจาก p -ออร์บิทัล ของ O ไปยังออร์บิทัลว่างของ Mn^{7+} การถ่ายโอนประจุจากโลหะไปยังลิแกนด์ เรียกว่า การถ่ายโอนประจุไปยังลิแกนด์ (charge transfer to ligand) ลิแกนด์ที่จะเป็นผู้รับอิเล็กตรอนจากไอออนของโลหะจะต้องเป็นลิแกนด์ชนิดผู้รับแบบไพ โดยลิแกนด์ต้องมี π^* -ออร์บิทัลว่างสำหรับรับอิเล็กตรอน ดังแสดงใน รูปที่ 6 ซึ่งเป็นกรณีที่ไอออนโลหะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนแบบ d^5



ภาพที่ 6 แสดงการถ่ายโอนประจุจากโลหะไปยังลิแกนด์ (CTTL คือ charge transfer to ligand)

การถ่ายโอนประจุจากโลหะไปยังลิแกนด์ดูเหมือนว่าโลหะให้อิเล็กตรอนแก่ลิแกนด์ จึงเรียกว่า การถ่ายโอนประจุแบบออกซิเดชัน (oxidation charge transfer) ตัวอย่างเช่น สารประกอบเชิงซ้อนของ Fe^{3+} ถูกกระตุ้นให้กลายเป็น Fe^{4+} ที่สถานะถูกกระตุ้น ลิแกนด์ที่มี π^* -ออร์บิทัลว่างได้แก่ CO CN^- SCN^- S_2CNR_2^- (dithiocarbamate) และ ในกรณีของ $[\text{Cr}(\text{CO})_6]$ ซึ่งมีทั้งออร์บิทัลชนิดผู้ให้แบบซิกมาและผู้รับแบบไพ ออร์บิทัลทั้งสองชนิดนี้เกิดการถ่ายโอนประจุได้ ไม่เป็นการง่ายที่จะหาว่าเกิดการถ่ายโอนประจุแบบใดในสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ ลิแกนด์หลายชนิดเมื่อเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนจะมีสีสดใส ซึ่งอาจเกิดจากการซ้อนเหลื่อมของแถบดูดกลืนในช่วงอัลตราไวโอเล็ตต่อกับช่วงวิสิเบิล

ดังนั้นสารประกอบโคออร์ดิเนชันส่วนใหญ่เป็นสารประกอบมีสี่สโตไล เนื่องจาก สารประกอบเหล่านี้สามารถดูดกลืนแสงได้ โดยเฉพาะแสงวิสิเบิลซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นที่ ตามมองเห็นได้ สีของสารประกอบคือสีเติมเต็มของสีที่สารนั้น ดูดกลืนเข้าไป สเปกตรัมดูดกลืน เกิดจากการแทนที่ชั้นของออร์บิทัลจากสถานะพื้นไปยังสถานะถูกกระตุ้น สเปกตรัมเหล่านี้ สามารถหาได้จากแผนภาพทานาเบ -ชูกาโน สเปกตรัมที่เกิดจากการถ่ายโอนประจุจะมีความ เข้มสูง (เห็นชัดเจน) ส่วนสเปกตรัม d-d มีความเข้มต่ำ นอกจากในสารประกอบนั้นไม่ได้เกิดสเปกตรัม d-d บริสุทธิ์ แต่เกิดการบิดเบี้ยวของโมเลกุลและ d-ออร์บิทัลไปรวมกับออร์บิทัลอื่น จึงทำให้มีความเข้มเพิ่มขึ้น

เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ UV-Vis-NIR

สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์โดยส่วนใหญ่สามารถดูด กลืนแสง หรือรังสีที่อยู่ในช่วงยูวี และช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้ (หรือแสงขาว) การวิเคราะห์สาร ดังกล่าวทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ด้วยคุณสมบัตินี้จึงเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เพราะ ให้ความถูกต้องแม่นยำ และมีความไวสูง

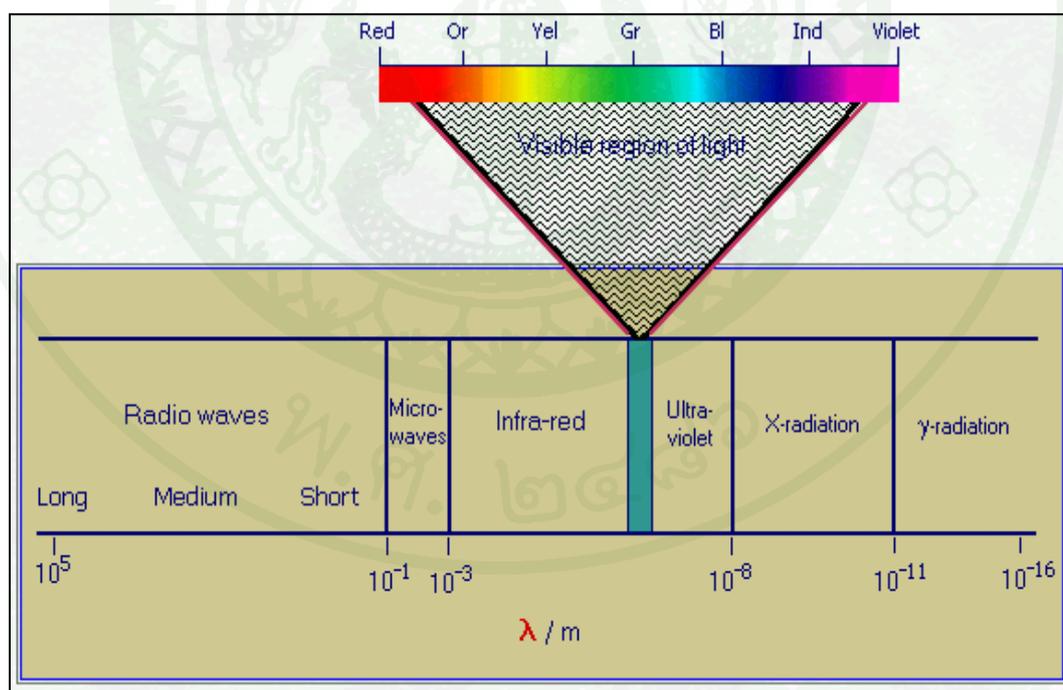
UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสง ในช่วงรังสียูวี และช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ ความยาวคลื่นแสง จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสาร ที่มีอยู่ในตัวอย่าง ซึ่งโดย ส่วนใหญ่ จะเป็น สารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ที่สามารถ ดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น เหล่านี้ได้ เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลง มีความไวมากขึ้นให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงการ พัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุม กับการกับเครื่องมือในการวิเคราะห์ และการฟ่งต่อด้วย เทคนิคอื่นๆ ทำให้สามารถนำไป ใช้งานได้ กว้างขึ้น

สเปกตรัมของ UV-Vis-NIR

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีแถบสเปกตรัม ตั้งแต่ช่วงความ ยาวคลื่นสั้น (รวมทั้ง รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์) ไปจนถึง ช่วงความยาวคลื่นยาว (รวมถึงไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ) รังสียูวีและ แสงขาวเป็นเพียงส่วนเล็กๆ ส่วนหนึ่ง ของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้า โดยมี ความยาวคลื่นประมาณ 190-800 nm

ในแถบ Electromagnetic spectrum พบว่ารังสีอินฟราเรดจะมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 0.78 mm ถึง 1,000 mm หรือมี Wave Number ที่ $12,500 \text{ cm}^{-1}$ ถึง 5 cm^{-1} จะจัดช่วงสเปกตรัมของรังสีอินฟราเรด ออกเป็น 3 ช่วงซึ่งเมื่อนำเอาแต่ละช่วงมาวิเคราะห์ทาง Spectroscopy จะให้ผลการวิเคราะห์ที่ได้ต่างกันคือ

1. Near Infrared Region Wavenumber (NIR) $12,500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่จะให้สเปกตรัมที่ได้จาก โอเวอร์โทน (Overtone Band)
2. Middle Infrared Region Wavenumber (MIR) $4,000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ เป็นช่วงที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากใช้ประโยชน์ได้มากในการวิเคราะห์
3. Far Infrared Region Wavenumber (FIR) $400 - 5 \text{ cm}^{-1}$ สเปกตรัมที่ได้จะเป็นการสั่นทั้งแกนของโครงสร้างโมเลกุลหรือเรียกว่า ช่วงลายพิมพ์นิ้วมือของสาร (**Fingerprint Region**) ซึ่งมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบสาร เนื่องจาก ลายพิมพ์นิ้วมือของสารเดียวกันจะให้สเปกตรัมที่เหมือนกัน



ภาพที่ 7 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา เทคนิค UV- Vis spectroscopy ได้ถูกนำไปใช้งานต่าง ๆ อย่างมากมาย แม้ว่าทุกวันนี้เครื่องมือที่นำเทคนิคนี้ไปใช้จะมีความแตกต่างจากเครื่องมือตัวแรกเป็นอย่างมากแต่เครื่องมือเหล่านี้ก็ทำงานบนหลักการพื้นฐานเดียวกัน คือ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสง ในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายใน อะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้ว เปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาว คลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงหรือค่า absorbance ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการ ดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถระบุชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



ภาพที่ 8 เมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ อิเล็กตรอนภายในโมเลกุลมีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงาน

UV-Vis Spectrophotometer

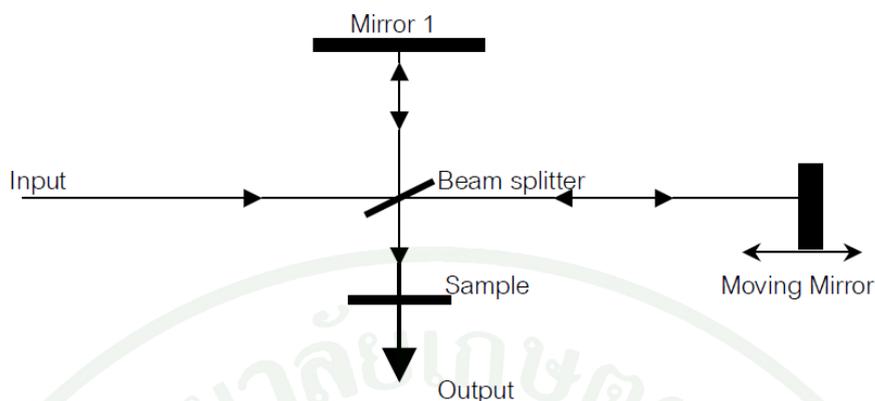
เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-Vis Spectroscopy ไปใช้งาน เครื่องมือตัวนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่าง เปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆ ที่เหมือนกัน ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง เกรตติง หรือโมโนโครเมเตอร์ เซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแหล่งกำเนิดแสง จะต้องให้แสงที่คงที่อย่างต่อเนื่อง ตัวที่นิยมใช้คือ Halogen Tungsten Tube ซึ่งให้แสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 320-2500 nm สำหรับแหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดดิวทีเรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 nm แต่แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดนั้นจะมีความยาวคลื่นต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้ โมโนโครเมเตอร์เป็นตัวกระจายแสงออกเพื่อให้แสงที่จะผ่านไปยังตัวอย่างมี

ความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่นค่าเดียวจะผ่านไปยังเซลล์ที่บรรจุสารตัวอย่างและสารเปรียบเทียบ (cuvettes) ซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง ภายใน 1 cm (ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปใน ตัวอย่างตาม กฎของ Beer-Lambert) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer บางรุ่น สามารถใช้ หลอดทดลองเป็น cuvettes ได้ แต่ cuvettes ที่ดีที่สุดนั้น ทำมาจากควอร์ตที่มีคุณภาพสูง สำหรับ cuvettes ที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกนั้น ก็เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป แต่สามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงแสงขาวเท่านั้น เพราะ แก้วและพลาสติก ดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวี แสงในส่วนที่ไม่ถูกดูดกลืน จะเดินทางผ่านตัวอย่างมา ถึงเครื่องตรวจจับ สำหรับเครื่อง ตรวจจับที่นิยมใช้ได้แก่ PMT (photomultiplier tube), diode arrays และ CCDs (charge coupled devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่น ร่วมกับค่ามุมของ แต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน ผลของสเปกตรัมที่ได้ จะแสดงในรูป ของกราฟ ระหว่างค่า absorbance และค่าความยาวคลื่น

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณ โดยหลักการแล้ว สเปกตรัมซึ่งเกิดการดูดกลืนแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวของสารตัวอย่าง จะแสดงคุณสมบัติเฉพาะของสารนั้นๆ ทำให้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์สารชนิดต่างๆ ได้ แต่ทั้งนี้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้เท่านั้นจะให้ผลได้เพียงบางส่วน เพราะลักษณะของสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดที่ได้ จะมีความกว้างมาก และยังมีรายละเอียดอีกเยอะจึงต้องใช้เทคนิคอื่นๆ ร่วมวิเคราะห์ด้วย ดังนั้นเราจึงใช้เทคนิคอีกอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์สารตัวอย่าง คือ FT-IR Spectrometer.

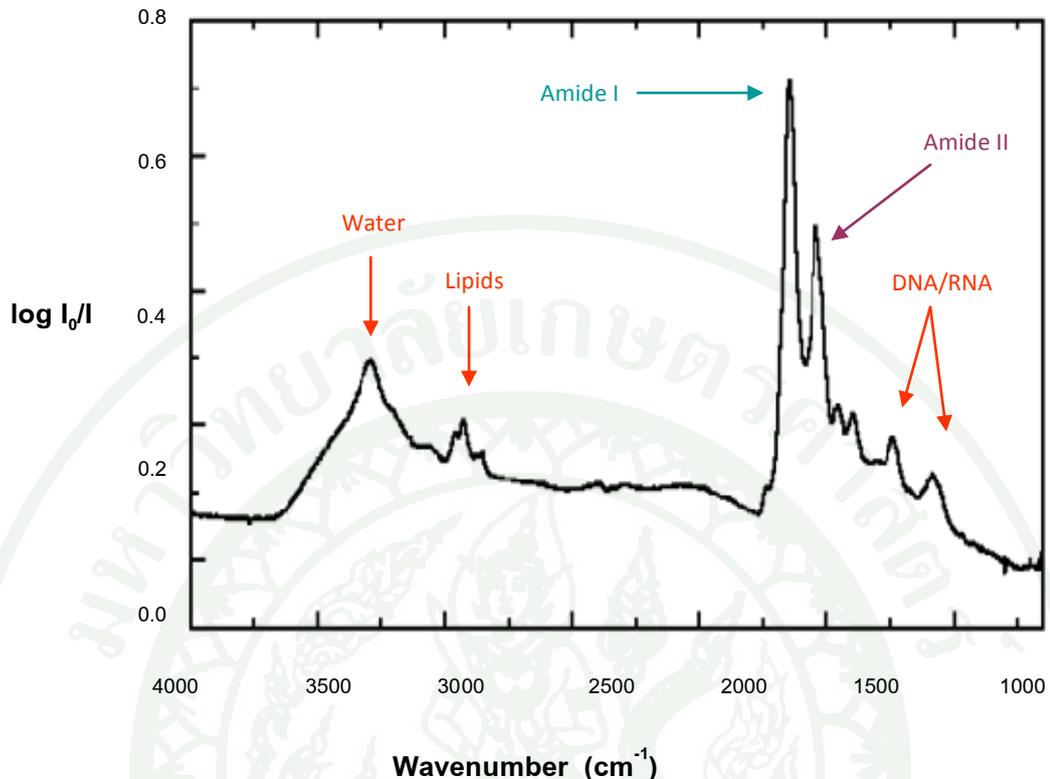
FT-IR Spectrometer

Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR Spectrometer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจาก เครื่อง IR Spectrometer เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูงและสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อย ๆ ได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FT-IR Spectrometer เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรดสู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญ คือ ตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่งจะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า The Michelson Interferometer ดังแสดงใน ภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงแผนภูมิระบบ The Michelson Interferometer

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรด แบ่งเป็นช่วงๆ คือ ช่วง wave number $4000 - 12800 \text{ cm}^{-1}$ ($2.5 - 0.78 \text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วง wave number $200 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ($50-2.5 \text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วง wave number $10 - 200 \text{ cm}^{-1}$ ($1,000 - 50 \text{ }\mu\text{m}$) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น คลื่นอินฟราเรดในช่วง wave number $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของ โมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum) ดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 10 แสดง อินฟราเรดสเปกตรัม (IR Spectrum)

อินฟราเรด สเปกตรัม เป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆ ว่ามีหมู่ฟังก์ชันอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่น สารกลุ่มแอลกอฮอล์ มีช่วงการดูดกลืน ของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3300-3600 cm⁻¹ หมู่อะมีน มีช่วงการดูดกลืน พันธะ N-H อยู่ที่ 3500 cm⁻¹ สารเอสเทอร์ มีช่วงการดูดกลืน ของหมู่ C-O อยู่ที่ประมาณ 1000-1300 cm⁻¹ เป็นต้น เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏใน อินฟราเรดสเปกตรัมช่วงการดูดกลืนอยู่ที่ 1350 – 4000 cm⁻¹ จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะใน หมู่ฟังก์ชันต่างๆที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชัน (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910 – 1350 cm⁻¹ จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่าย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region) การใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาไม่นานและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณาเปรียบเทียบจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่างที่วัดในตัวอย่างกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำ ค่ายอดของการ

ดูดกลืน มาเปรียบเทียบ กัน ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่น การวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างโพลีเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยการเทียบค่าการส่องผ่าน เช่น การหาปริมาณตัวยา สารออกฤทธิ์ในยาเม็ด เป็นต้น

จากการทดลองของ Zang และ Wen (Zang and Wen, 2008) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้จากเครื่อง FT-IR ของ Fe-Mn-Cu-Co-O spinel มีช่วงการดูดกลืนปรากฏ 2 ช่วง เป็น ν_1 , ν_2 ในช่วง $602 - 445 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจากการรายงานของ Gittola (Gittola *et al.*, 1999) กล่าวว่า ในช่วงความถี่สูง (ν_1) จะเป็น พีก การดูดกลืนของโครงสร้าง ผลึกที่ตำแหน่งเตตระฮีดรอล (tetrahedral site) และพีกที่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าจะเป็นตำแหน่งของออกตะฮีดรอล (Octahedral site)

จากการทดลองของ Gillot (Gillot *et al.*, 1997) พบสเปกตรัมการดูดกลืนในบริเวณ $900 - 100 \text{ cm}^{-1}$ โดยมีช่วงการดูดกลืนปรากฏอยู่ 2 ช่วง คือ สเปกตรัมการดูดกลืนของ ν_1 และ ν_2 ที่ตำแหน่ง $x = 0$ มีช่วงการดูดกลืน ν_1 ที่ตำแหน่ง 579 cm^{-1} และ ν_2 อยู่ที่ตำแหน่ง 415 cm^{-1} เมื่อค่า $x = 1$ ช่วงการดูดกลืน ν_1 อยู่ที่ตำแหน่ง 558 cm^{-1} และ ν_2 อยู่ที่ตำแหน่ง 415 cm^{-1} การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งการดูดกลืน เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะภายในนิวเคลียร์ของ $\text{Fe}^{3+} - \text{O}^{2-}$ ที่บริเวณ A- และ B- site (Josyulu, 1981) ในสปีเนลธรรมชาติ การดูดกลืนขึ้นอยู่กับบริเวณของ octahedral site ของไอออนบวก โดยที่บริเวณเตตระฮีดรอล จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

การเกิดลูมิเนสเซนส์ (Luminescence) ในสปีเนล

เกิดจากการฉายรังสีทำให้อิเล็กตรอนในชั้นระดับพลังงาน d^3 แทนที่โดย Cr^{3+} ในตำแหน่งออกตะฮีดรอล เนื่องจาก θ Alumina, γ Alumina อาจจะมีปริมาณน้อยๆของ Cr^{3+} น้อยๆ ปรากฏอยู่ในไซต์ (site) เมื่อมีการกระตุ้นที่เหมาะสมจะปรากฏเส้นลูมิเนสเซนส์ออกมา โดยลูมิเนสเซนส์ที่ได้จาก α Alumina จะเกิดช่วงการดูดกลืน ที่ $14325 - 14450 \text{ cm}^{-1}$ (698-692 nm) และที่ได้จาก θ Alumina จะเกิด ช่วงการดูดกลืน ที่ $14475 - 14650 \text{ cm}^{-1}$ (690.8 - 682.6 nm) เมื่ออะลูมินา (Alumina) คือ Aluminium oxide มีสูตรทางเคมีเป็น Al_2O_3 จะพบอยู่ในรูป แอลฟา (α) แกมมา (γ) และ เซต้า (θ)

อะลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคือ Aluminium oxide มีสูตรทางเคมี เป็น Al_2O_3 จัดเป็นออกไซด์ที่ มนุษย์ใช้ประโยชน์มาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบัน และยังคงถูกพัฒนานำ มาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อะลูมินาบริสุทธิ์มีความถ่วง จำเพาะ 3.4 - 4.0 จุดหลอมเหลว 2030 องศาเซลเซียส ความแข็งเท่ากับ 9 ตามโมห์สเกล อะลูมินาในธรรมชาติ จัดเป็นแร่ธาตุ ที่พบในรูปของ corundum (Al_2O_3) diaspore ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) gibbsite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และ bauxite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) โดยแร่ corundum ที่พบจะเป็นรัตนชาติ เช่น ทับทิม (ruby) ไพลิน (sapphire) บุษราคัม (yellow sapphire) เป็นรูปแบบของ corundum ที่มีมลทิน ในขณะที่ corundum ที่ไม่มีมลทินจะไม่มีสี อะลูมินาบริสุทธิ์และ ไฮเดรต อะลูมินา สามารถสกัดได้จาก แร่ bauxite และดินลูกรัง โดยวิธีของ Bayer (Bayer process) คือนำ แร่มาบดแล้ว หลอมด้วยโซดาไฟ (caustic soda) จากนั้นแยกตะกอนที่ได้ออกมาแล้วเผา อะลูมินาจะพบในรูป แอลฟา แกมมา และเบต้า โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ แอลฟาอะลูมินาและแกมมาอะลูมินา ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส อะลูมินาจะอยู่ในรูปแกมมาหากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1150 - 1200 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนอยู่ในรูปของแอลฟาแต่เบต้าอะลูมินา จะอยู่ในรูปของสารประกอบโซเดียมคือ sodium aluminate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$) เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีค่าความแข็ง สูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อ อากาศเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้า ที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ใน อุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมเซรามิก และอื่น ๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

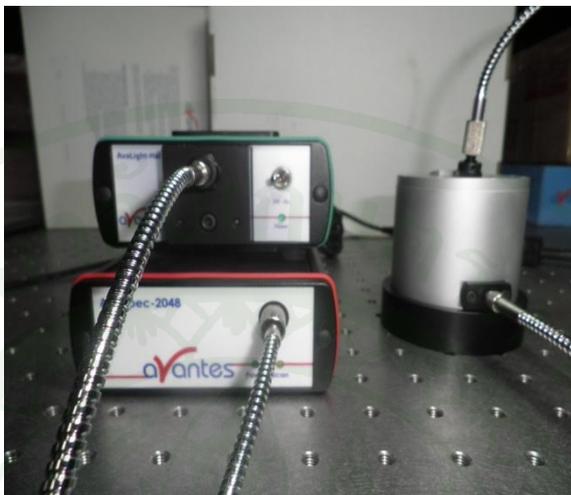
อุปกรณ์

1. เครื่องฉายรังสีแกมมา Co-60



ภาพที่ 11 เครื่องฉายรังสีแกมมา Co-60

2. เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrometer



ภาพที่ 12 เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrometer (AvaSpec – 2048)

3. เครื่อง FT-IR Spectrometer



ภาพที่ 13 เครื่อง FT-IR Spectrometer รุ่น Spec 400

4. เครื่องหาความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity Balance)



ภาพที่ 14 เครื่องหาความถ่วงจำเพาะ

5. เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง (Refractometer)



ภาพที่ 15 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง

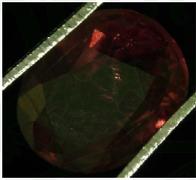
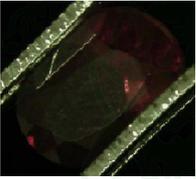
6. เครื่องถ่ายภาพอณูมณี (Digital Camera)



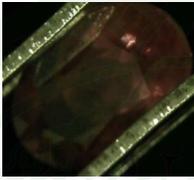
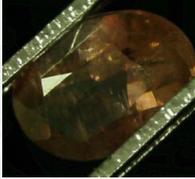
ภาพที่ 16 เครื่องถ่ายภาพอณูมณี

7. ตัวอย่างสปีเนลธรรมชาติทั้งหมด 10 ตัวอย่าง

ตารางที่ 7 แสดงลักษณะของตัวอย่างสปีเนลและสี

ตัวอย่าง สปีเนล	รูปสปีเนล	สีของสปีเนล
Sp1		แดงอมม่วง
Sp2		ม่วงชมพู
Sp3		ม่วงเข้ม
Sp4		ม่วงแดง
Sp5		ชมพูส้ม
Sp6		ชมพูม่วง

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ตัวอย่าง สปีเนล	รูปสปีเนล	สีของสปีเนล
Sp7		ชมพูม่วง
Sp8		ม่วงชมพู
Sp9		ม่วงชมพู
Sp10		ม่วงส้ม

วิธีการ

1. ก่อนการอาบรังสีแกมมา

- 1.1. ทำการรวบรวมสปีเนลธรรมชาติ จากแหล่งกำเนิดของประเทศพม่าที่ไม่เคยผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทั้งหมด 10 ตัวอย่าง มีน้ำหนักเฉลี่ยประมาณตัวอย่างละ 1 กระจัต
- 1.2. นำตัวอย่างมาตรวจสอบค่าดัชนีหักเหแสง โดยใช้เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง แล้วบันทึกผล
- 1.3. ทำการหาค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องหาค่าความถ่วงจำเพาะ แล้วบันทึกผล
- 1.4. นำตัวอย่างสปีเนลทั้ง 10 ตัวอย่างมาถ่ายภาพด้วยเครื่อง
- 1.5. ทำการวัดการดูดกลืนแสง UV-Vis-NIR โดยใช้สเปกโตรมิเตอร์แบบพกพาในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 nm มีรูปแบบของการวัดเป็นแบบการสะท้อนแสงกระจาย (diffuse reflection) โดยใช้ทรงกลมรวมแสง พร้อมทั้งวัดสีตามมาตรฐานของ CIE $L^*a^*b^*$ เมื่อ L คือ ความสว่าง a คือ ความเป็นสีแดง ค่าลบของ a แสดงความเป็นสีเขียว และ b คือ ค่าแสดงความเป็นสีเหลือง ค่าลบของ b แสดงความเป็นสีน้ำเงิน
- 1.6. ทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสง โดยใช้เครื่อง FT-IR Spectrometer ในช่วงความยาวคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle Infrared) ซึ่งแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ wave number กับค่าการส่องผ่านของแสง เรียกว่า อินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum)

2. หลังอาบรังสีแกมมาที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy

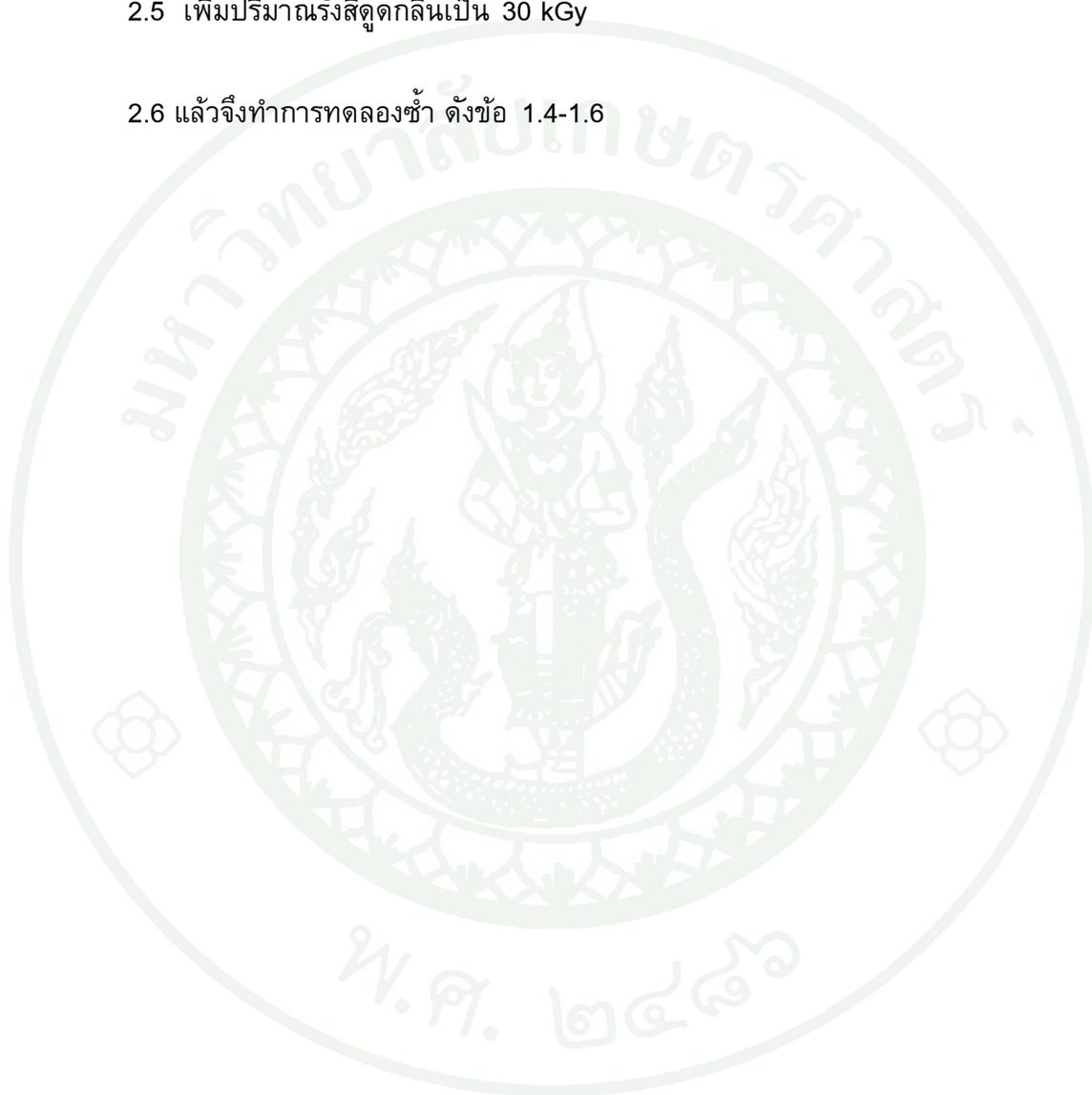
- 2.1 นำสปีเนลไปอาบรังสีแกมมา ด้วยเครื่องอาบรังสีแกมมาที่ศูนย์อาบรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)(TINT) ที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy
- 2.2 แล้วจึงทำการทดลองซ้ำ ดังข้อ 1.4-1.6

2.3 เพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 20 kGy

2.4 แล้วจึงทำการทดลองซ้ำ ดังข้อ 1.4-1.6

2.5 เพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 30 kGy

2.6 แล้วจึงทำการทดลองซ้ำ ดังข้อ 1.4-1.6



ผลและวิจารณ์

ผล

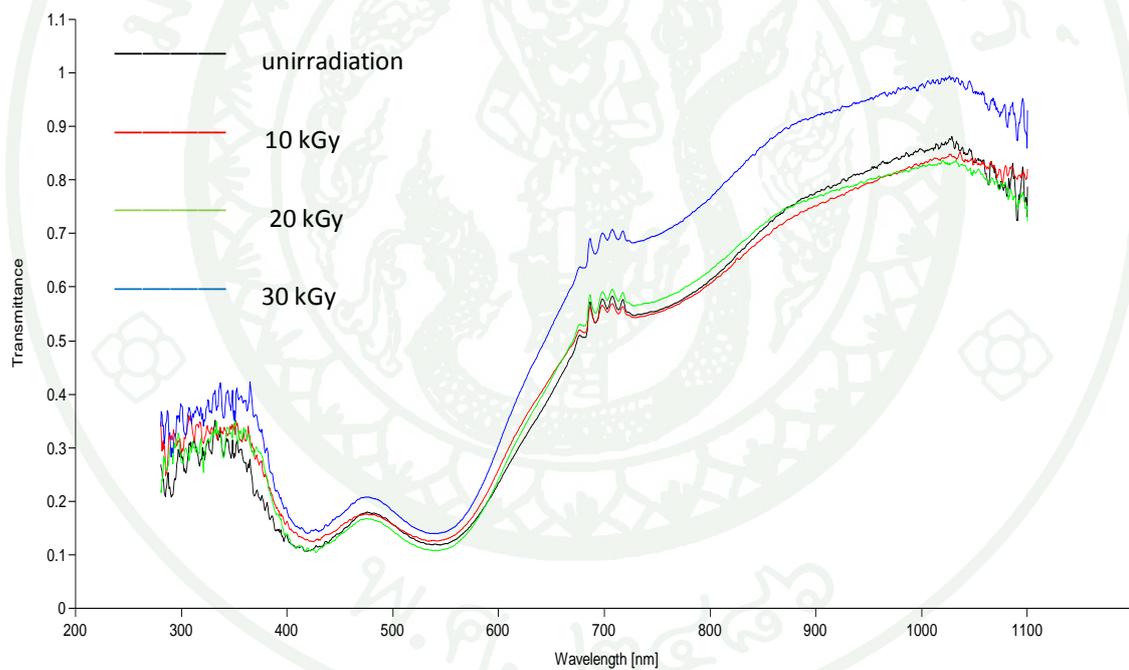
ตารางที่ 8 แสดงค่าดัชนีหักเหแสงและค่าความถ่วงจำเพาะของสปีเนลธรรมชาติจากแหล่งของประเทศพม่า

ตัวอย่าง	น้ำหนัก (กะรัต)	ดัชนีหักเหแสง	ความถ่วงจำเพาะ
Sp1	1.000	1.710	3.584
Sp2	0.921	1.760	3.913
Sp3	1.000	1.728	3.642
Sp4	0.982	1.710	3.613
Sp5	0.900	1.710	3.624
Sp6	0.920	1.710	3.586
Sp7	1.022	1.710	3.586
Sp8	1.224	1.710	3.578
Sp9	0.958	1.720	3.565
Sp10	1.000	1.710	3.570

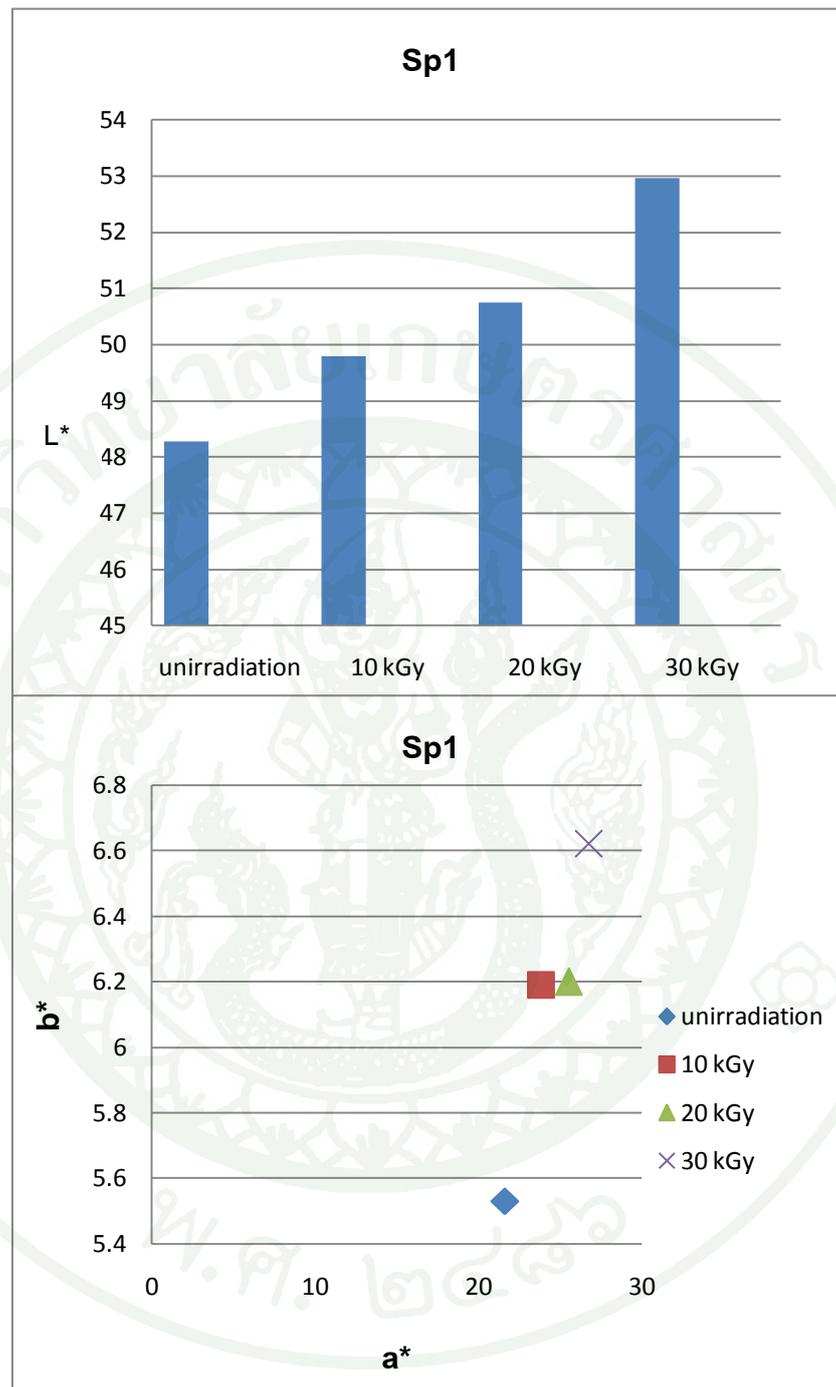
ผลจากการทดลองด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrometer



ภาพที่ 17 สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp1



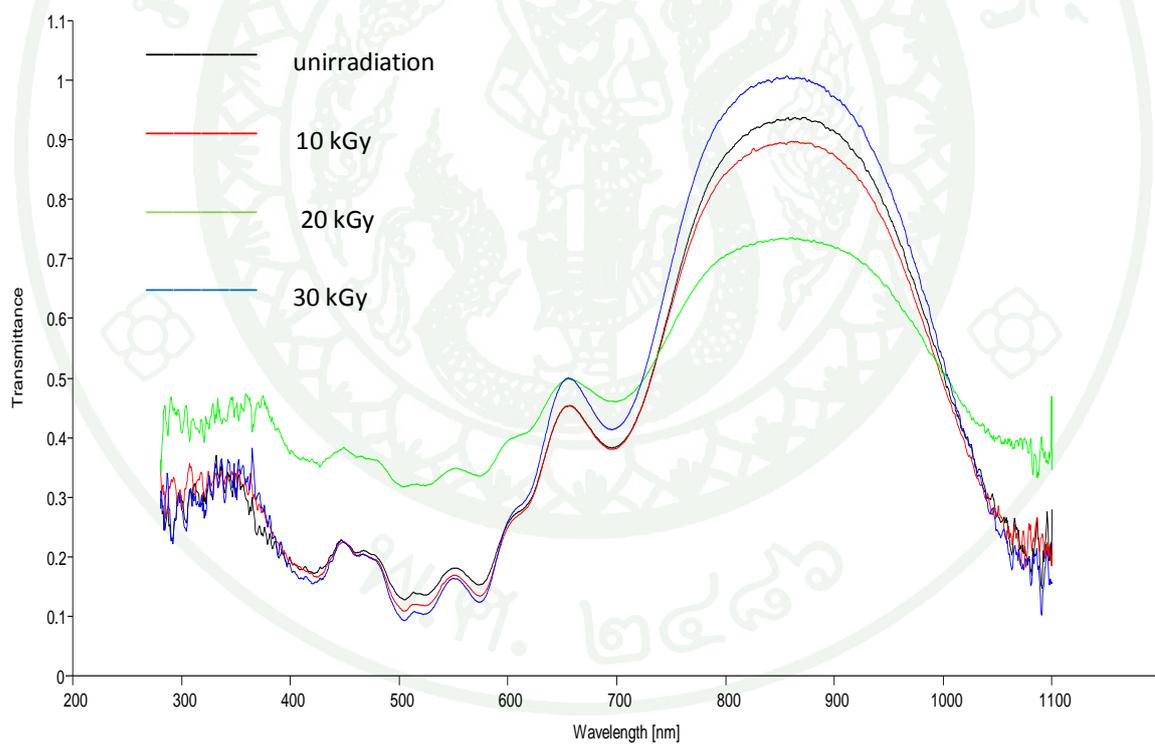
ภาพที่ 18 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



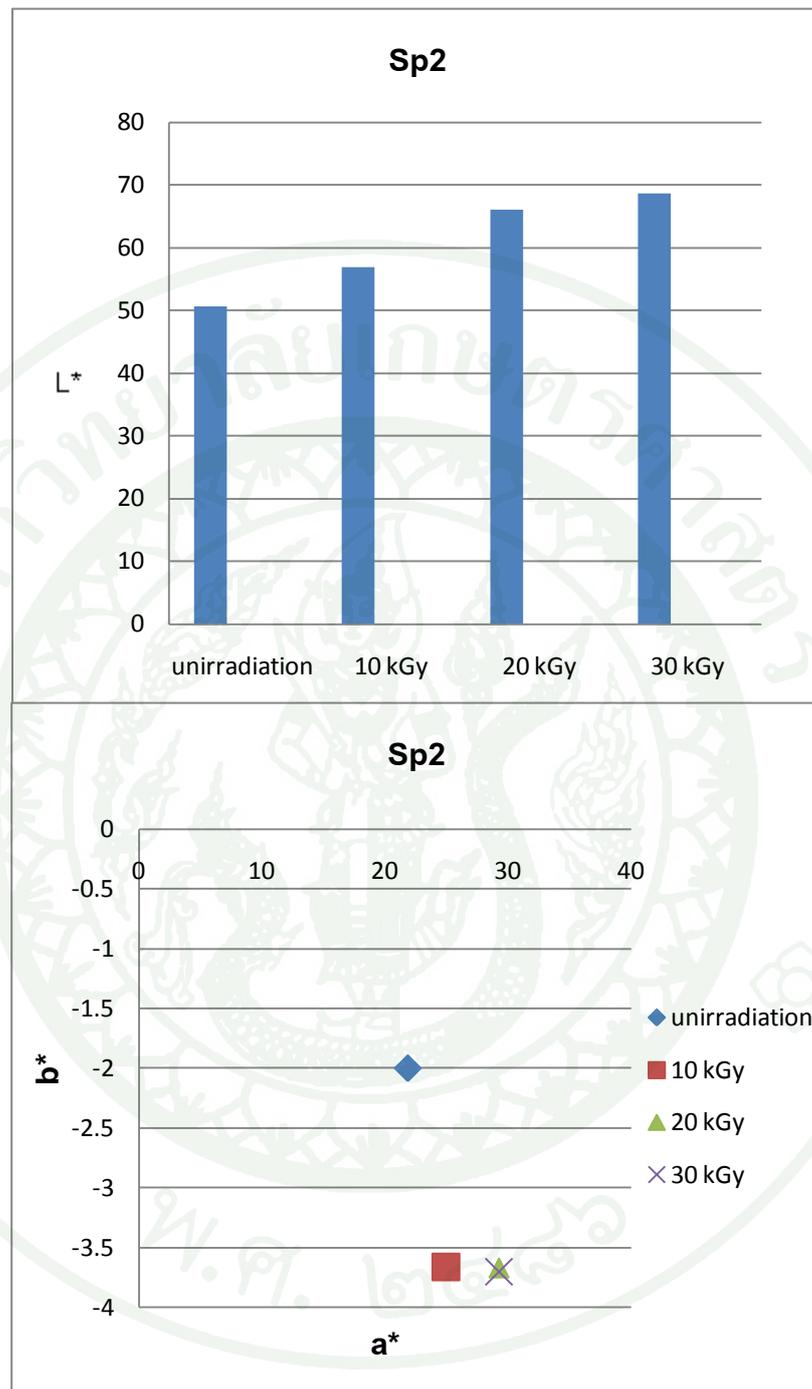
ภาพที่ 19 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp1 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 20 สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp2



ภาพที่ 21 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



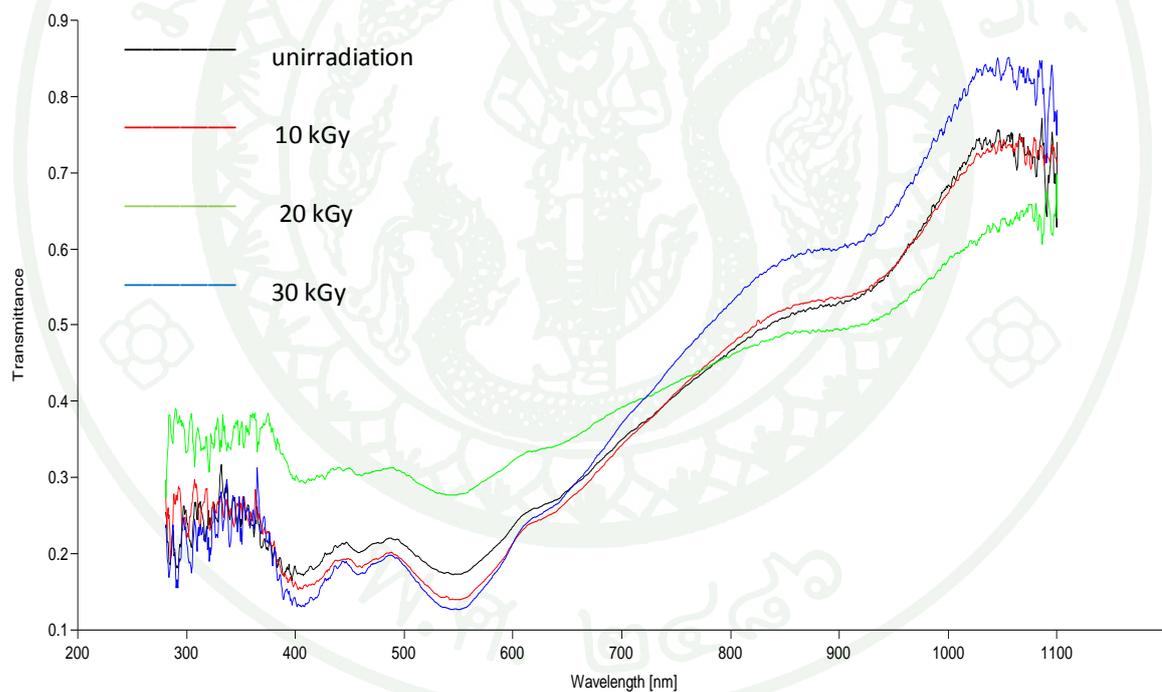
ภาพที่ 22 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp2 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



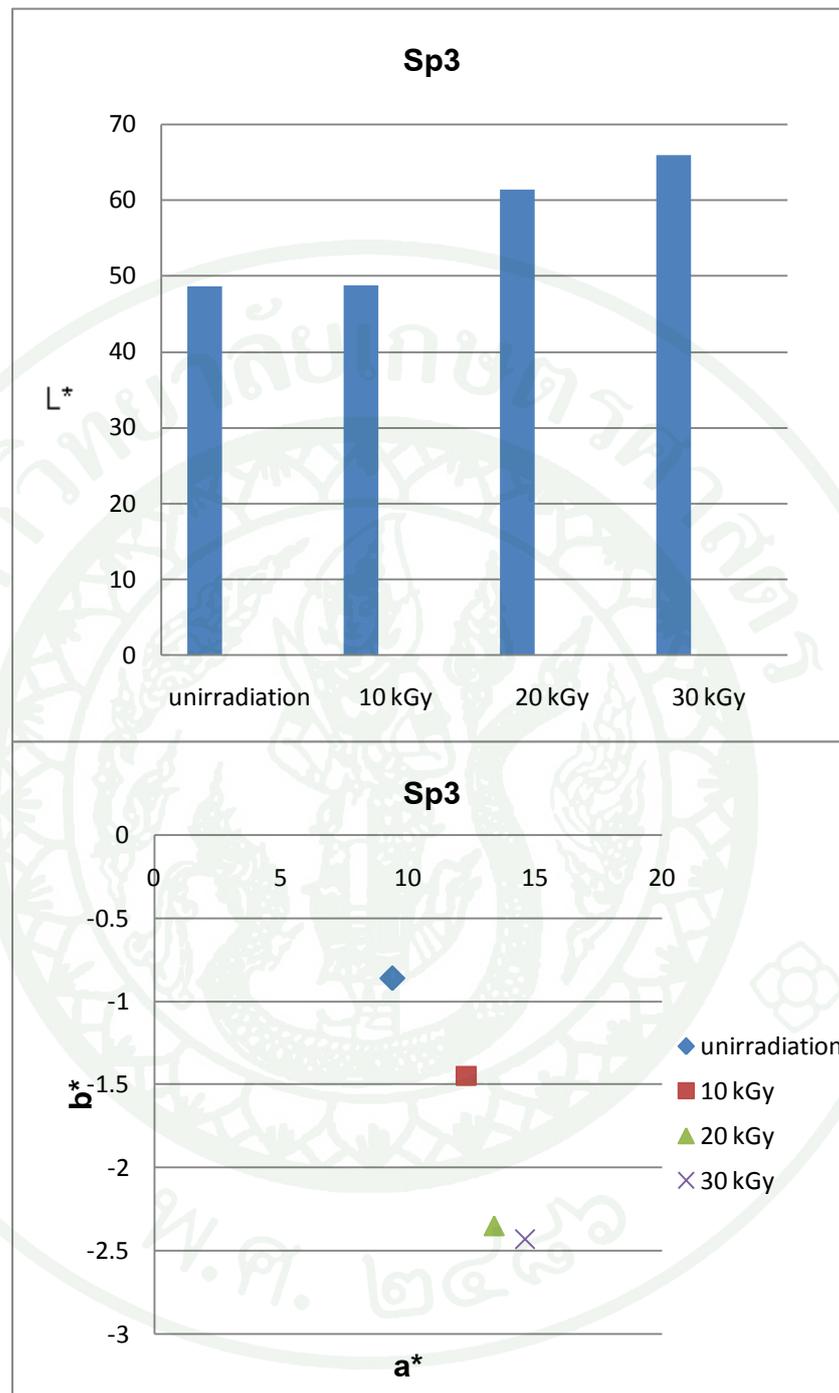
(a)

(b)

ภาพที่ 23 สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp3



ภาพที่ 24 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



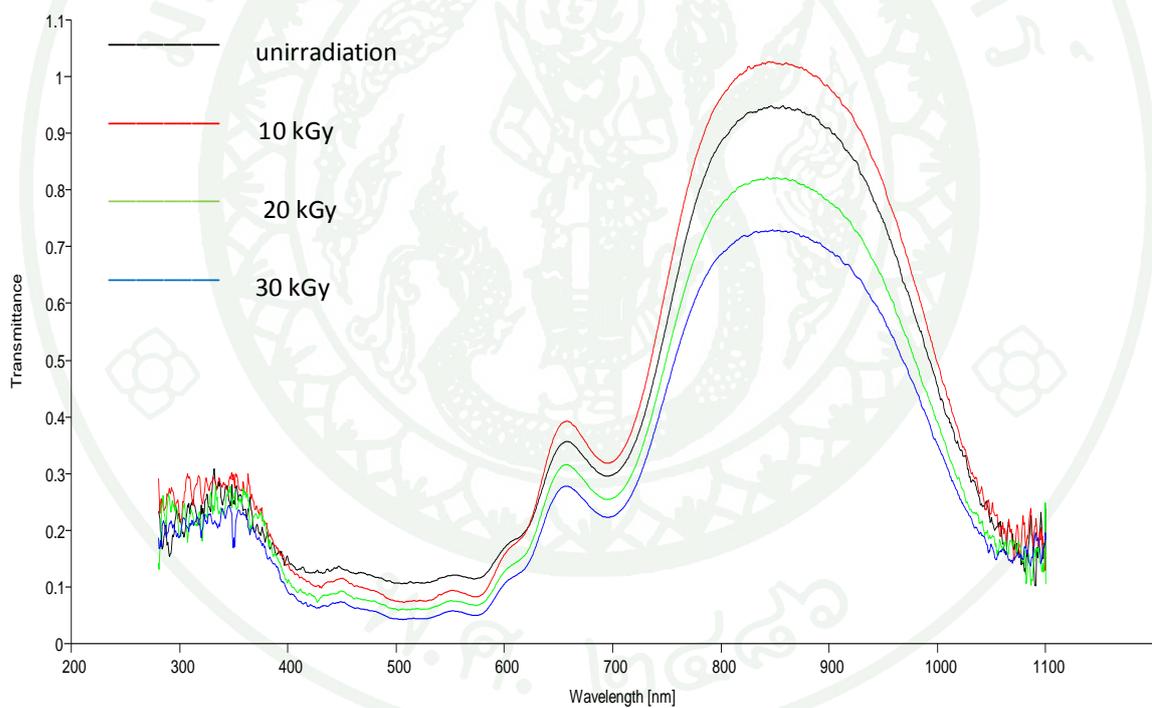
ภาพที่ 25 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp3 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



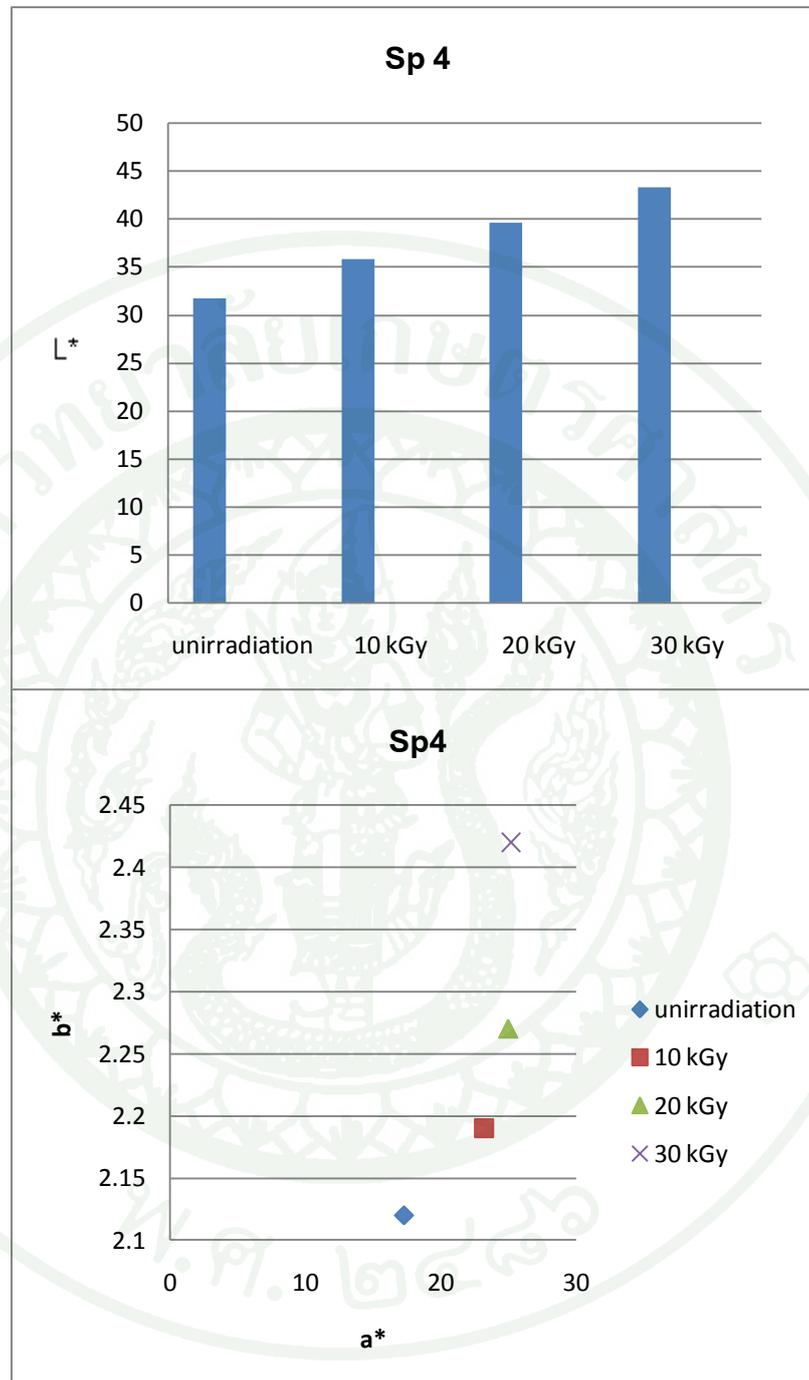
(a)

(b)

ภาพที่ 26 สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp4



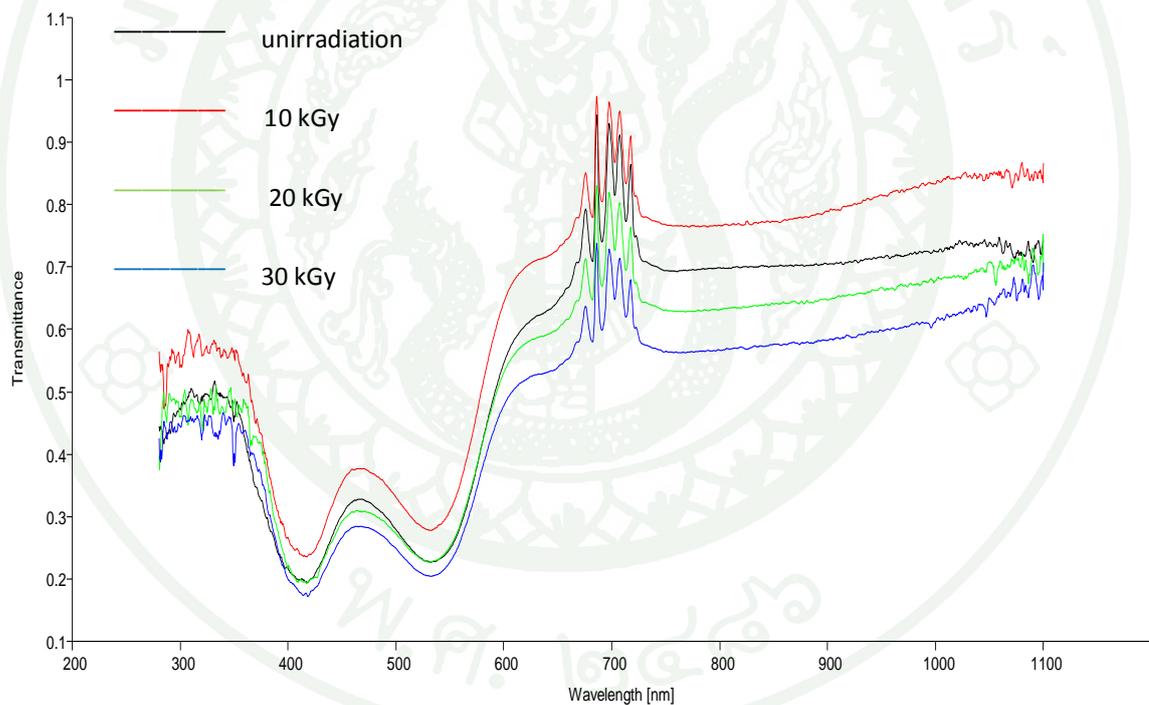
ภาพที่ 27 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



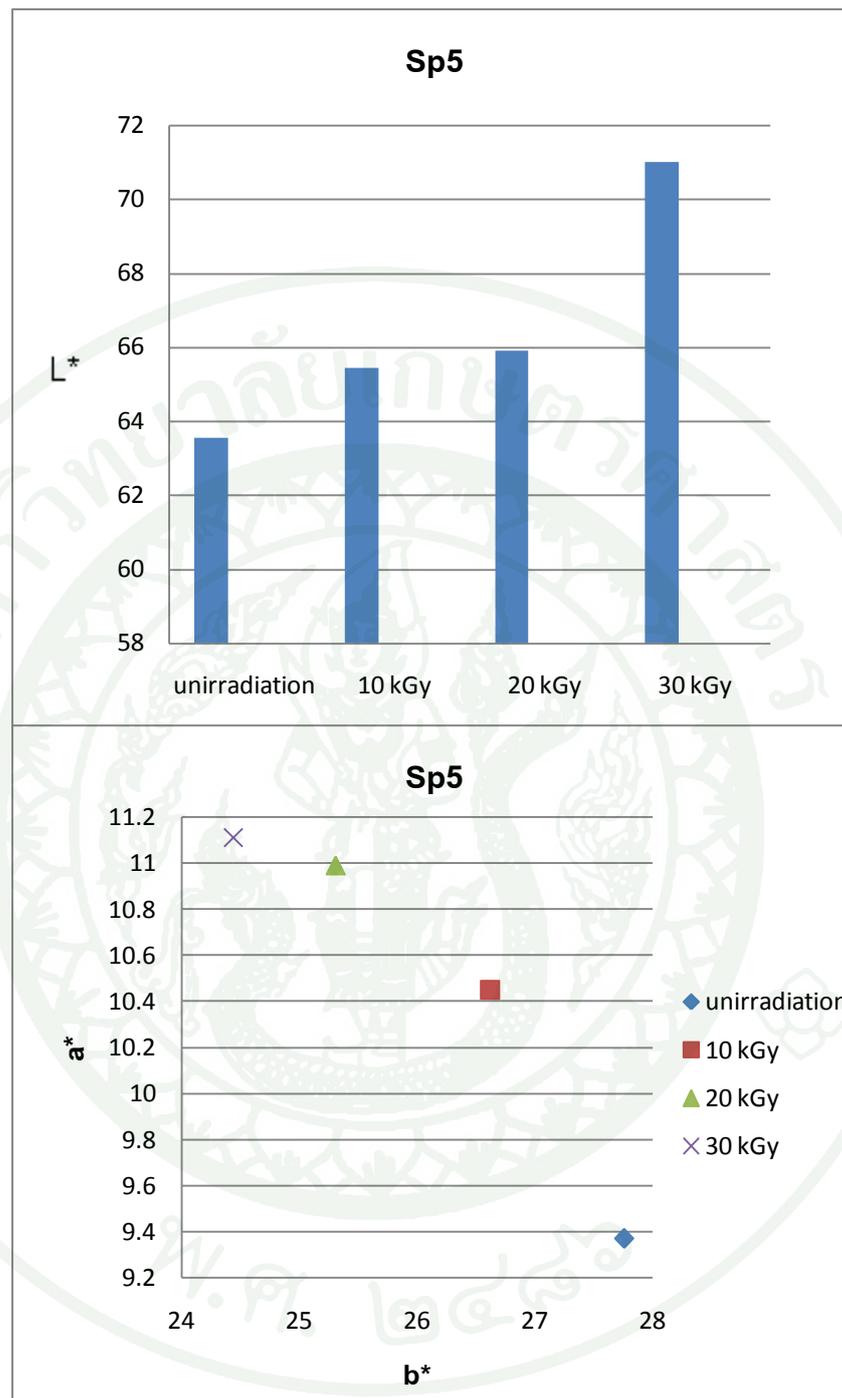
ภาพที่ 28 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp4 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 29 สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp5



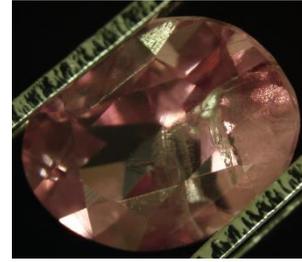
ภาพที่ 30 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 31 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp5 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy

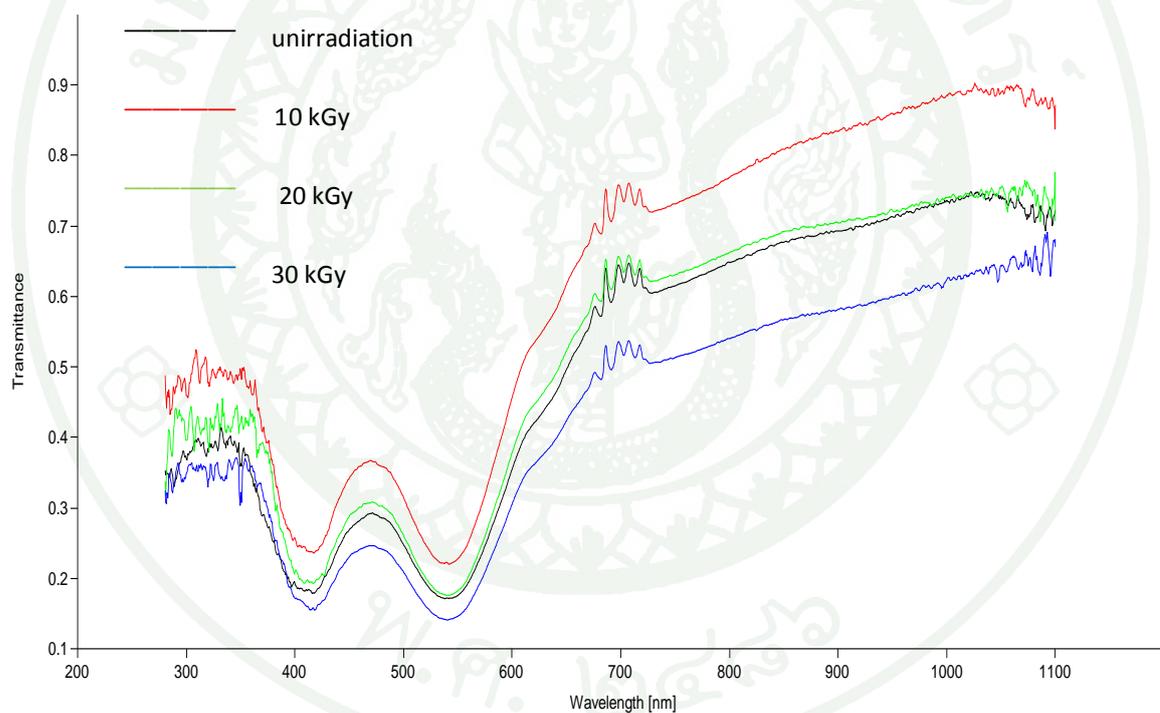


(a)

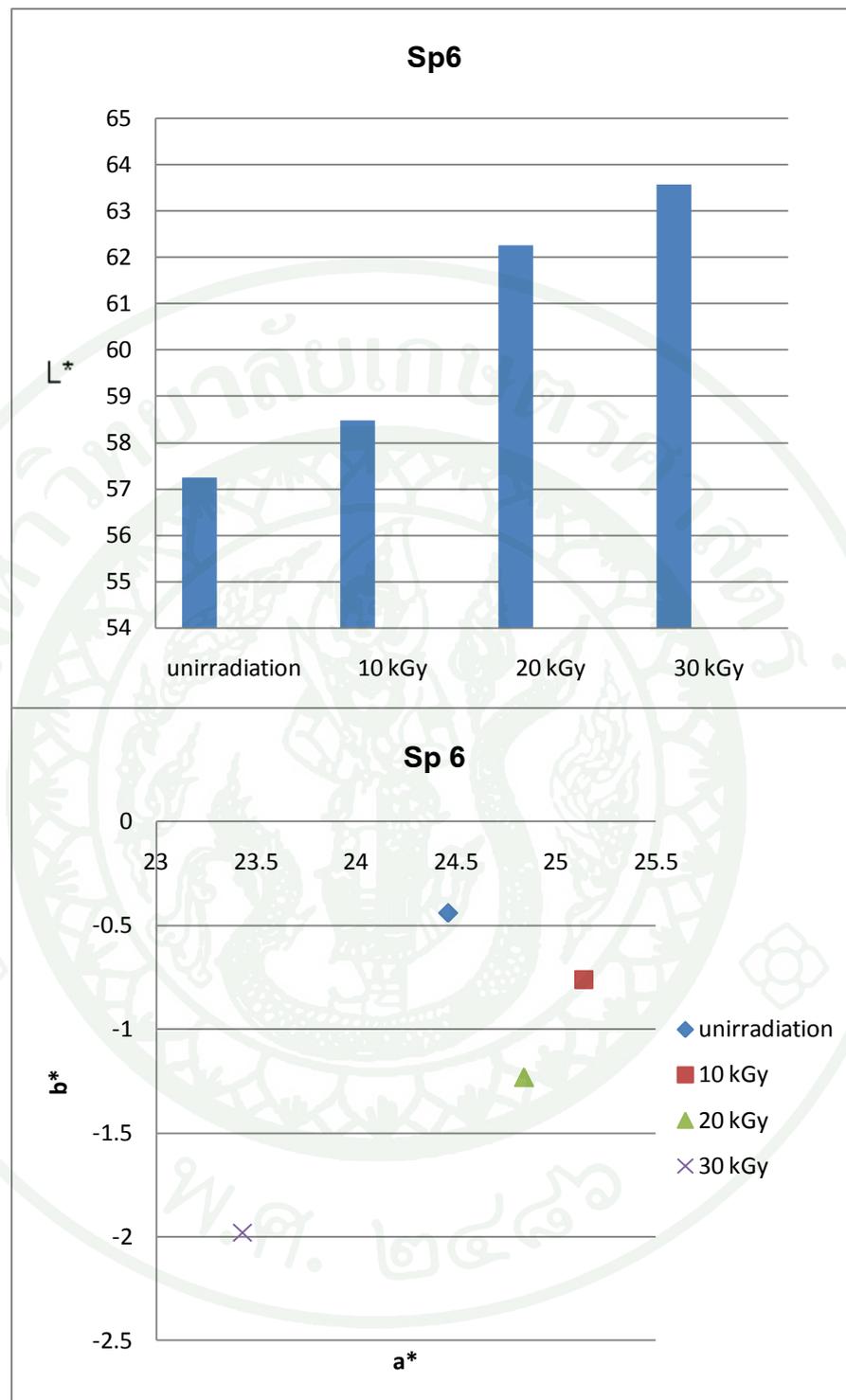


(b)

ภาพที่ 32 สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp6



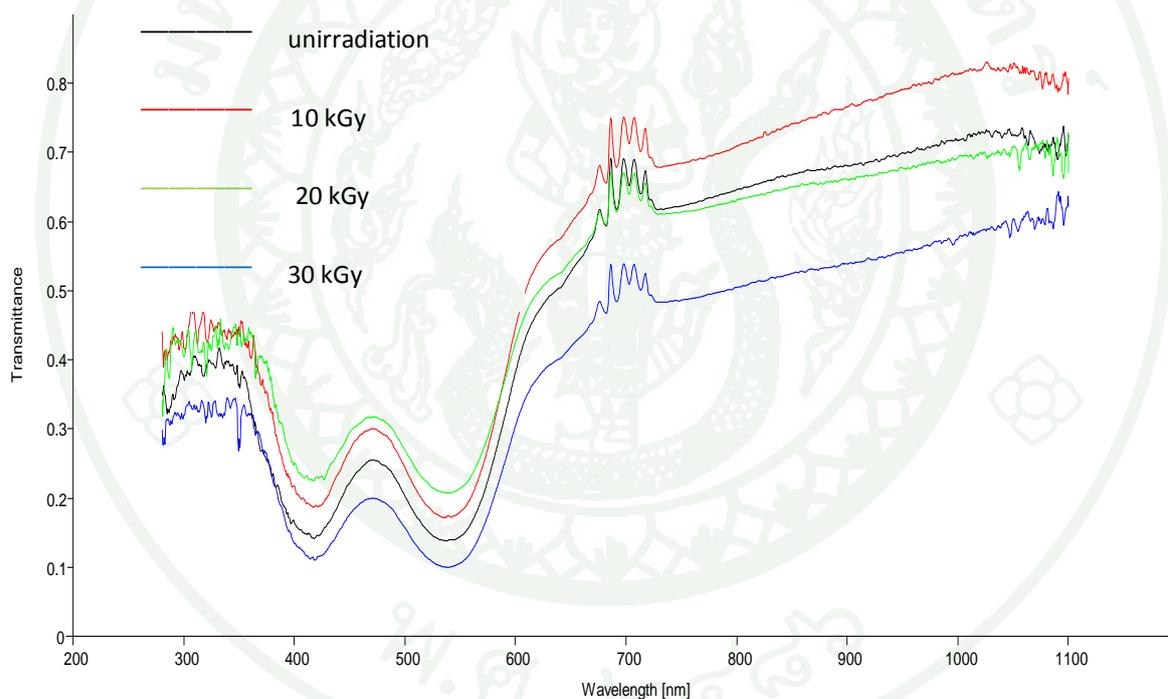
ภาพที่ 33 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



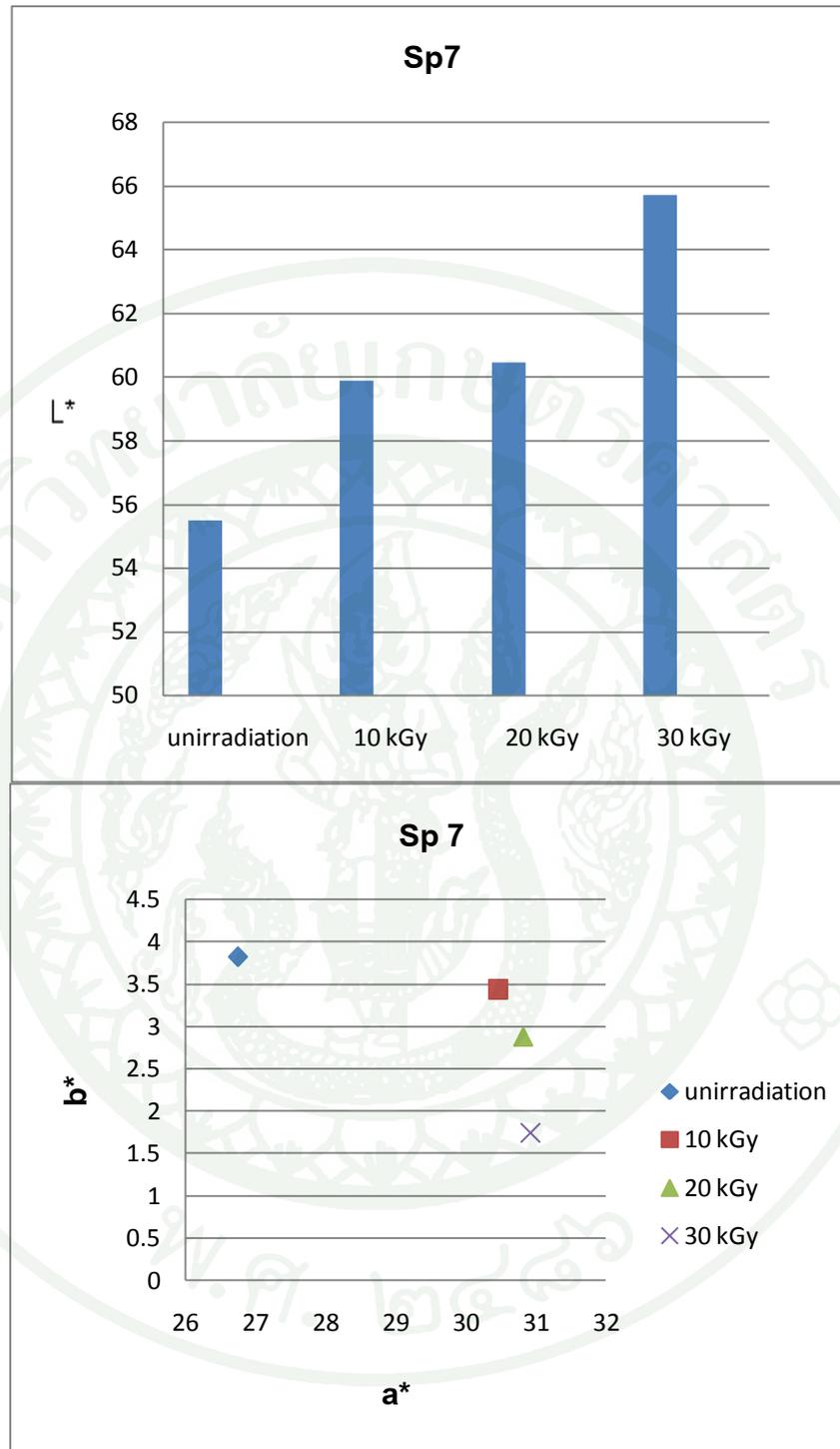
ภาพที่ 34 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp6 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



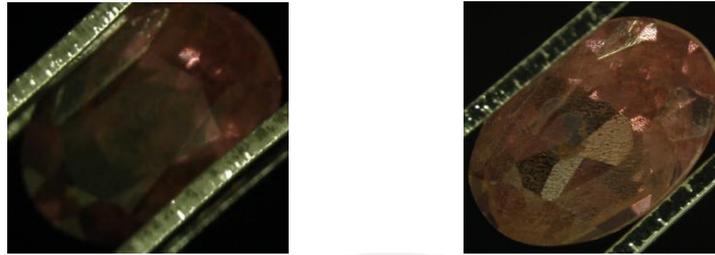
ภาพที่ 35 สปีเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp7



ภาพที่ 36 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



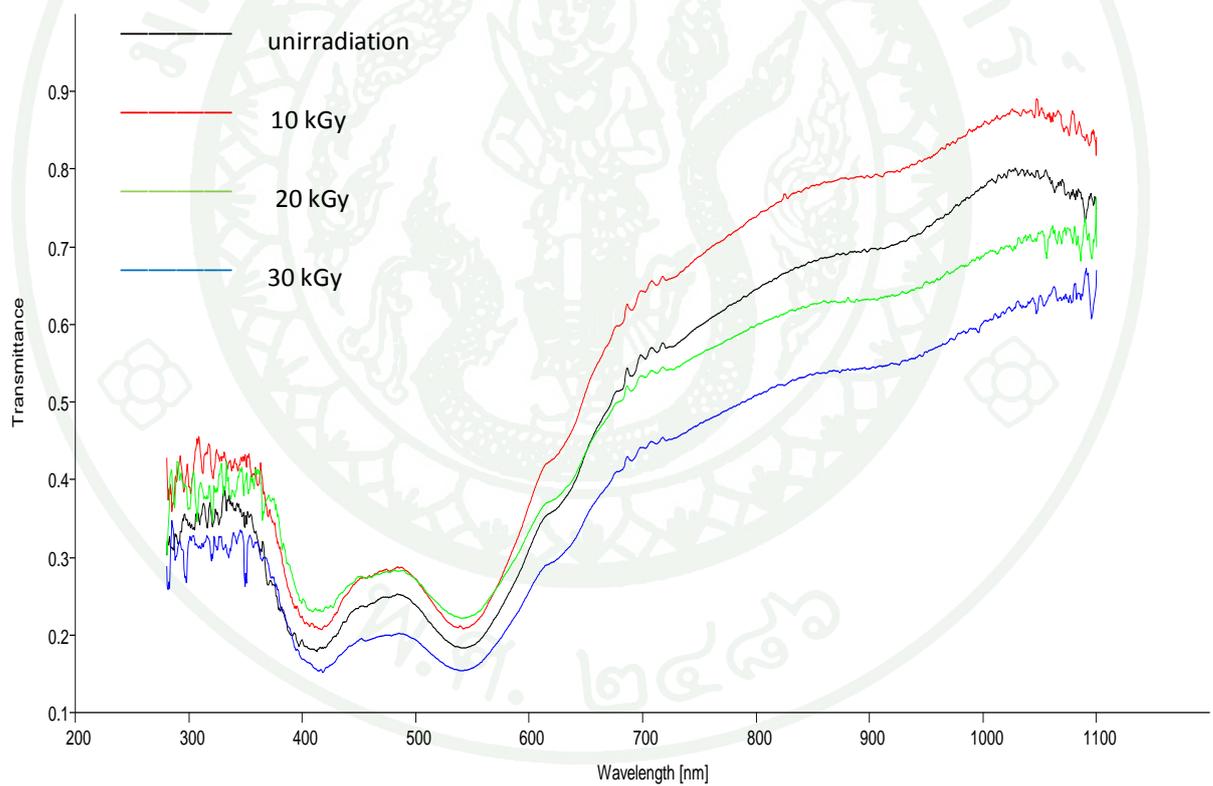
ภาพที่ 37 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp7 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



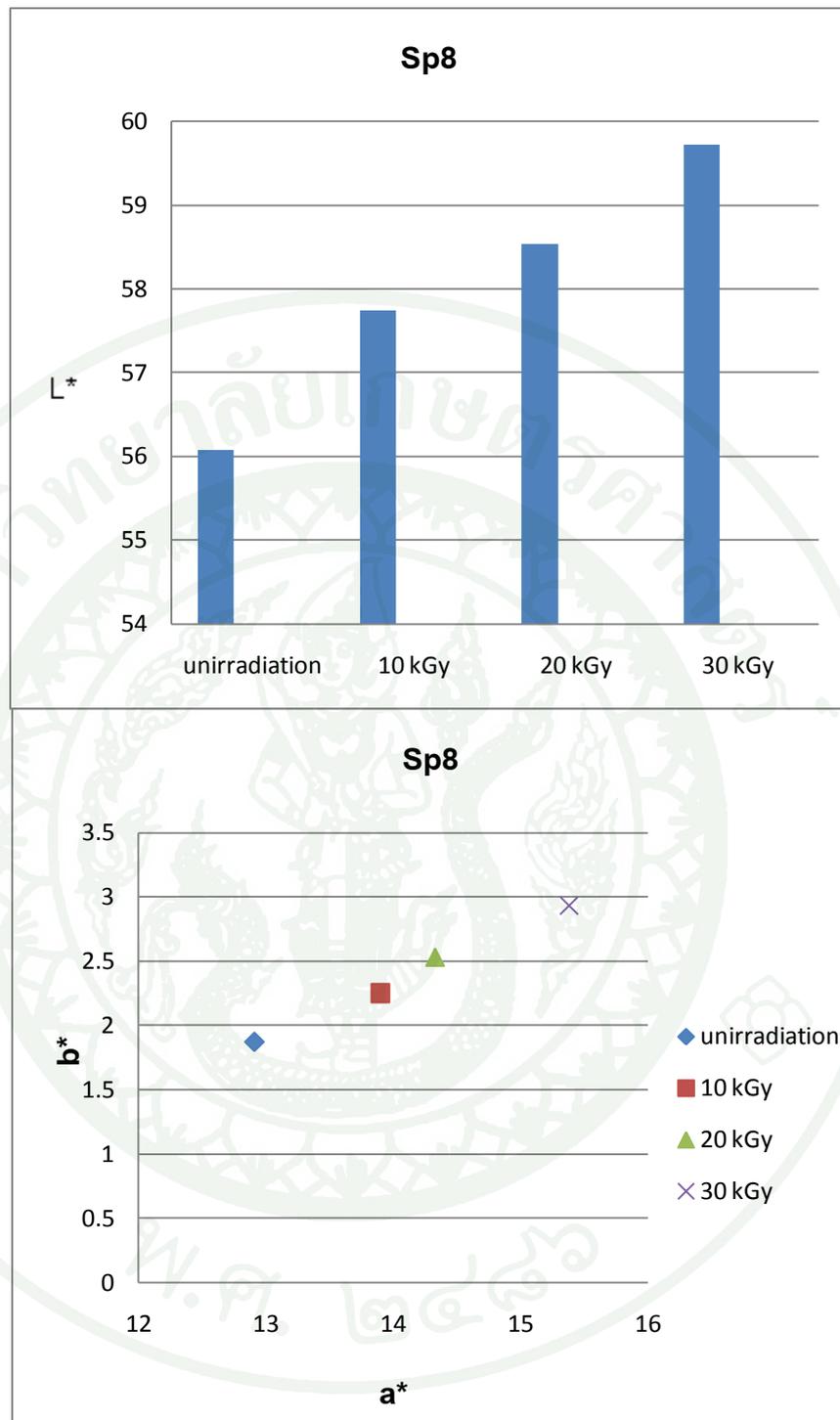
(a)

(b)

ภาพที่ 38 สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp8



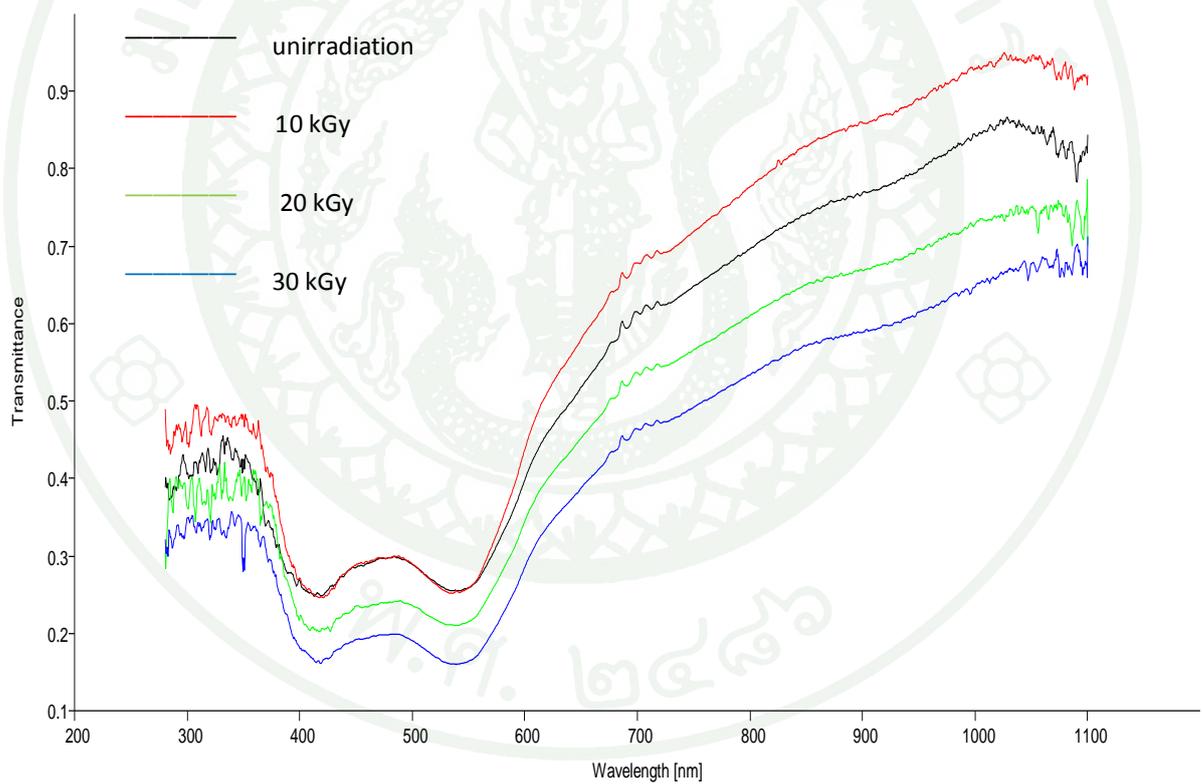
ภาพที่ 39 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



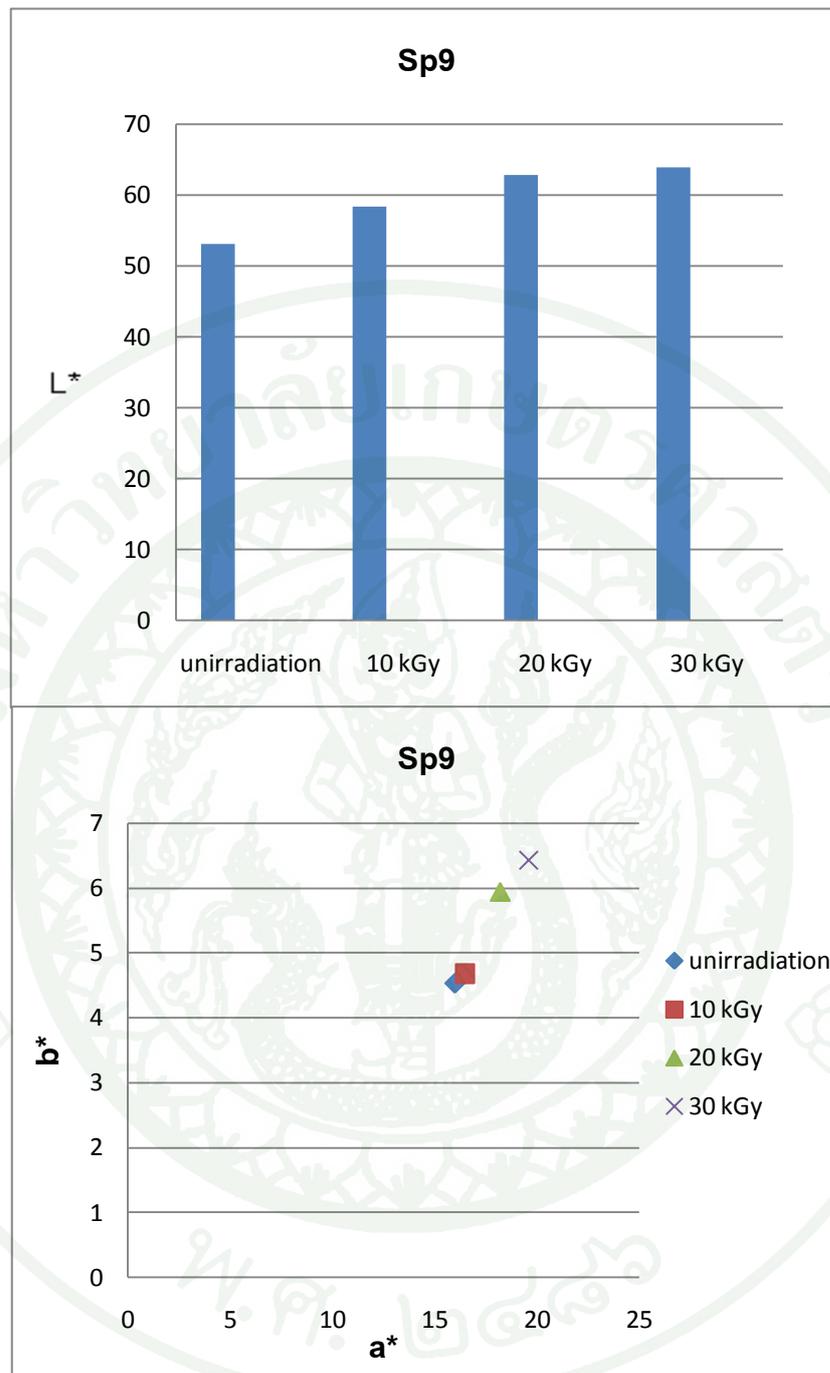
ภาพที่ 40 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L* และความสัมพันธ์ ค่า a* และ b* ของ Sp8 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



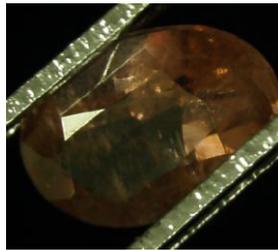
ภาพที่ 41 สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp9



ภาพที่ 42 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 43 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp9 ก่อนและหลังการอบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy

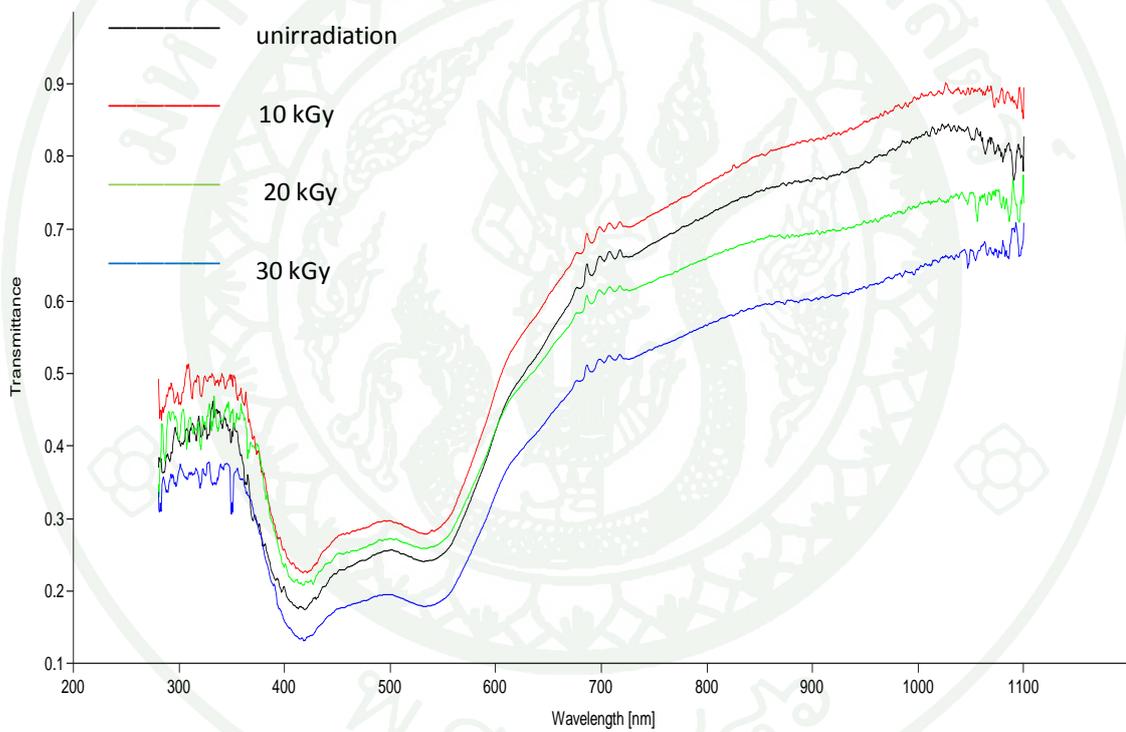


(a)

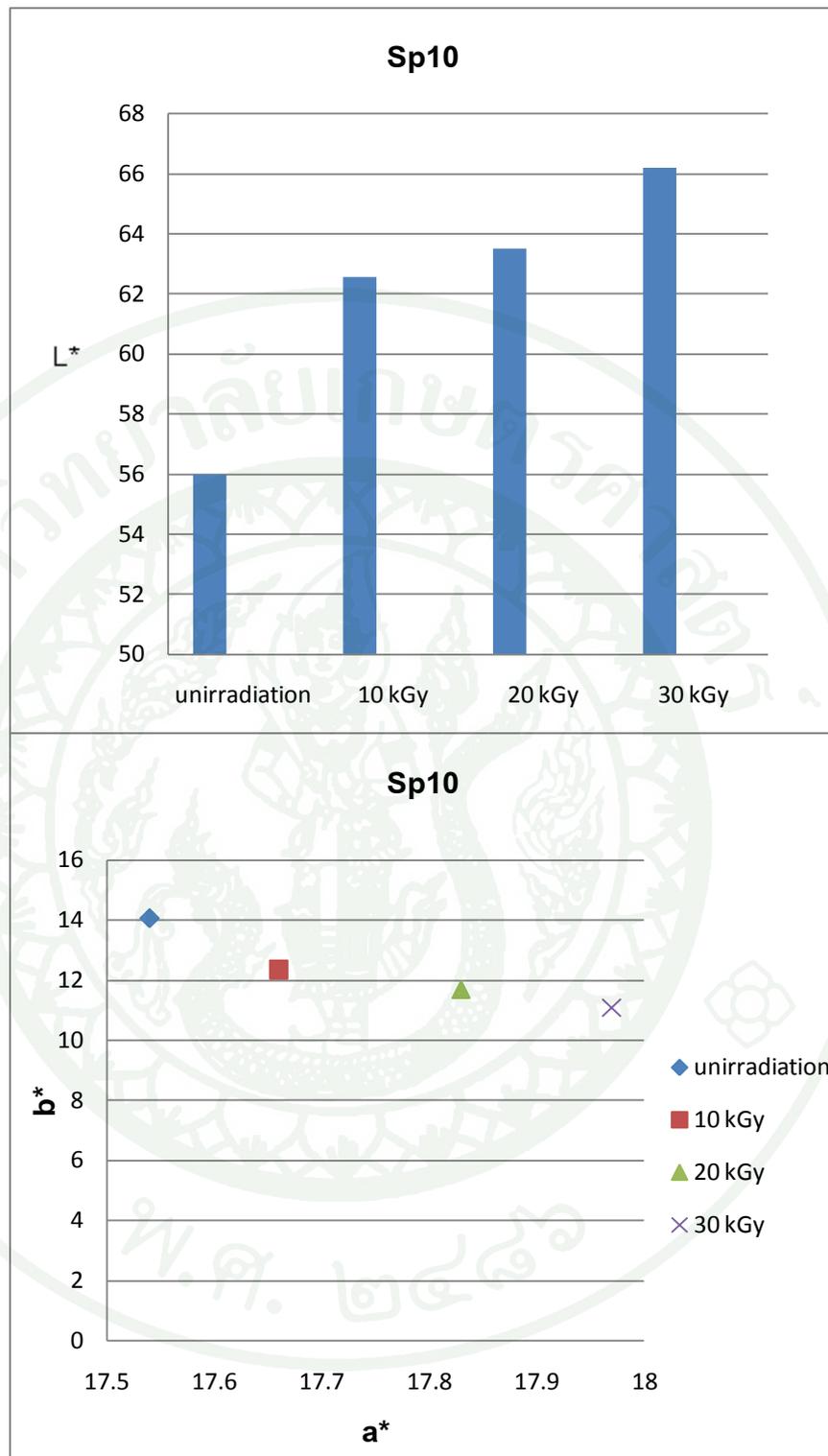


(b)

ภาพที่ 44 สปิเนลก่อนการอาบรังสีแกมมา (a) หลังการอาบรังสี (b) ของตัวอย่าง Sp10



ภาพที่ 45 สเปกตรัมเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 46 กราฟแสดงปริมาณความมืด-สว่างของสี L^* และความสัมพันธ์ ค่า a^* และ b^* ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy

วิจารณ์

ภาพที่ 17 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีแดงอมม่วง จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 18 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่บริเวณความยาวคลื่น 420 nm, 546 nm และ 695 nm โดยที่ช่วงการดูดกลืนที่ 420 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^5\text{E} \longrightarrow ^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุให้สีน้ำเงินจาก Fe^{2+} ลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 546 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงน้อยมากเกือบคงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีแดงลดลงน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของสีน้ำเงินจึงทำให้ Sp1 สปีเนล เปลี่ยนจากสีแดงอมม่วงเป็นสีแดง และช่วงการดูดกลืนที่ 659 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงการปรากฏการณ์เรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

จากภาพที่ 20 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีม่วงชมพู จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 21 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 422 nm, 458 nm และ 554 nm โดยที่ช่วงการดูดกลืนของ 422 nm, 458 เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^5\text{E} \longrightarrow ^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุให้สีน้ำเงินจาก Fe^{2+} ลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 554 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงน้อยมากเกือบคงที่ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีแดงลดลงน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของสีน้ำเงินจึงทำให้ Sp1 สปีเนล เปลี่ยนจากสีม่วง-ชมพูเป็นสีชมพู-ม่วง และช่วงการดูดกลืนที่ 659 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงการปรากฏการณ์เรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

จากภาพที่ 23 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีม่วงชมพู จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 24 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 410 nm, 459 nm และ 549 nm โดยที่ช่วงการ

ดูดกลืนของ 410 nm, 459 เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^5\text{E} \rightarrow ^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุให้สีน้ำเงินจาก Fe^{2+} ลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 549 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^4\text{A}_{2g} \rightarrow ^4\text{T}_{2g}$ ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} และ Cr^{3+} ทำให้ Sp1 สปีเนล เปลี่ยนจากสีม่วง-ชมพูเป็นสีชมพู-ม่วง และช่วงการดูดกลืนที่ 659 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การเรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

จากภาพที่ 26 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีม่วงชมพู จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 27 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 578 nm และ 690 nm โดยที่ช่วงการดูดกลืนที่ 578 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^5\text{E} \rightarrow ^3\text{T}_1$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุให้สีน้ำเงินจาก Fe^{2+} ลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 690 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} เพิ่มขึ้น เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก สถานะกระตุ้น $^2\text{E}_g \rightarrow ^4\text{A}_{2g}$ (สถานะพื้น) ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} และการเพิ่มขึ้นของ Cr^{3+} ทำให้ Sp1 สปีเนลเปลี่ยนจากสีเข้มมืดเป็นสีแดงเข้มและมีโทนสว่างขึ้น

จากภาพที่ 29 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีชมพู-ส้ม จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 30 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 410 nm, 534 nm, 649 nm และ 696 nm โดยที่ช่วงการดูดกลืนของ 410 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก $^5\text{E} \rightarrow ^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ในขณะเดียวกัน ช่วงการดูดกลืนที่ 649 nm ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้น โดยธาตุ Fe^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีเหลืองในสปีเนล

และช่วงการดูดกลืนที่ 534 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงเล็กน้อย เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}$ ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} และการเพิ่มขึ้นของ Fe^{3+} ทำให้ Sp5 สปีเนล เปลี่ยนจากสีชมพู ส้มเป็นสีส้มชมพู

จากภาพที่ 32 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีชมพูม่วง จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 33 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 417 nm, 538 nm, 640 และ 699 nm โดยที่ช่วงการดูดกลืนของ 417 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^5\text{E} \rightarrow {}^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ในขณะเดียวกัน ช่วงการดูดกลืนที่ 640 nm ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้น โดยธาตุ Fe^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีเหลืองในสปีเนล

และช่วงการดูดกลืนที่ 538 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}$ ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} และ Cr^{3+} ทำให้ Sp6 สปีเนล เป็นสาเหตุทำให้สีอ่อนลงจากเดิมที่ยังไม่ได้ทำการฉายรังสี และช่วงการดูดกลืนที่ 699 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การเรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

จากภาพที่ 35 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีชมพูม่วง จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 36 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 417 nm, 540 nm และ 676 nm โดยช่วงการดูดกลืน 417 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^5\text{E} \rightarrow {}^3\text{E}$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีน้ำเงินในสปีเนลลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 540 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงน้อยมาก เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}$ เป็นสาเหตุทำให้สีแดงในสปีเนลลดลงน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} ทำให้ Sp7 สปีเนล เปลี่ยนจากสีชมพู ม่วงเป็นสีชมพู และช่วงการดูดกลืนที่ 699 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง

(organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การเรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

จากภาพที่ 38 และ 41 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีชมพูม่วง จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 39 และ 42 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 417 nm, 541 nm และ 695 nm โดยช่วงการดูดกลืน 417 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนล และช่วงการดูดกลืนที่ 643 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ซึ่งเป็นธาตุที่ให้สีเหลืองในสปีเนลเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy พบว่าปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^5E \rightarrow {}^3E$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สีน้ำเงินในสปีเนลลดลง

และช่วงการดูดกลืนที่ 541 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงน้อยมาก เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g}$ เป็นสาเหตุทำให้สีแดงในสปีเนลลดลงน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} ทำให้ Sp8, Sp9 สปีเนล เปลี่ยนจากสีม่วงชมพูเป็นสีชมพูม่วง และช่วงการดูดกลืนที่ 695 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การเรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล

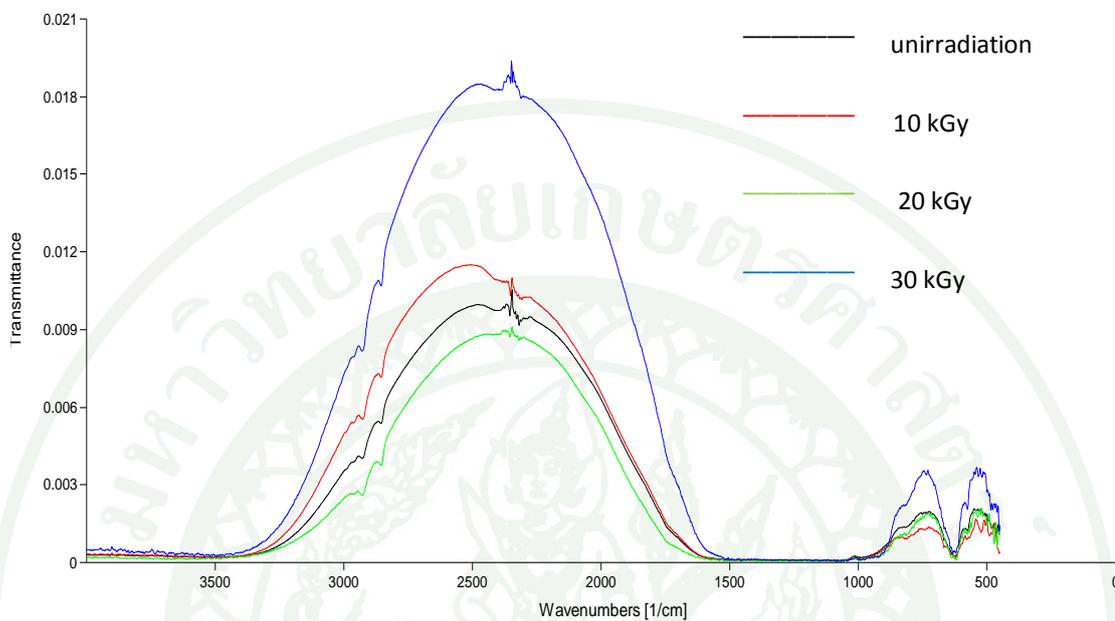
จากภาพที่ 44 เป็นสปีเนลธรรมชาติสีม่วงส้ม จากกราฟ UV-Vis-NIR ดังภาพที่ 45 พบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 417 nm, 576 nm และ 676 nm โดยการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 417 nm เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} โดยธาตุ Fe^{2+} เป็นธาตุที่ให้สีน้ำเงินในสปีเนลเมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ปริมาณการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^5E \rightarrow {}^3E$ ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ในขณะเดียวกัน ช่วงการดูดกลืนที่ 649 nm ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} มีการดูดกลืนเพิ่มขึ้น โดยธาตุ Fe^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีเหลืองในสปีเนล

และช่วงการดูดกลืนที่ 576 nm เป็นตำแหน่งแสดงการดูดกลืนของ Cr^{3+} โดยธาตุ Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่าปริมาณการดูดกลืนของ Cr^{3+} ลดลงเล็กน้อย เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4A_{2g} \rightarrow {}^4T_{2g}$ ดังนั้นการลดลงของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ทำให้ Sp10 สปีเนล เปลี่ยนจากสีม่วงส้มเป็นสีส้ม และช่วงการดูดกลืนที่

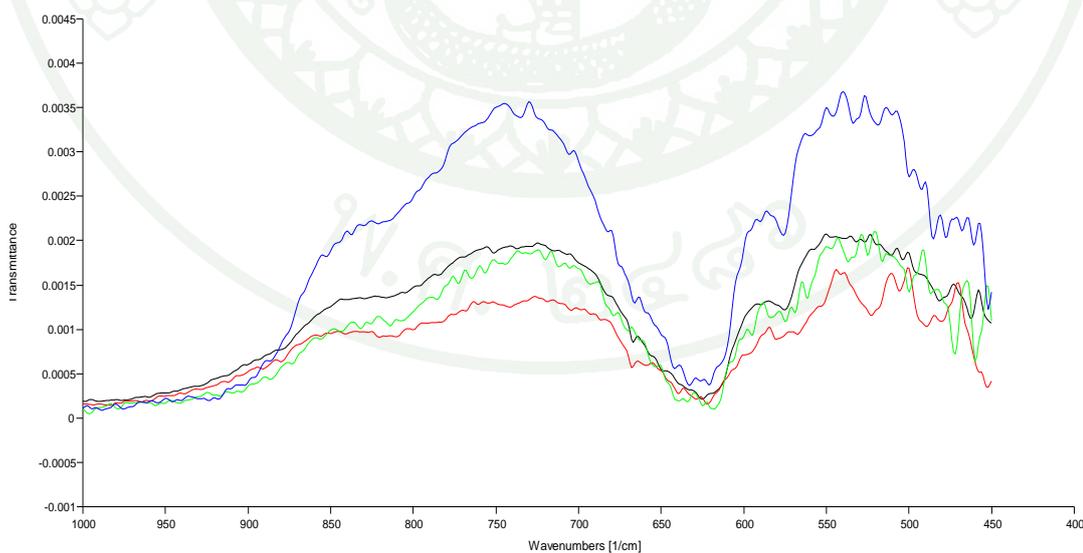
676 nm ลักษณะของเส้นการดูดกลืนเหมือนคลื่นเสียง (organ pipe effect) ซึ่งเป็นตำแหน่งการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์การเรืองแสง (bright fluorescence) ในสปีเนล



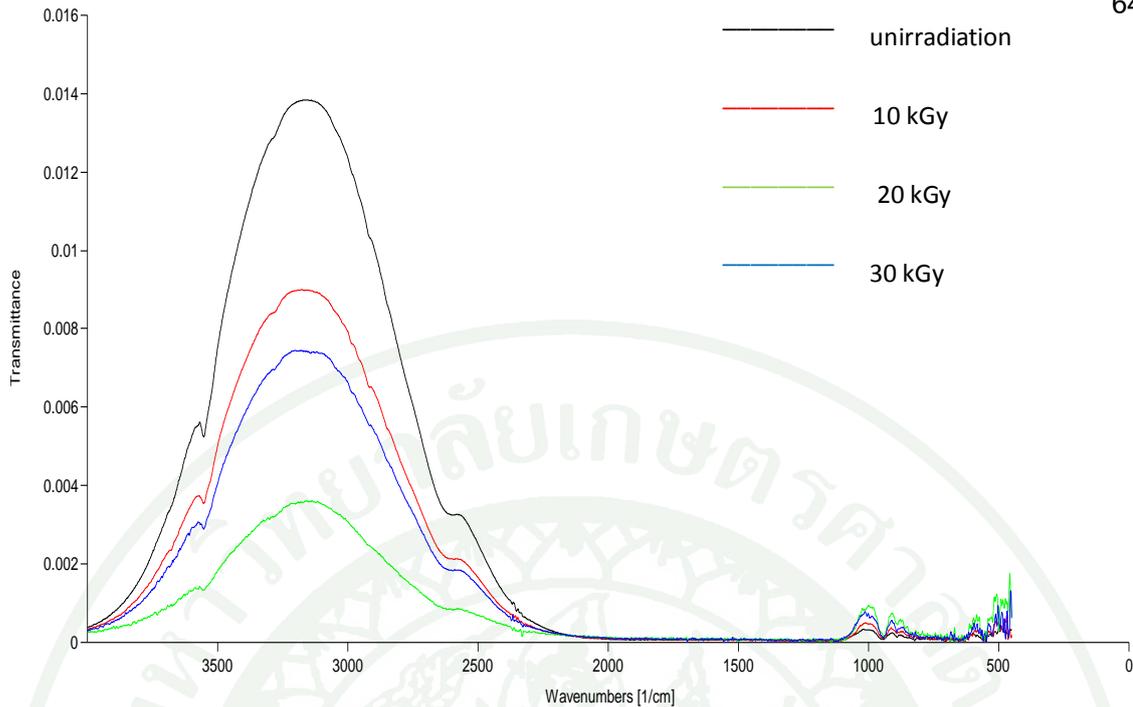
ผลจากการทดลองด้วยเครื่อง FT-IR Spectrometer



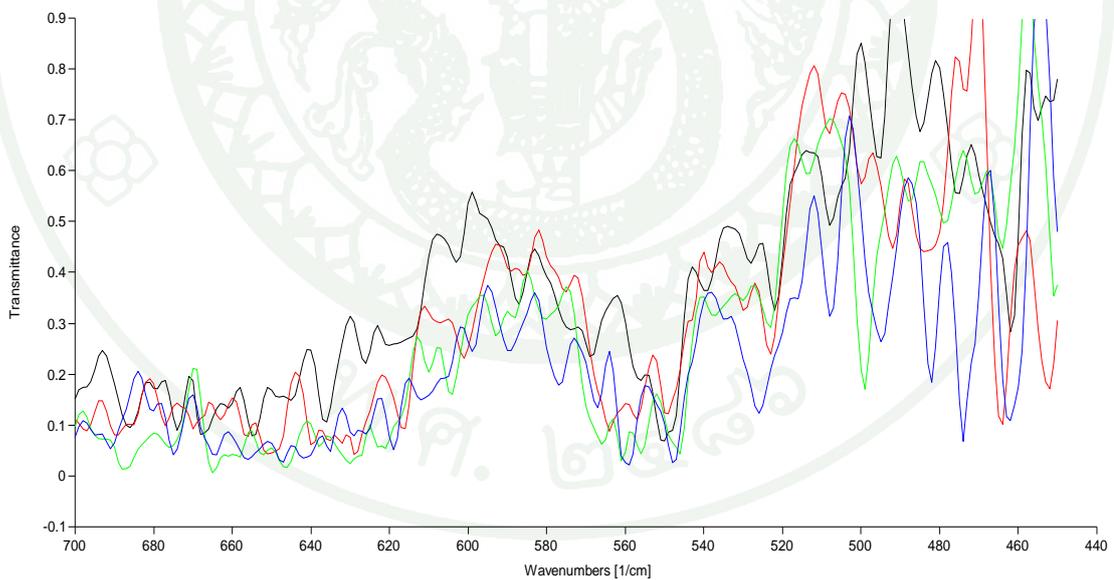
ภาพที่ 47 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



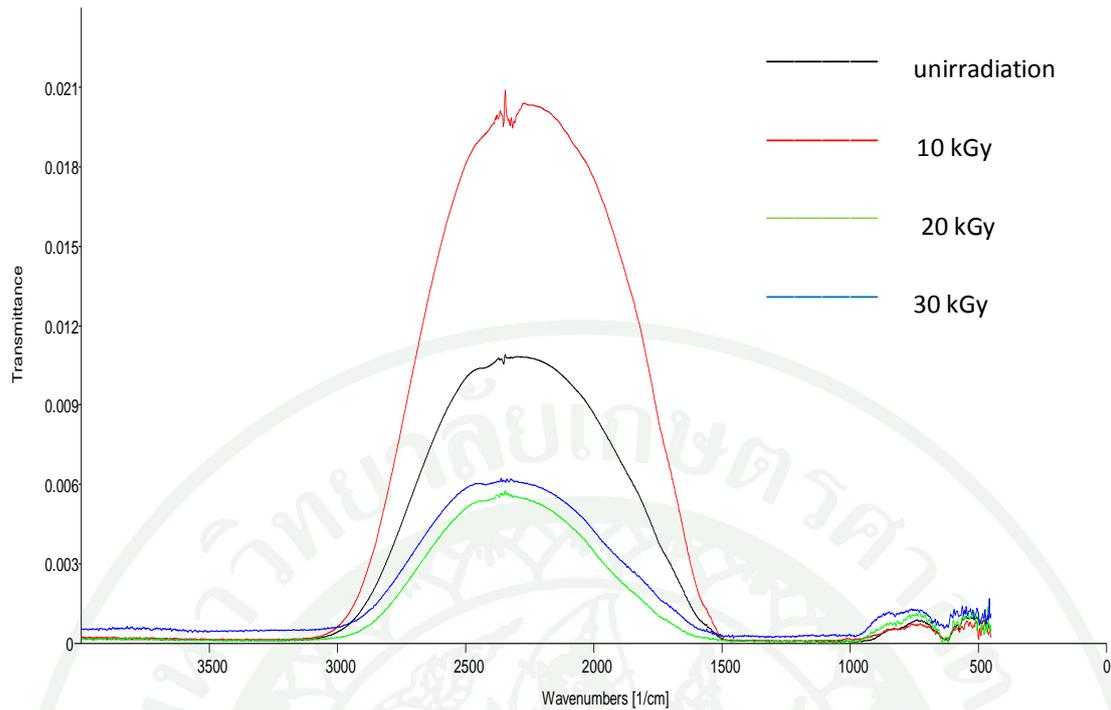
ภาพที่ 48 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp1 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



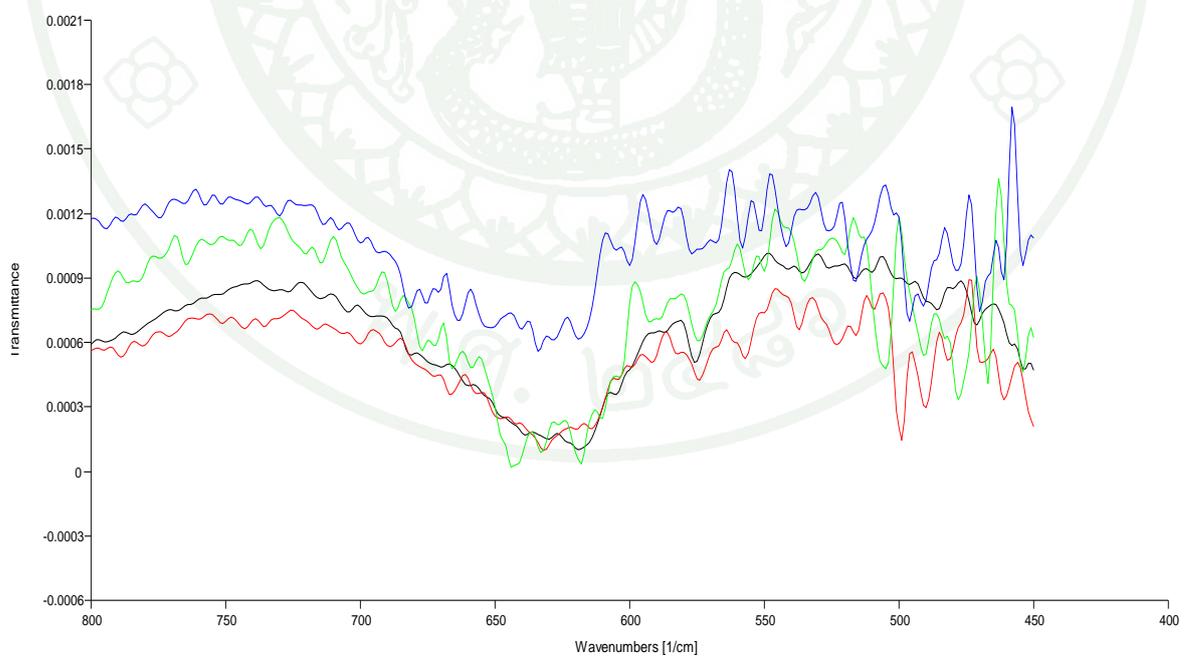
ภาพที่ 49 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



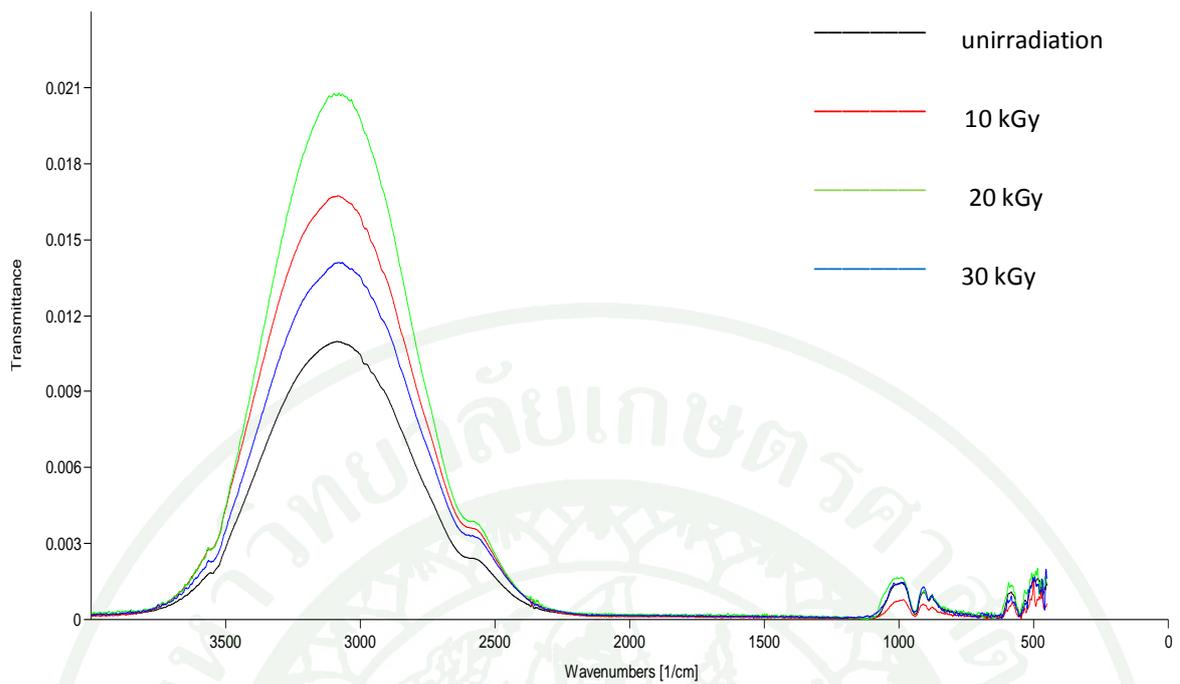
ภาพที่ 50 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp2 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



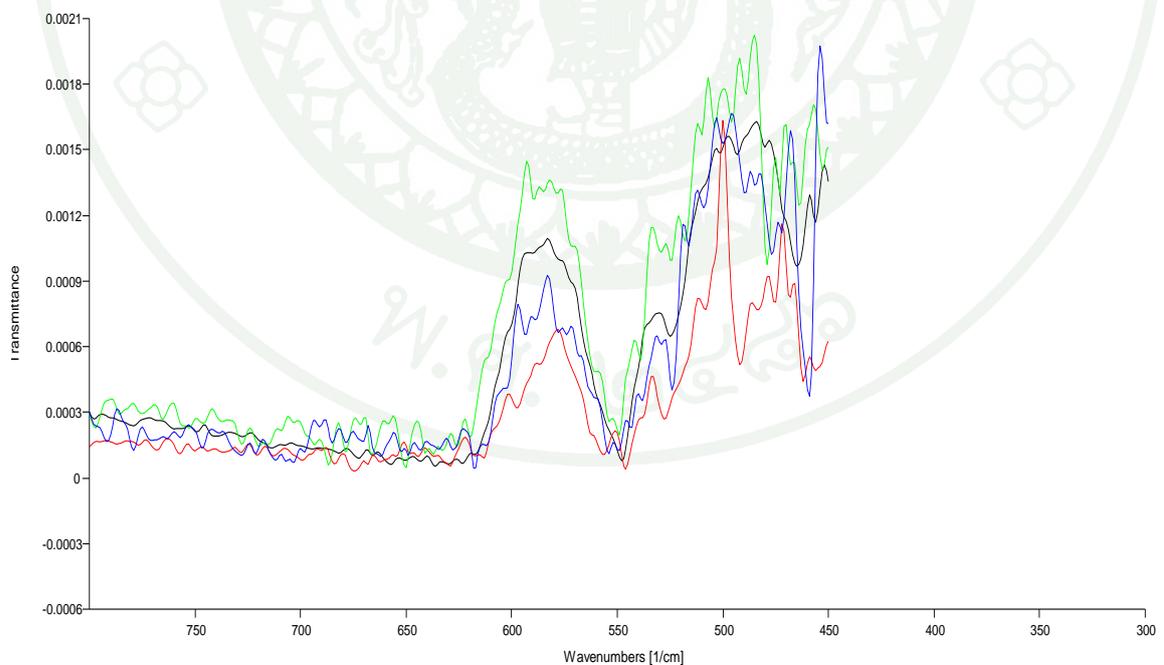
ภาพที่ 51 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



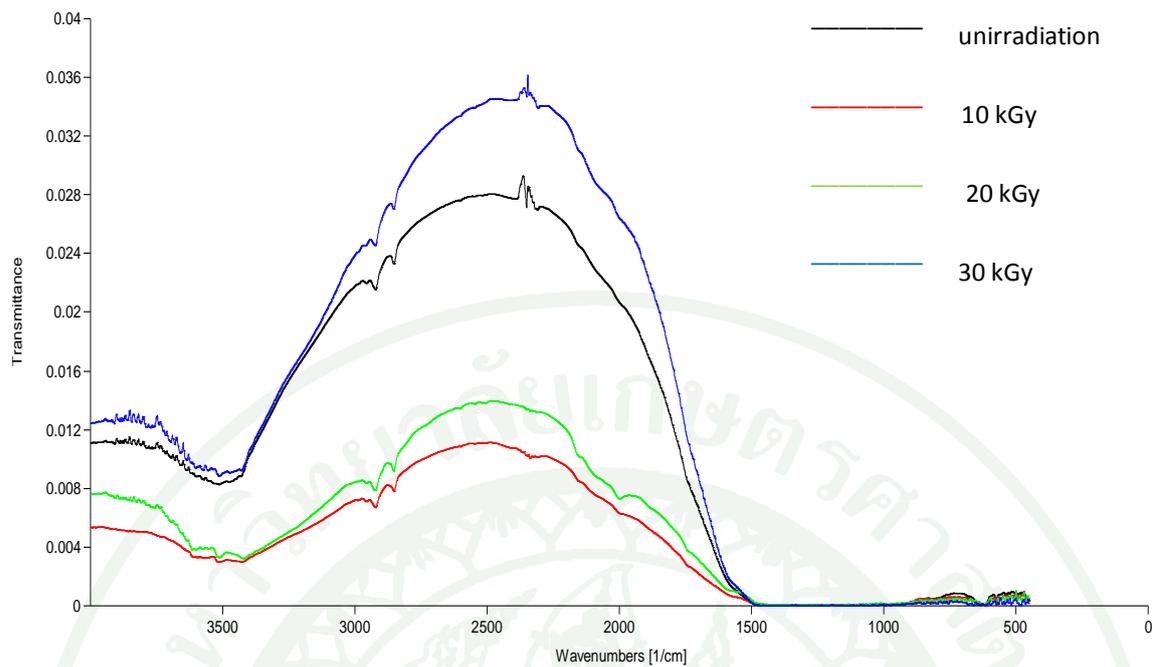
ภาพที่ 52 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp3 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



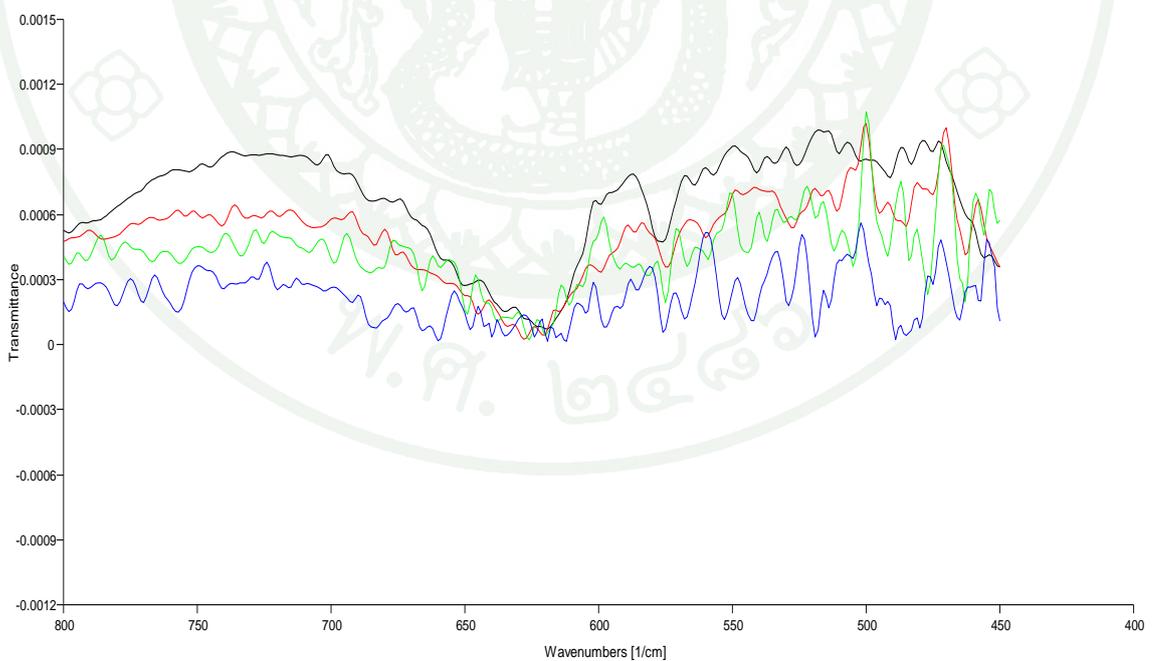
ภาพที่ 53 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



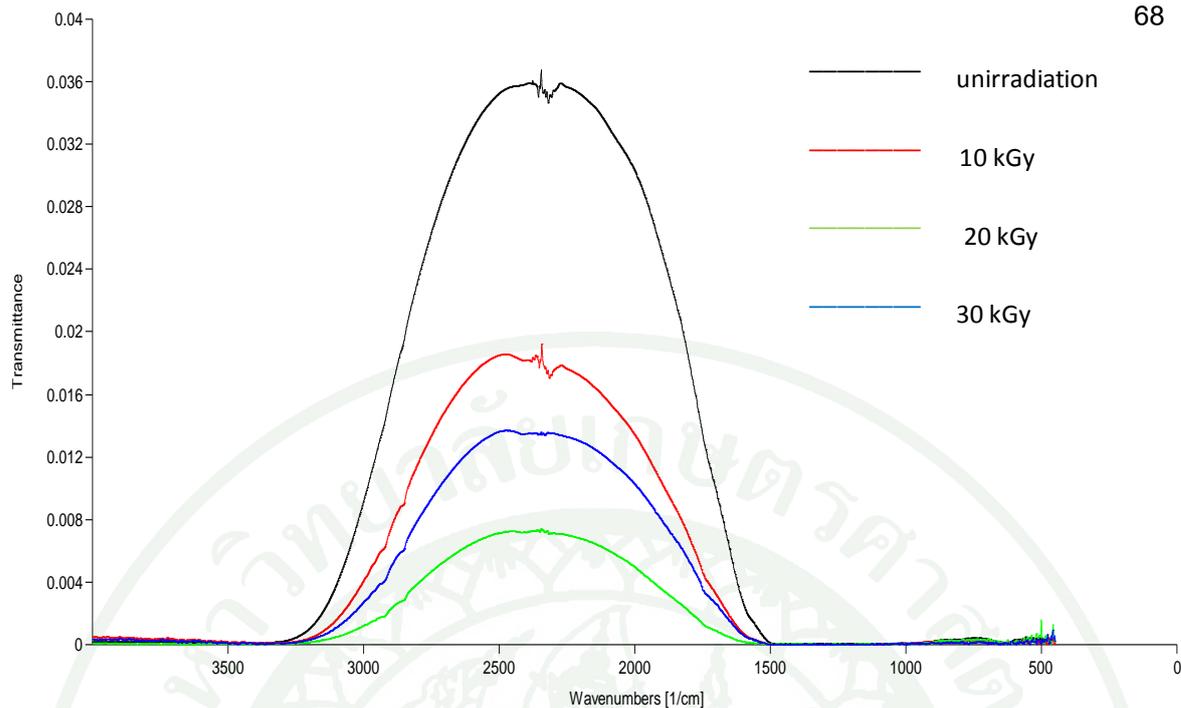
ภาพที่ 54 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp4 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



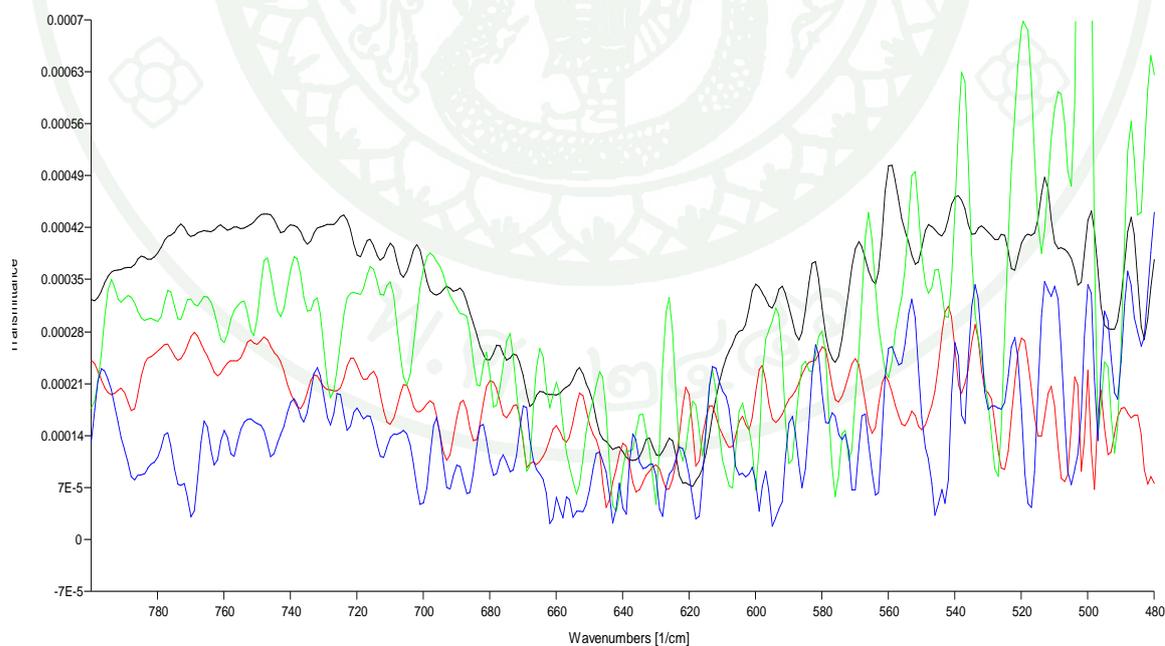
ภาพที่ 55 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



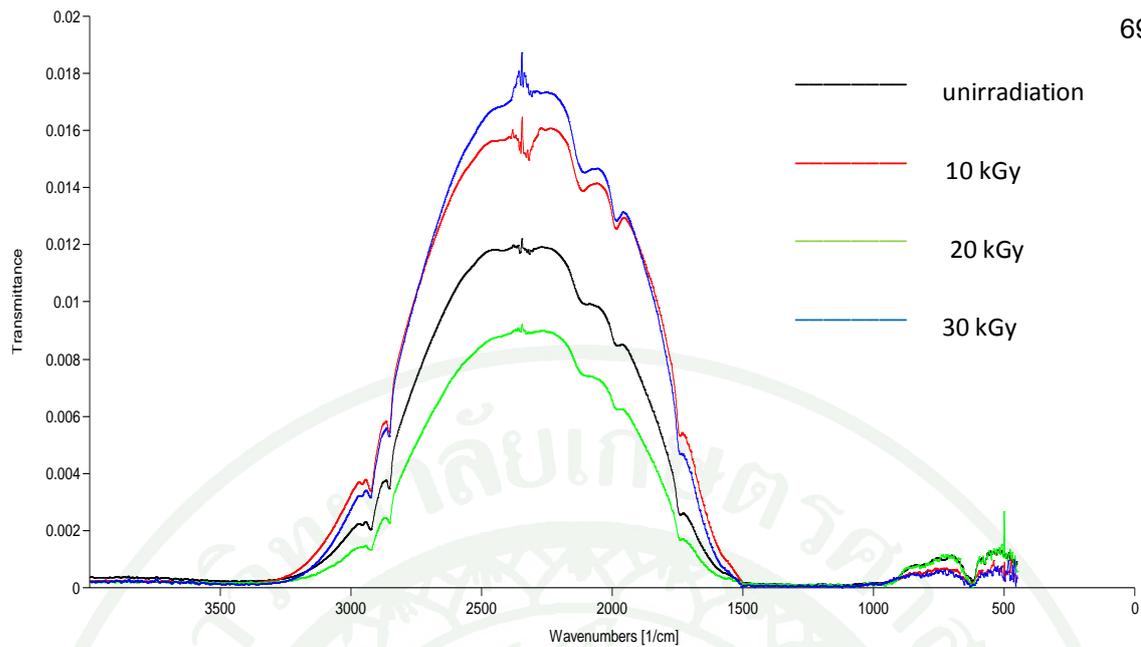
ภาพที่ 56 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp5 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 57 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



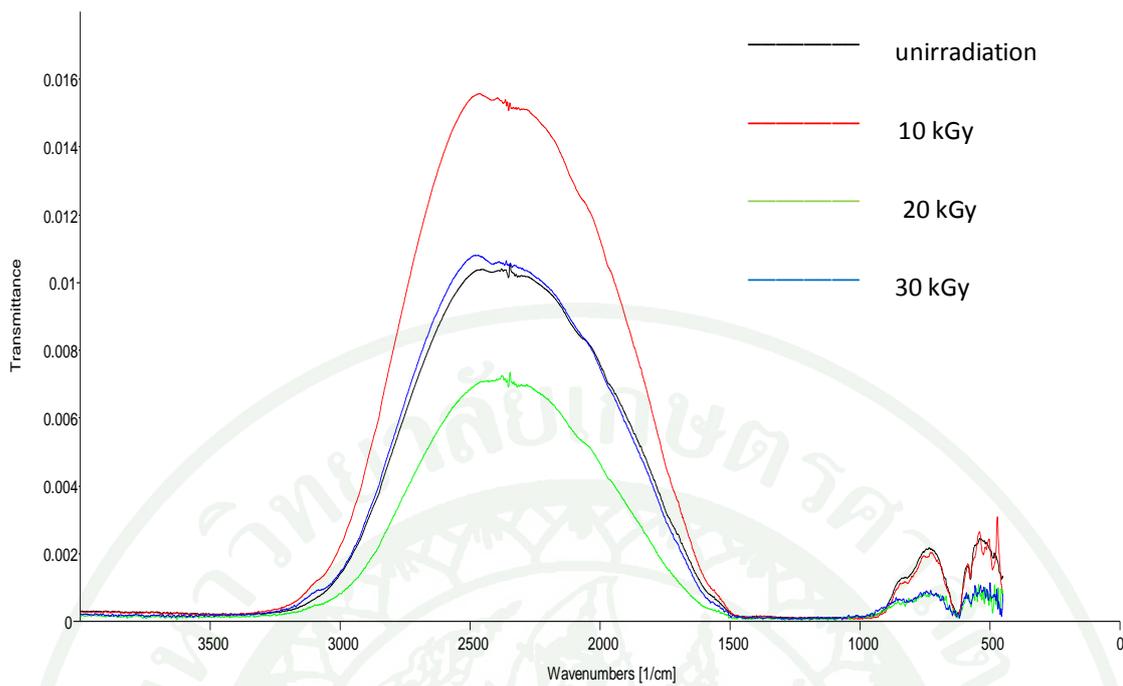
ภาพที่ 58 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp6 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



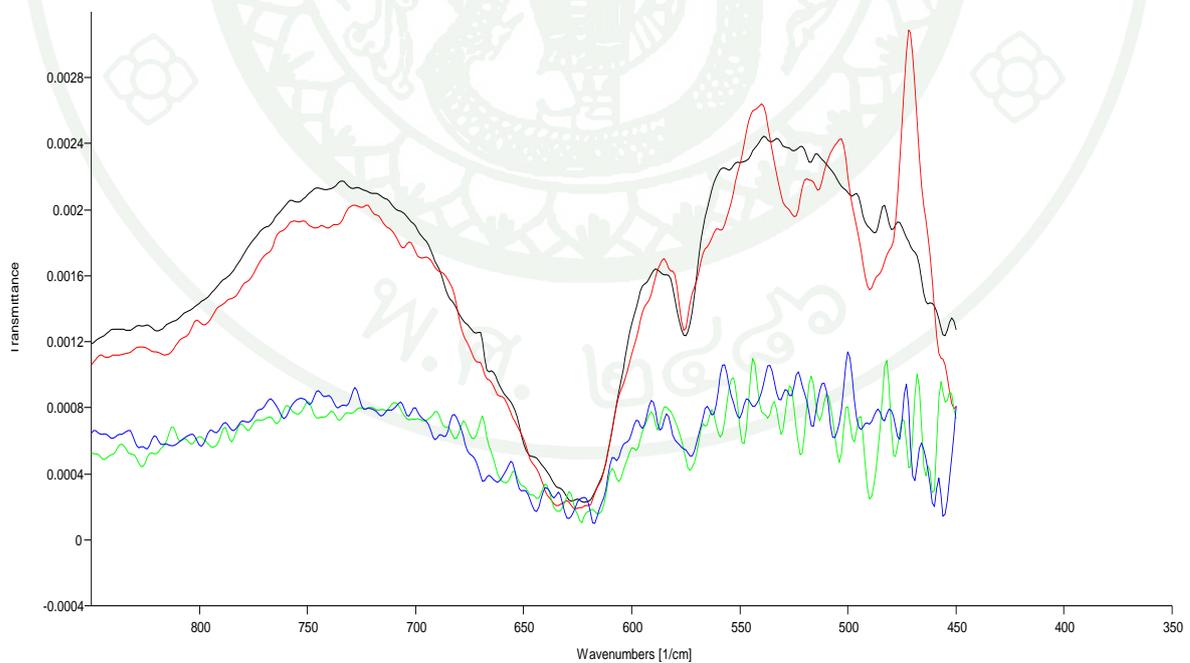
ภาพที่ 59 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



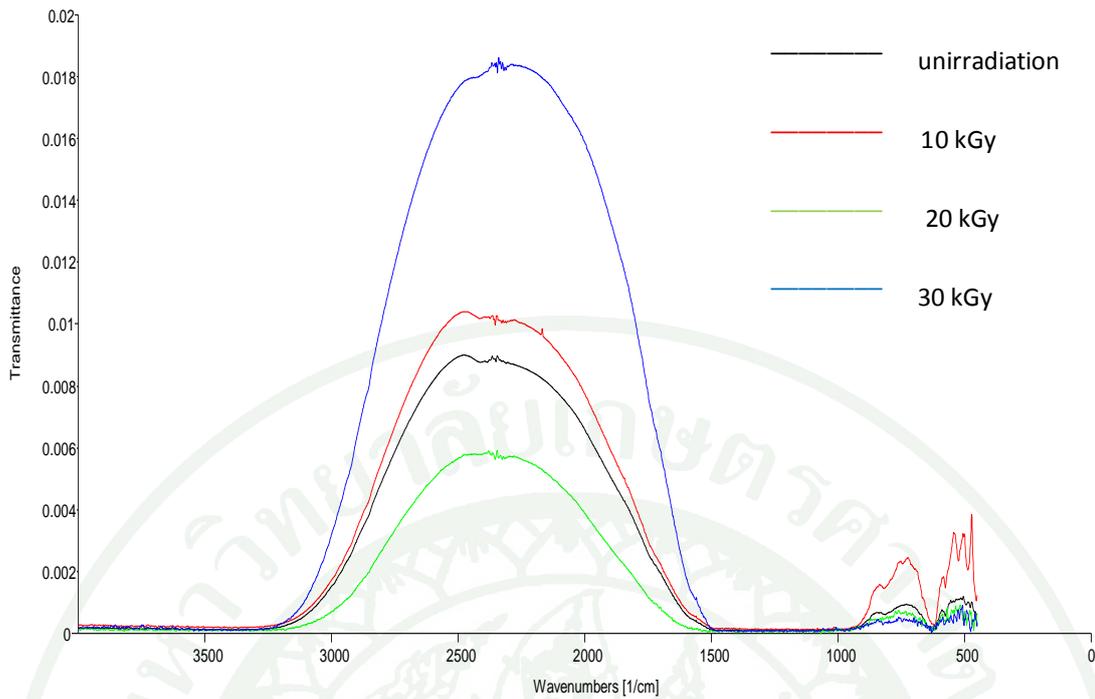
ภาพที่ 60 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp7 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



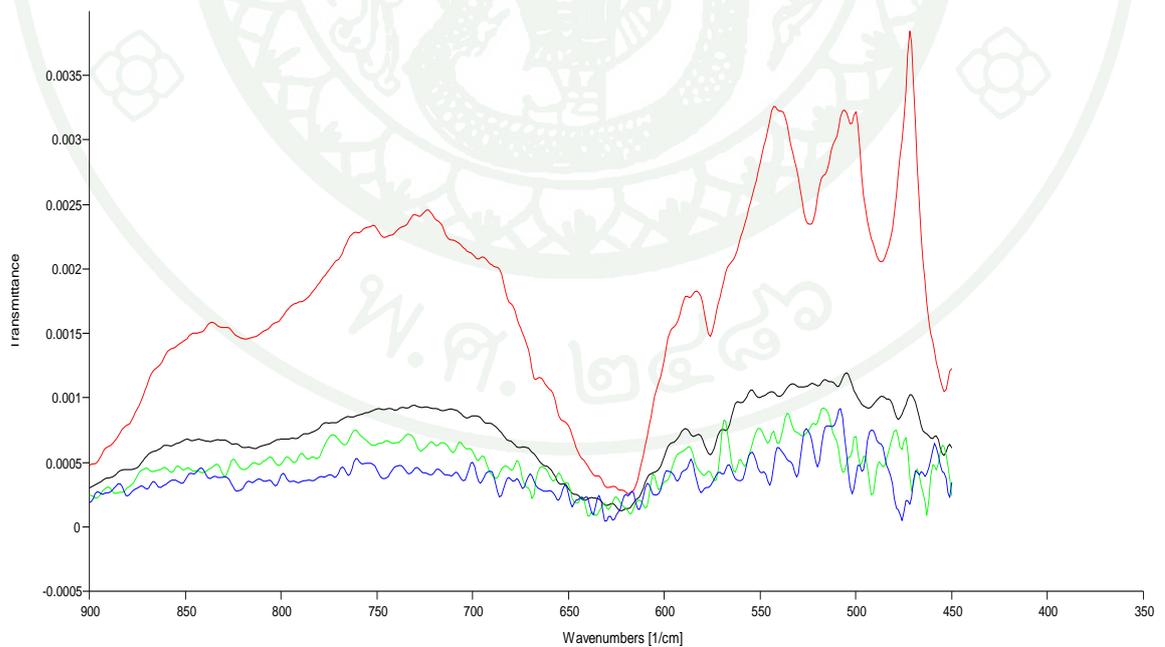
ภาพที่ 61 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



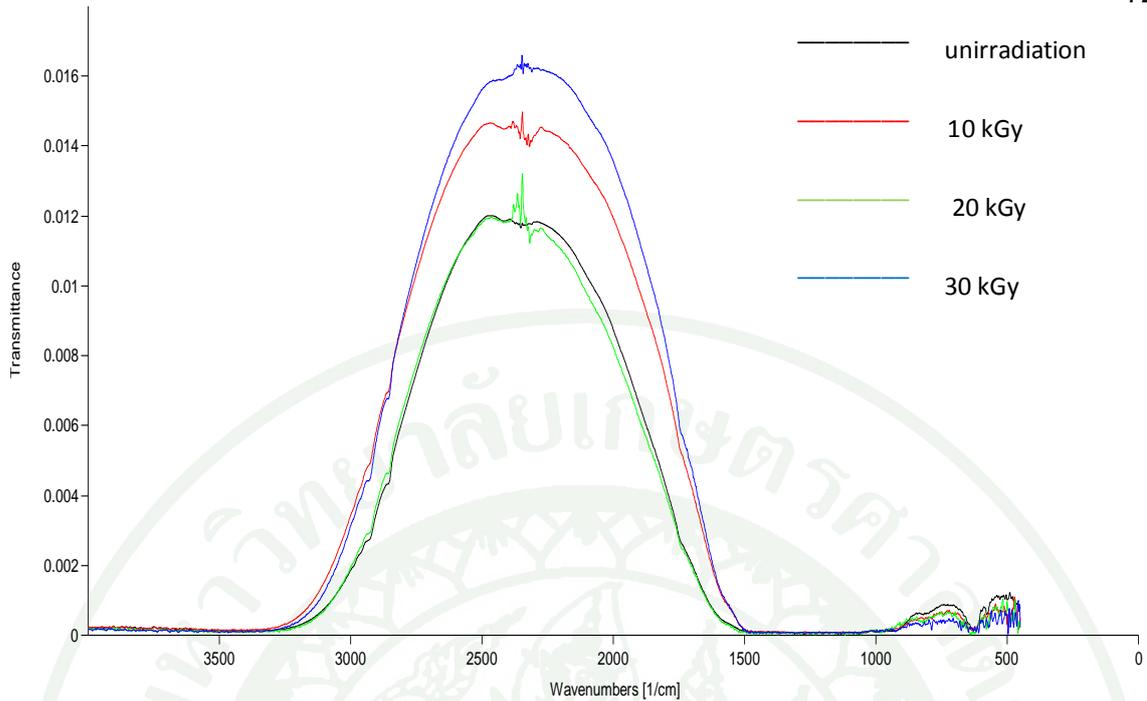
ภาพที่ 62 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp8 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



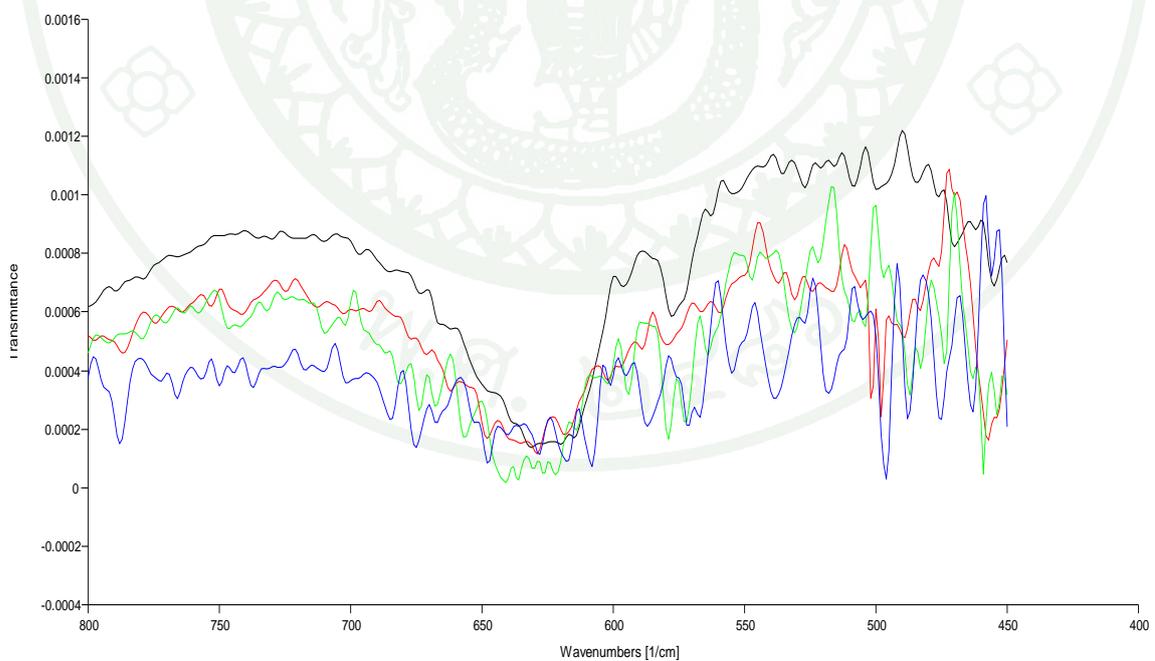
ภาพที่ 63 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 64 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp9 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 65 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy



ภาพที่ 66 สเปกตรัม FT-IR ในช่วง $1000 - 400 \text{ cm}^{-1}$ ของ Sp10 ก่อนและหลังการอาบรังสีที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy

จากการศึกษาสเปกตรัมของ FT-IR กราฟที่ได้ดังภาพที่ 47, 55, 57, 59, 61, 65 พบว่า มีพีคการดูดกลืนอยู่ 2 พีคใกล้เคียงกัน ในช่วง $3300-2500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืด-หดที่มีช่วงการดูดกลืนกว้าง ของพันธะโมเลกุล O-H และ กราฟที่ได้ดัง ภาพที่ 49, 53 พบว่า มีช่วงการดูดกลืน 2 ช่วง โดยช่วงการดูดกลืนที่เกิดในช่วง $3650-3584\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของพันธะโมเลกุล O-H และอีกหนึ่งช่วงการดูดกลืน เกิดในช่วง $3300-2500\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดที่มีช่วงการดูดกลืนกว้างของพันธะโมเลกุล O-H

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 48 พบว่า มีพีคของการดูดกลืนปรากฏอยู่ 2 พีค ในช่วง $800-400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่ง Gillota (Gillota et al., 1999) กล่าวว่า พีคที่อยู่บริเวณช่วงความถี่ที่สูงกว่าเป็นพีคที่ได้จากสั่นของพันธะโมเลกุลในบริเวณเตตระฮีดรอลไซต์ และพีคที่อยู่ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าเป็นพีคที่ได้ จากการสั่นของพันธะโมเลกุลในบริเวณออกตะฮีดรอลไซต์ โดยช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 626 cm^{-1} จะเกิดการสั่นแบบยืด -หด (stretching) ของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 574 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่ต่ำกว่ามีความสัมพันธ์กับการลดลงของแรงของพันธะ (the bond stretching force constant, K) ในขณะที่ความยาวของพันธะเพิ่มขึ้น

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 50 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 555 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 520 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่มากกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่มากกว่ามีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ แรงของพันธะ ในขณะที่ความยาวของพันธะลดลง

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 52 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 618 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่มากกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่มากกว่ามีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ แรงของพันธะ ในขณะที่ความยาวของพันธะลดลง และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 54 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 550 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 520 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่มากกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่มากกว่ามีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ แรงของพันธะ ในขณะที่ความยาวของพันธะลดลง และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 56 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 625 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 576 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่ม ปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่ต่ำกว่ามีความสัมพันธ์กับการลดลงของ แรงของพันธะ ในขณะที่ความยาวของพันธะเพิ่มขึ้น และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 58 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 618 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 20 kGy, 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 60 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 623 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่ต่ำกว่ามีความสัมพันธ์กับการลดลงของ แรงของพันธะ และยังพบว่า มีพีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 62 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 624 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด -หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน และที่ ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า ลักษณะพีคที่ได้มีการเปลี่ยนแปลง เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 64 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 622 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่ม

ปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงสเปกตรัมการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่มากกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่มากกว่ามีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ แรงของพันธะ ในขณะที่ความยาวของพันธะลดลง และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ดังภาพที่ 66 พบช่วงการดูดกลืน V_1 ที่ความยาวคลื่น 623 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+}-\text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตระฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy สเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเกิดจากความเข้มข้นของธาตุโลหะที่ลดลง และช่วงการดูดกลืน V_2 ที่ความยาวคลื่น 575 cm^{-1} เกิดการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$ ในบริเวณออกตะฮีดรอลไฮดรอกไซด์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy ช่วงการดูดกลืน V_2 เคลื่อนไปทางความถี่ที่ต่ำกว่า โดยช่วงการดูดกลืนที่เคลื่อนที่ไปทางความถี่ที่ต่ำกว่ามีความสัมพันธ์กับการลดลงของ แรงของพันธะ และที่ปริมาณรังสีดูดกลืน 30 kGy พบว่า พีค 2 พีคติดกัน เป็นพีคที่เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{3+}-\text{O}^{2-}$ กับ $\text{Cr}^{3+}-\text{O}^{2-}$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาตัวอย่างสปีเนลจากพม่า พบว่ามีธาตุมลทินที่สำคัญคือ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Cr^{3+} โดย Cr^{3+} เป็นธาตุที่ให้สีแดงในสปีเนล ซึ่งปริมาณของสีแดงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Cr^{3+} มีช่วงการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 550 nm เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4\text{A}_{2g} \rightarrow {}^4\text{T}_{2g}$ และที่ความยาวคลื่น 690 nm เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^4\text{E}_g \rightarrow {}^4\text{A}_{2g}$ สำหรับ Fe นั้นมีส่วนเกี่ยวข้องกับการให้สีน้ำเงิน (Fe^{2+}) มีช่วงการดูดกลืนที่ 418 nm, 458 nm เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจาก ${}^5\text{E} \rightarrow {}^3\text{E}$ และสีเหลือง (Fe^{3+}) มีช่วงการดูดกลืนที่ 649 nm เกิดจากการทรานซิชันระหว่าง ${}^6\text{A}_{1g} \rightarrow {}^4\text{T}_{1g}$

เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 10 kGy, 20 kGy และ 30 kGy จากการศึกษาดูการวัดการดูดกลืนแสง พบว่า ช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} ลดลง เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอน ทำให้ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ทำให้สีน้ำเงินในสปีเนลลดลง ในขณะที่สีเหลืองจากธาตุ Fe^{3+} เพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้สีของสปีเนลมีโทนสว่างมากขึ้น และการดูดกลืน Cr^{3+} คงที่ ดังนั้น สีของสปีเนลที่ปรากฏเกิดจากการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นผสมกัน (สีผสมกัน) ของธาตุทั้งสาม คือ Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Cr^{3+} โดยปริมาณของสีที่ปรากฏขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุทั้งสาม

การศึกษาดูโดยเทคนิค FT-IR พบว่า ในช่วงการดูดกลืนบริเวณ $700\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ มีช่วงการดูดกลืนปรากฏอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วง การดูดกลืนที่ตำแหน่ง $600\text{-}575\text{ cm}^{-1}$ (V_1) เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Fe}^{2+} - \text{O}^{2-}$ ที่บริเวณเตตเรฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน พบว่า ช่วง การดูด กลืน อยู่ที่ตำแหน่งเดิม แต่ปริมาณการดูดกลืนของกราฟลดลงตามความเข้มข้นของ Fe^{2+} และช่วงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง $575\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ (V_2) เกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+} - \text{O}^{2-}$ ที่บริเวณออกตะฮีดรอลไซต์ เมื่อเพิ่มปริมาณรังสีดูดกลืน ปรากฏว่ามี การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ช่วงการดูดกลืน โดย มีการเคลื่อนที่ของตำแหน่งการดูดกลืนไปทางความถี่ที่มากกว่าหรือต่ำกว่า ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงความยาวพันธะภายในนิวเคลียร์ของธาตุโลหะ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับแรงของพันธะ และยังพบช่วงการดูดกลืนเพิ่มเป็น 2 ช่วง ติดกัน เกิดจากเกิดจากการสั่นแบบยืด-หดของธาตุโลหะ $\text{Cr}^{3+} - \text{O}^{2-}$ และ $\text{Fe}^{3+} - \text{O}^{2-}$ ที่เพิ่มขึ้น จากกราฟสเปกตรัมของ FT-IR ยังพบว่า มีช่วงการดูดกลืนอยู่ 2 ช่วงใกล้ๆกัน ในช่วง $3300\text{-}2500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการสั่นแบบยืด-หดที่มีช่วงการดูดกลืนกว้าง ของพันธะโมเลกุล O-H และ

ช่วงการดูดกลืน ที่เกิดในช่วง $3650\text{-}3584\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่น แบบยืด-หดของพันธะโมเลกุล O-H

ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นความรู้เบื้องต้น เพื่อสร้างความเข้าใจต่อกระบวนการเกิดและการเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะของสปีเนลได้ เพื่อให้เกิดองค์ความรู้ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น อาจต้องมีการปรับปรุงหรือพัฒนาวิธีการทดลองให้ดียิ่งขึ้น เช่นการใช้ตัวอย่างเป็นจำนวนมาก เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ เป็นตัวอย่างธรรมชาติ จึงไม่สามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ ได้เหมือนตัวอย่างสังเคราะห์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ชัดเจนควรใช้ตัวอย่างที่หลากหลาย หรืออาจใช้เทคนิคอื่นเพิ่มเติม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Anderson, B. W. (1971). **Gem Testing**, 8th edition. London.
- Ayana, T., T. Sato, K. Tanaka, Y. Kawabe, M. Shirai, K. Tanaka and E. Hanamura. 2004. Luminescence channels of manganese-doped spinel. **Journal of Luminescence (109)**: 19-24.
- Bacorisen, D., R. Smith, B. P. Uberuaga, K.E. Sickafus, J. A. Ball and R. W. Grimes. 2006. Atomistic simulations of radiation-induced defect formation in spinels: $MgAl_2O_4$, $MgGa_2O_4$ and $MgIn_2O_4$. **Physical Review B**: 74.
- Bandourko, V., T.T. Lag, Y. Takeda, C.G. Lee and N. Kishimoto. 2001. Ion-induced photon emission of magnesium aluminate spinel during 60 keV Cu^- implantation. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**: 68-73.
- Deer, W. A., R. A. Howie and J. Zussman. 1992. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. **Prentice Hall**.
- Deren, P. J., M. Malinowski and W. Strek. 1996. Site selection spectroscopy of Cr^{3+} in $MgAl_2O_4$ green spinel. **Journal of Luminescence**: 68-91.
- Devanathan, R., N. Yu, K.E. Sickafus and M. Nastasi. 1996. Structure and mechanical properties of irradiated magnesium aluminate spinel. **Journal of Nuclear Materials (232)**: 59-64.
- Ferguson, J. and P.E. Fielding. 1997. The origins of colours of yellow, green and blue sapphires. **Chemical Physics Letters (10)**: 262-265.
- Folwer, W.B. 1996. Physics of color center. Newyork and London. **Academic Press**.
- Fritsch, E. and G.R. Rossman. 1988. An update on color in gems. **Gem & Gemology**.

- Gaffney, E.S. 1973. Spectra of tetrahedral Fe^{2+} in MgAl_2O_4 . **Physical Review B (8)**: 3484-3486.
- Garapon, C., H. Manaa and R. Moncorge. 1991. Absorption and fluorescence properties of Cr^{3+} doped nonstoichiometric green spinel. **Journal of Chemical Physics**: 5501.
- Gillota, B., J. Lorimier, F. Bernard, V. Nivoix, S. Douard and Ph. Tailhades. 1999. Thermal behavior and cation distribution in nanosized Mo-Co ferrite spinels $\text{Mo}_{0.5}\text{Co}_y\text{Fe}_{2.5-y}\text{O}_4$ ($0 \leq y \leq 1$) studied by DTG, FT-IR and DC conductivity. **Materials Chemistry and Physics (61)**: 199-206.
- Gillot, B., V. Nivoix, E. Kester, O. Nusillard, C. Villette, Ph. Tailhades and A. Rousset. 1997. Reactivity toward oxygen and cation distribution in copper-manganese ferrite spinels fine powders. **Materials Chemistry and Physics (48)**: 111-118.
- Gupta, R.P. 2006. Radiation-induced disorder in the spinel MgAl_2O_4 . **Journal of Nuclear Material (358)**: 35-39.
- Hill, R. J., J. R. Craig and G. V. Gibbs. 1979. Systematics of the spinel structure type. **Physics and Chemistry of Mineral (4)**: 317.
- Ibarra, A., F.A. Garner and G.L. Holenberg. 1995. Neutron-induced changes in optical properties of MgAl_2O_4 spinel. **Journal of Nuclear Materials (219)**: 135-138.
- Izumi, K., S. Miyazaki, S. Yoshida, T. Mizokawa and E. Hanamura. 2007. Optical properties of 3d transition-metal –doped MgAl_2O_4 spinel. **Physical Review B (76)**: 075111.
- Josyulu, O. S. and J. Sobhanadri. 1981. **Phys. Status Solidi A**: 479.

- Jouini, A. 2008. MgAl₂O₄ spinel laser crystals: pure and Ti-, Mn- or Ni-doped. **Advances in Materials Research (8)**: 203.
- Kasapoglu, N., B. Birsoz, A. Baykal, Y. Koseoglu and M.S. Toprak. 2007. Synthesis and magnetic properties of octahedral ferrite Ni_xCo_{1-x}Fe₂O₄ nanocrystals. **Central European Journal of Chemistry (2)**: 570-580.
- Krebs, J. J., and Maisch W. G. 1971. Exchange effects in optical-absorption spectrum of Fe³⁺ in Al₂O₃. **Physical Review B (4)**: 757-769.
- Lodziana, Z. and J. Piechota. 2006. Ab initio thermodynamic properties of point defects and O-vacancy diffusion in Mg spinels. *Physical Review B*: 74.
- Lou, F.H. and D.W.G. Ballentyne. 1968. **J. Phys. C (1)**: 608.
- Macfarlane, R.M. 1963. Analysis of d³ ions in trigonal crystal fields. **The journal of chemical physics (39)**: 3118.
- Martignago, F., A. Dal Negro and S. Carbonin. 2003. How Cr³⁺ and Fe³⁺ effect Mg-Al order-disorder transformation at high temperature in natural spinels. **Phys Chem Material (30)**: 401-408.
- Michail, T.N. and M. Koch-Muller. 2005. **Chem. Miner**: 32-75.
- Mo, O. and W.Y. Ching. 1996. Electronic structure of normal, inverse and partially inverse spinel in the MgAl₂O₄ system. **Physical Review B**: 54.
- Roberto, P., M. Carvalhaes and A.R. Blak. 2007. Optical absorption, paramafnetic resonance and depolarization currents in MgAl₂O₄ spinel. **Phy. Stat**: 1238-1241.

- Skvortsova, V., N. Mironava-Ulmanis and U. ulmanis. 2002. Neutron irradiation influence on magnesium aluminium spinel inversion. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B (191)**: 256-260.
- Soney, J., Ch. Nojiri, H. Aizawa, T. Katsumata, Sh. Komuro and T. Morikawa. 2006. Fluorescence thermometer application of Cr doped spinel crystals. **SICE-ICASE**: 18-21.
- Stahl-Brada, R. and W. Low. 1959. Paramagnetic resonance spectra of chromium and manganese in the spinel structure. **Physical Review**: 116.
- Taran, M. N., M. K. Muller and K. Langer. 2005. Electronic absorption spectroscopy of natural (Fe^{2+} , Fe^{3+}) – bearing spinels of spinel s.s. – hercynite and gahnite-hercynite solid solutions at different temperatures and high pressures. **Physics and Chemistry of mineral (32)**: 175.
- Tomita, A., T. Sato, K. Tanaka and Y. Kawabe. 2004. Luminescence channels of manganese-doped spinel. **Journal of Luminescence (109)**: 19-24.
- Webster, R. 1977. **Gems 3th edition**: 112-117.
- Wood, D.L., G.F. Imbusch, R.M. Macfarlane, P. Kisliuk and D.M. Larkin. 1968. Optical spectrum of Cr^{3+} ions in spinels. **The journal of chemical physics (48)**: 5255.
- Zang, Y. and D.J. Wen. 2008. Relationship between infrared radiation and crystal structure in Fe-Mn-Co-Cu-O spinels. **Acta Metall. Sin. (Engl.Lett.) (21)**: 15-20.





NIR Spectroscopy เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลาย ตัวอย่าง โดยอาศัยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยตัวอย่าง เป็นวิธีการที่ให้ผลที่ดีและรวดเร็ว ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ตั้งแต่การตรวจสอบวัตถุดิบไปจนถึงการตรวจสอบและปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

บทนำ

NIR (Near-infrared) Spectroscopy ได้ถูกนำมาใช้งานในช่วงปลายของทศวรรษ 1970 เป็นวิธีการวิเคราะห์โมเลกุลที่ไม่ทำลายตัวอย่าง โดยการตรวจวัดปริมาณแสงที่ดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 400-2500 นาโนเมตร NIR Spectroscopy มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมหลาย ๆ ด้าน โดยเฉพาะด้านอาหารและยา ซึ่งได้ถูกนำมาใช้ในการจำแนกองค์ประกอบและคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้เป็นอย่างดี

หลักการ

เมื่อฉายแสงในช่วงความยาวคลื่น NIR ลงไปบนตัวอย่าง แสงที่มีพลังงานเพียงพอจะถูกดูดกลืนและกระตุ้นให้เกิดการสั่นของโมเลกุลใน functional groups ต่าง ๆ 2 ลักษณะ คือ การยืดหด (stretching) และการเปลี่ยนมุม (bending) ช่วงความถี่ overtones และ combination ของหมู่ฟังก์ชัน O-H, C-H, N-H และ O=C ซึ่ง เป็น โมเลกุลหลักของสารอินทรีย์ ถ้าโครงสร้างโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ตรวจวัดมีความซับซ้อนสเปกตรัมที่ได้จะยิ่งมีการซ้อนทับกันมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมเหล่านี้จึงต้องทำการแยกแยะและแสดงลักษณะเฉพาะโดยนำวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติ (Chemometrics) มาใช้ในการหาค่าเฉลี่ย

เครื่องมือ

ส่วนประกอบหลักและการออกแบบเครื่องมือ Spectrometer แต่ละประเภทจะมีความคล้ายคลึงกันโดย NIR นั้นจะประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสง ตัวเลือกช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการ ตำแหน่งที่วางตัวอย่าง เครื่องตรวจวัดและบันทึกผล

1. แหล่งกำเนิดรังสีในช่วง NIR นั้นโดยส่วนใหญ่จะใช้หลอดทังสเตนเพราะราคาถูกและใช้งานได้ทันที แล้วใช้ตัวฟิลเตอร์ช่วยกรองแสงในช่วงความถี่ที่ไม่ต้องการออกเพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างร้อนจนเกินไป หรือใช้ LED เป็นแหล่งกำเนิดโดยค่าความยาวคลื่นที่ได้จะขึ้นกับสารที่

ใช้ทำตัว LED อย่างไรก็ตาม LED ไม่สามารถให้ความยาวคลื่นในช่วง 1700-2500 นาโนเมตรได้ ซึ่งเป็นช่วงที่นิยมนำไปใช้งาน แต่ก็เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะต้องการกำลังไฟฟ้าน้อย มีอายุการใช้งานที่ยาวนานและพลังงานของผลลัพท์ที่ได้ก็ไม่เพิ่มสูงขึ้นแม้จะมีการเพิ่มกำลังวัตต์ของแหล่งกำเนิด

2. โมโนโครมาเตอร์ (Monochromator) ช่วยในการกระจายแสงโดยอาศัยเกรตติง และควบคุมให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการด้วยช่องผ่านแสงเข้า (Entrance Slit) และช่องผ่านแสงออก (Exit Slit) ตัวอย่างจะมีการดูดกลืน หรือยับยั้งให้รังสีทะลุผ่านหรือสะท้อนกลับนั้นขึ้นกับรูปแบบและองค์ประกอบของตัวอย่าง เช่น ของแข็ง ของเหลว อิมัลชัน สารแขวนลอย เป็นต้น

3. ตำแหน่งที่วางตัวอย่างจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับรูปแบบของการวิเคราะห์และปริมาณของอนุภาคที่ใช้วิเคราะห์ เช่น ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่างจะเหมาะสำหรับตัวอย่างที่เป็นตะกอนแห้งหรือในกรณีที่ตัวอย่างมีปริมาณมากถ้วยเหล่านี้จะมีการหมุน เป็นต้น เซลล์สำหรับใส่ตัวอย่างเหล่านี้จะต้องทำจากวัสดุที่ยอมให้แสงในช่วง NIR สามารถทะลุผ่านได้ เช่น ควอตซ์ หรือแก้ว และมีระยะทางเดินของแสงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่าง

4. อุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Detector) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการทาง Photoconductive Effect การเลือกเครื่องตรวจวัดนั้นขึ้นกับช่วงความยาวคลื่นและการออกแบบตัวแปรต่างๆ ของ Spectrometer ซึ่งซิลิกอนจะเหมาะสำหรับแสงในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ช่วงความยาวคลื่นสั้น (400-1100 นาโนเมตร) ในขณะที่สิลิคอนไฟด์หรือเซเลเนียม

นอกจากนี้ผู้ผลิตบางรายอาจมีการใช้อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ในการตรวจวัดความยาวคลื่นในช่วง 800-1700 นาโนเมตร สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ในเครื่องมือประเภทอื่นๆ เช่น ไดโอดอาเรย์ ก็ได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจวัด NIR เพิ่มมากขึ้น แต่ไม่เหมาะสำหรับเครื่องมือแบบพกพาเพราะจะซำรุดได้ง่าย และเมื่อมีการเปลี่ยนอุปกรณ์บ่อยๆ จะทำให้ประสิทธิภาพในการตรวจวัดลดลง Spectrometer ขนาดเล็กๆ จะใช้ CCD เป็นเครื่องตรวจวัด แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่สามารถตรวจวัดแสงได้เฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่มองเห็นได้และ NIR ในช่วงความยาวคลื่นสั้นเท่านั้นโดยทั่วไปแล้วผลลัพท์ที่ได้จะสามารถแบ่งได้เป็นข้อมูล สเปกตรัม ซึ่งผู้ใช้สามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบสอบถามหรือใช้ตรวจวัดค่า ที่สนใจต่อไป และแบบที่ให้ผลที่สนใจโดยตรงคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ได้เข้ามามีบทบาทในการรวบรวมและจัดการข้อมูลต่างๆ เหล่านี้

ข้อดีและข้อจำกัดของ NIR

ข้อดี

ข้อดีของ NIR Spectrometry ที่เหนือกว่า MIR และ FIR คือ ต้องการการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อยหรือไม่ต้องทำ และให้ข้อมูลตามเวลาจริง นอกจากนี้ NIR ยังแตกต่างจากวิธีการวิเคราะห์แบบอื่นๆ อีกคือ ให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ไม่ทำลายตัวอย่างไม่ใช้สารเคมีหรือทั้งสารตกค้างตรวจวัดองค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆ ได้พร้อมๆ กันและสามารถติดตั้งเครื่องมือได้ทุกสถานที่ใช้งานง่ายโดยไม่ต้องอาศัยนักเคมี ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ตู้ดูดควัน ระบบระบายน้ำ ความแม่นยำของ NIR นั้นขึ้นกับความแม่นยำของวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการควบคุม NIR มีข้อดีมากกว่า MIR และ FIR อีกข้อหนึ่งก็คือ เรื่องของความรบกวนรบกวน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในทุกชิ้นจะเป็นแหล่งกำเนิดความรบกวนต่อเครื่องตรวจวัดสัญญาณในช่วง MIR และ FIR แต่จะส่งผลต่อเครื่องตรวจวัด NIR เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีผลเลย

ข้อจำกัด

NIR มีข้อจำกัดที่สามารถตรวจวัดได้เฉพาะโมเลกุลของสารอินทรีย์เท่านั้น เพราะโลหะ เช่น เงินหรือตะกั่ว และสารอนินทรีย์ ส่วนใหญ่ไม่สามารถดูดกลืนรังสีในช่วง NIR ได้เนื่องจาก NIR ไม่ได้เป็นระบบ stand-alone ดังนั้น การสอบเทียบส่วนประกอบหรือตัวแปรต่างๆ รวมทั้งการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐานอยู่เป็นประจำจึงเป็นสิ่งจำเป็นมากเพื่อให้อุ่นใจได้ว่าการสอบเทียบยังคงให้ความน่าเชื่อถืออยู่และจะต้องทำการปรับปรุงการสอบเทียบให้ทันสมัยอยู่เสมอ ถึงแม้ว่าวิธีการทางด้านคณิตศาสตร์และสถิติจะเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลสำคัญของสเปกตรัมที่มีการซ้อนทับแต่ก็ต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่ได้รับการพัฒนาในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลของสเปกตรัมและองค์ประกอบหรือตัวแปรต่างๆ เช่น คุณสมบัติของหมู่ฟังก์ชัน ในเชิงสถิติเป็นอย่างดี ซึ่งการที่จะได้ข้อมูลเหล่านี้ก็ต้องผ่านกระบวนการวิเคราะห์มาตรฐานมาก่อนเทคโนโลยีของ NIR ในปัจจุบัน NIR ระบบ Digital Dispersive Grating หลักการทำงานของเครื่อง NIR ระบบ Digital Dispersive Grating คือ แสงจากแหล่งให้พลังงานแสงจะถูกกระจายและควบคุมด้วยระบบโมโนโครมาเตอร์ให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการส่งผ่านไปยังตัวอย่าง และวัดปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้ด้วยอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแล้วแปลงเป็นสัญญาณส่งเข้าสู่ส่วนประมวลผลตามลำดับในส่วนของโปรแกรมการทำงานจะบันทึกปริมาณแสงที่ตัวอย่างดูดกลืนไว้เทียบกับความยาวคลื่นต่างๆ เรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) แล้วนำมาจับคู่ (Matching) กับค่าการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทราบจากห้องปฏิบัติการ



สี เป็นคุณสมบัติเชิงแสงที่สามารถใช้บรรยายคุณลักษณะของวัสดุเกษตรได้ง่ายที่สุดวิธีหนึ่ง ในการอธิบายสีของวัตถุด้วยคำพูด มาตรฐานของการบรรยายลักษณะสีอาจจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ลักษณะทางกายภาพของตาของผู้บรรยาย ลักษณะแสงที่ตกกระทบ ฯลฯ ดังนั้นการวัดและบรรยายสีในเชิงวิชาการจึงต้องมีการจัดมาตรฐานเพื่อเป็นการลดความไม่เป็นกลาง (bias) ของผู้บรรยายสีของวัสดุนั้น ๆ

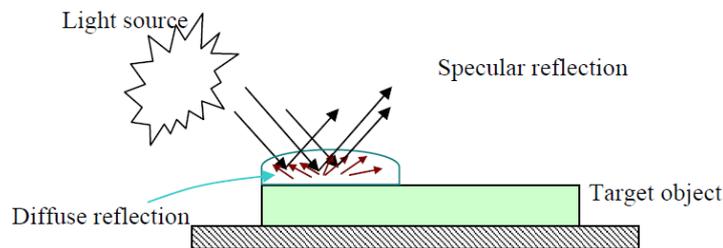
ปัจจัยที่ทำให้เกิดสีมีอยู่ 3 ประเภท คือ

ก. แหล่งกำเนิดแสง (light source) แหล่งกำเนิดแสงมีผลอย่างมากในการบรรยายสีของวัตถุ แหล่งกำเนิดแสงถ้ามีแสงแตกต่างจากแสงขาว เมื่อตกกระทบกับวัตถุจะทำให้แสงที่สะท้อนกลับมาเกิดสีที่แตกต่างไป เช่น แสงจากหลอด incandescent จะให้แสงสีส้ม ในขณะที่ Fluorescent จะให้แสงขาวเย็น

ข. วัตถุที่มอง (specimen) วัตถุที่ทึบแสง (opaque) จะให้การสะท้อนของแสงเพื่อเกิดสีแตกต่างจากวัตถุที่โปร่งแสง (translucent) และโปร่งใส (transparent) ลักษณะของการตกกระทบของแสงบนวัตถุ

เมื่อวัตถุทึบแสง ได้รับแสงกระทบจากภายนอก การสะท้อนแสงจะมีอยู่ 2 ส่วนคือ การสะท้อนแสงเสมือนจริง (specular reflection) และการสะท้อนแสงกระจาย (diffuse reflection) (ภาพที่ 1) การสะท้อนแสงเสมือนจริงคือการสะท้อนแสงกลับจากวัตถุที่เหมือนและมีขนาดใกล้เคียงกับแสงตกกระทบแต่ทิศทางตรงข้าม การสะท้อนแสงเสมือนจริงจะแสดงออกมามากที่สุดเพียง 4% ของการสะท้อนแสงทั้งหมด (total reflection) ซึ่งจะเกิดในกรณีที่วัตถุมีผิวมันเงา 100% ดังนั้นการสะท้อนแสงเสมือนจริงในวัตถุที่มีผิวมันเงาจะมากกว่าวัตถุผิวด้านและผิวขรุขระตามลำดับ ส่วนการสะท้อนแสงกระจายเป็นการสะท้อนแสงที่บริเวณผิวจากวัตถุไปทุกทิศทางและมีขนาดเล็กกว่าแสงที่ตกกระทบมาก ซึ่งการสะท้อนแสงกระจายนี้เองเป็นส่วนของการสะท้อนที่ใช้ในการวัดเฉดสี

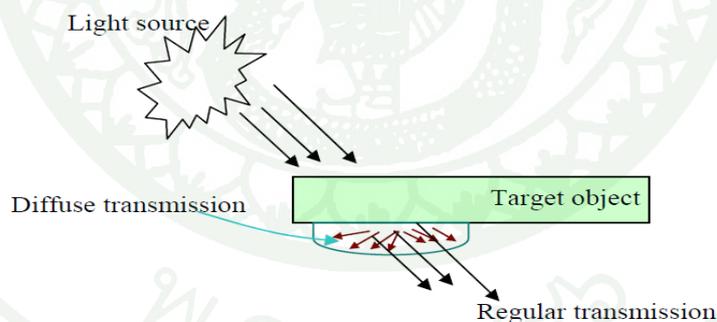
การสะท้อนแสงทั้งหมด (total reflection) = specular reflection + diffuse reflection



ภาพที่ 1 ลักษณะการสะท้อนแสงของวัตถุทึบแสง .

สำหรับวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส (ภาพที่ 2) แสงจะทะลุผ่านวัตถุได้แตกต่างกัน วัตถุโปร่งแสงจะมีความขุ่นอยู่ภายในเนื้อและจะดูดกลืนแสงบางส่วนไว้ สำหรับวัตถุโปร่งใส นั้น แสงจะถูกดูดกลืนในเนื้อวัตถุเป็นส่วนใหญ่ การทะลุผ่านแสงมี 2 รูปแบบคือ การทะลุผ่านปกติ (regular transmission) และ การทะลุผ่านกระจาย (diffuse transmission) (ภาพที่ 3) ถ้าวัตถุโปร่งแสงหรือมีความขุ่น เช่น กระจกทึบ การทะลุผ่านปกติจะน้อยกว่าวัตถุวัตถุโปร่งใส การวัดสีของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใสนี้จะวัดที่ diffuse transmission ลักษณะเดียวกับการวัดสีแบบหลักการสะท้อนของแสง

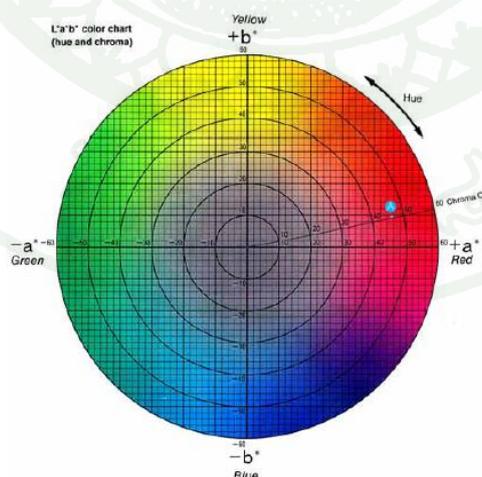
การทะลุผ่านแสงทั้งหมด (total transmission) = regular transmission + diffuse transmission



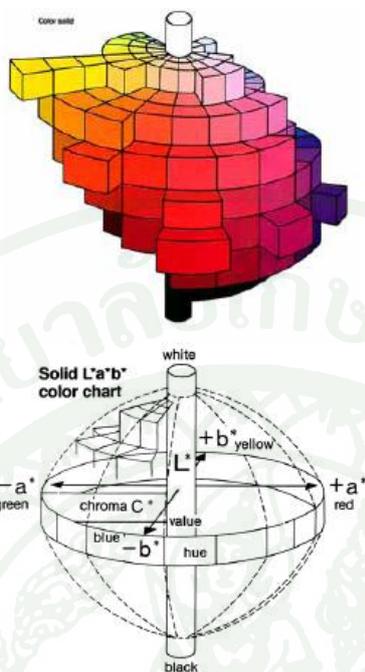
ภาพที่ 2 ลักษณะการทะลุผ่านแสงของวัตถุโปร่งแสงและโปร่งใส .

ค. ผู้สังเกตการณ์ (observer) ผู้สังเกตการณ์นั้นมีผลอย่างยิ่งต่อการบรรยายสีที่มองเห็น ผู้สังเกตการณ์ต่างคนจะบรรยายลักษณะสีต่างกันขึ้นอยู่กับสรีระทางกายภาพของตาแต่ละคน ในร่างกายคนจะมีเซลล์อยู่ 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับการรับสี คือ เซลล์รูปแท่งและเซลล์รูปโคน เซลล์รูปแท่งจะตอบสนองได้ดีกับการมองเห็นในที่เกี่ยวกับความมืดสว่าง ส่วนเซลล์รูปโคนจะตอบสนองต่อสีที่มองเห็นจากหลักการพื้นฐานเรื่องสีข้างต้น จึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อใช้วัด

สีที่มีมาตรฐานและลดความไม่เป็นกลางเนื่องจากปัจจัยของแหล่งกำเนิดแสงและผู้สังเกตการณ์ องค์การที่มีบทบาทสำคัญในการกำหนดมาตรฐานด้านสี คือ Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือในชื่ออังกฤษว่า International Commission on Illumination (<http://www.cie.co.at/cie/>) มีสำนักงานใหญ่อยู่ในประเทศฝรั่งเศส องค์การนี้ได้กำหนดมาตรฐานการวัดสีซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างในวงการวิชาการและการวิจัย คือระบบ CIE Lab scale ในระยะเริ่มแรก CIE ได้กำหนดสเกลการวัดสีเป็น X-Y-Z ซึ่งใช้บรรยายสีแดง (Red) เขียว (Green) และ น้ำเงิน (Blue) แต่เนื่องจากระบบสีดังกล่าวไม่สามารถบรรยายถึง ลักษณะความมืด-สว่างของสีได้ CIE ได้พัฒนาต่อมาเป็นระบบ X-Y-L ซึ่งบรรยายถึงค่าสีแดง เขียว และความสว่าง (lightness) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวก็ยังขาดส่วนที่บรรยายถึงค่าสีน้ำเงิน CIE จึงได้พัฒนาระบบสีต่อมาจนเป็นระบบที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน คือระบบ $L^*a^*b^*$ ซึ่งเป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่แกน L^* จะบรรยายถึงความสว่าง (lightness) จากค่า $+L^*$ แสดงถึงสีขาว จนถึง $-L^*$ แสดงถึงสีดำ แกน a^* จะบรรยายถึงแกนสีจากเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงแดง ($+a^*$) ส่วนแกน b^* จะบรรยายถึงแกนสีจากน้ำเงิน ($-b^*$) ไปเหลือง ($+b^*$) ลักษณะการบรรยายสีของ CIE แสดงได้ดังภาพที่ 3 และ 4 นอกจากนี้ บริษัท Hunter lab ในอเมริกาก็เป็นอีกองค์กรหนึ่งซึ่งทำการวิจัยและพัฒนาระบบการวัดสี จนในที่สุดได้ระบบของ Hunter lab เอง ซึ่งเรียกว่า การวัดสีระบบ Hunter lab scale ซึ่งบรรยายแกนใน 3 มิติ เช่นเดียวกับระบบ CIE โดยที่ Hunter lab จะใช้สเกล L-a-b บรรยายลักษณะสีเช่นเดียวกับ $L^*a^*b^*$ ของ CIE ข้อแตกต่างระหว่างระบบสีของ CIE และ Hunter lab คือสูตรการคำนวณค่าสี ซึ่งทั้ง L-a-b และ $L^*a^*b^*$ ล้วนมีพื้นฐานการคำนวณมาจากค่าจากระบบ X-Y-Z ทั้งสิ้น



รูปที่ 3 การบรรยายสีในระบบ CIE Lab มองในระนาบ 2 มิติ: Hue บรรยายถึงเฉดสี และ Chroma บรรยายถึงความมันวาวหรือความเข้มของโทนสี .



ภาพที่ 4 การบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูป 3 มิติ.

อุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ spectrophotometer อุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้แสงจากแหล่งประดิษฐ์ (illuminant) คือแสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (intensity) หรืออุณหภูมิของสี (color temperature) แล้ว ตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (noon daylight) A- แสงส้มจากหลอดทั้งสแตน C – แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight) CWF – แสงขาวเย็นจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (cooled white fluorescent) อุปกรณ์วัดสี spectrophotometer ในท้องตลาดมีหลายรุ่นและหลายยี่ห้อ ที่นิยมใช้ได้แก่ ของ Hunter lab, Nikon และ Minolta (รูปที่ 2.20) ซึ่ง spectrophotometer บางรุ่นสามารถบอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น X-Y-Z L-a-b L*-a*-b* รวมไปถึง CMYK (CrayonMagenta-Yellow-Black) ซึ่งเป็นระบบสีนิยมใช้ในเกี่ยวกับสิ่งพิมพ์

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกัญชานา ยาวออาชั้น
เกิดวันที่	5 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอระแงะ จังหวัดนราธิวาส
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เกษตรศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่น	งานวิจัยเรื่องผลของการอบรังสีต่อลักษณะเฉพาะของสปีเนล $MgAl_2O_4$
ประสบการณ์ทำงาน	เป็นผู้ช่วยสอนวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ I และ วิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ II
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในโครงการ U-IRC (พ.ศ. 2551)