

การวิเคราะห์คุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลสีแดงอมน้ำตาล

ด้วยเทคนิคลำไอออน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ

พฤษภาคม 2556

การวิเคราะห์คุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลสีแดงอมน้ำตาล

ด้วยเทคนิคลำไอออน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ

พฤษภาคม 2556

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การวิเคราะห์คุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลสีแดงอมน้ำตาล

ด้วยเทคนิคลำไอออน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ

พฤษภาคม 2556

บุษบากร ศรีสถาพร. (2556). การวิเคราะห์คุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลสีแดงอม  
น้ำตาลด้วยเทคนิคลำไอออน. ปริญญาโท วท.ม. (เทคโนโลยีอัญมณีและ  
เครื่องประดับ). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.  
คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.ดวงแข บุตรกุล, อาจารย์ ดร.เสวต อินทศิริ.

พลอยสปิเนลธรรมชาติโดยทั่วไปมีหลากหลายสีเช่นเดียวกับพลอยแซปไฟร์และทับทิม แต่  
สีแดงเข้มสดใกล้เคียงกับทับทิมสีแดงสด ซึ่งเป็นสีที่มี มูลค่าทางการตลาด สูงมีจำนวนน้อย มาก  
พลอยดิบสีแดงที่พบส่วนใหญ่มักเป็นสีแดงไม่เข้มสด เนื่องจากมีสีอื่นเจือปนอยู่ เช่น ปนกับสีม่วง สี  
ส้มและสีน้ำตาล ส่งผลต่อ ความสดและความ อิ่มตัวของ พลอย อีกทั้งการมีตำหนิภายในจำนวนมาก  
ทำให้พลอยดูไม่ใสสะอาด งานวิจัยนี้เลือกใช้พลอยตัวอย่างสปิเนลกลุ่มสีแดงแกมน้ำตาลจากประเทศ  
พม่าที่มีมูลค่าการตลาดต่ำ มีสีรองเป็นสีน้ำตาลปนและความใสสะอาดต่ำ 3 กลุ่ม ได้แก่ สปิเนล สีส้ม  
แกมแดง สปิเนล สีส้มแดง และสปิเนล สีแดงแกมส้ม โดยการประยุกต์ใช้ เทคโนโลยีลำไอออนใน 2  
ลักษณะ ประกอบด้วย การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคลำไอออน ที่มีความรวดเร็วและไม่มีการทำลาย  
ตัวอย่าง ได้แก่ เทคนิค Particle Induced X-ray Emission (PIXE) ซึ่งเป็นการตรวจวัด  
characteristic x-ray ของอะตอมของธาตุองค์ประกอบในพลอยที่ถูกชนด้วยโปรตอนพลังงานสูง ทำ  
ให้ตรวจ วัด ปริมาณของธาตุต่างๆ ที่มีการเจือปนอยู่ในปริมาณที่น้อยมากๆ ได้ และ เทคนิค  
Ionoluminescence (IL) ซึ่งเป็นการตรวจวัดการเปล่งแสงของแร่มลทินและ ข้อบกพร่องในพลอย ที่  
ใช้หลักการกระตุ้นด้วยโปรตอนพลังงานสูง เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณของธาตุเจือชนิด  
ต่างๆ ที่มีผลต่อสีของพลอย พบว่าพลอยสปิเนลสีแดงแกมน้ำตาล มีธาตุโครเมียมที่ทำให้สีแดง และ  
ธาตุเหล็กทำให้เกิดสีรองคือสีน้ำตาลค่อนข้างสูง ทั้งนี้เนื่องจากธาตุเหล็กทำให้เกิดสีน้ำตาลเป็นสีรอง  
เจือปนกับสีแดง ซึ่งสามารถหา ปริมาณสัดส่วนธาตุเหล็กต่อโครเมียม ในกลุ่มสปิเนลสีแดงแกมส้ม  
เป็น 0.058-3.6 กลุ่มสีส้มแดงเป็น 0.09-7.14 และกลุ่มสีแดงแกมส้มเป็น 0.23- 16 ส่งผลให้สปิเนล  
กลุ่มสี ส้มแกมแดงมีสีแดงสดน้อยกว่ากลุ่มสีส้มแดงและกลุ่มสีแดงแกมส้มตามลำดับ สำหรับ  
กระบวนการศึกษาการลดปริมาณสีรอง และเพิ่มความอิ่มตัวของสีแดง งานวิจัยนี้ ได้ทดลองใช้  
เทคโนโลยีลำไอออนในอีกลักษณะหนึ่ง คือ เทคนิคการอิมพลานเตชันด้วยลำไอออนหนักพลังงาน  
ต่ำ ผลการทดลองพบว่า สามารถปรับลดให้สปิเนลที่มีสีน้ำตาลเป็นสีรอง ให้เหลือเพียงสีแดงสดได้  
รวมถึงสามารถกำจัดตำหนิที่เป็นของเหลวและตำหนิคล้ายฝุ่นได้ ทำให้พลอยมีสีที่มีความอิ่มตัวและ  
ความสะอาดเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าพลอยสีแดงอมน้ำตาลได้

CHARACTERIZATION AND MODIFICATION FOR VALUE ADDING OF  
BROWNISH RED SPINEL BY ION BEAM TECHNIQUES



Presents in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Master of Science Degree in Gems and Jewelry Technology  
at Srinakharinwirot University

May 2013

Budsabakorn Srisataporn. (2013). *Characterization and modification for value adding of brownish Red spinel by ion beam techniques*. Master thesis, M.Sc. (Gems and Jewelry Technology). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.  
Advisor Committee: Dr. Duangkhae Bootkul, Dr. Saweat Intarasiri.

Natural spinels ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) can be found in colors equal to those of fine rubies and sapphires. In particular, spinels of clarity saturated red appearance, called ruby spinel or balas ruby, are the most appreciate. However, the beautiful rich red spinels are very rare; they can be found in a range of pastel shades blended with purple, orange and brown. Poor spinel possess common inclusions of water and gaseous in defect structure. Therefore, the objectives of the present studies are to investigate the cause of the color blending and water and gaseous incorporation in spinels and also to propose an alternative method for improving their qualities by using ion beam technology. A non destructive advanced ion beam analysis techniques; Particle Induced X-ray Emission (PIXE) and Ionoluminescence (IL), have been employed for geochemical analysis of the stones. PIXE and IL are powerful, fast and relatively simple analytical technique that can be used to identify and quantify trace elements. While PIXE reveals ratio of the trace element concentrations effecting to the color of the stones, IL detects the luminescence mechanism of the gems. The traces of chromium and iron in red brownish spinel, inwhich chromium giving a red color and iron giving a brown color, are rather high. The proportional of the amount of iron to chromium can be calculated to be 0.058 to 3.6 for orange red algae, 0.09 to 7.14 for bright red color red and from 0.23 to 16 for red tinged orange spinel group resulting to orange red algae are less iron to chromium ratio than bright red color red, orange and red tinged orange, respectively. Low energy ion implanters have been applied for implanting various ion species at various fluencies to the gems for improving their color qualities. As a new alteration technique, ion beam treatment was applied for the optical appearance and color enhancement in deep brownish red Burmese spinels. It was found that the micro-inclusions has almost been disappeared, resulting in clarity enhancement, and also their color has been changed, after ion beam treatment.

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การวิเคราะห์คุณลักษณะและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลสีแดงอมน้ำตาลด้วยเทคนิคลำไอออน

ของ

บุษบากร ศรีสถาพร

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอัญมณีและเครื่องประดับ  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ.2556

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(อาจารย์ ดร. ดวงแข บุตรกุล)

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมศร สิงขรัตน์)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เสวต อินทศิริ)

(อาจารย์ ดร. ดวงแข บุตรกุล)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เสวต อินทศิริ)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. อมรมาศ กীরดีสิน)

## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ ดร. ดวงแข บุตรกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้กรุณาให้โอกาส คำแนะนำ คำปรึกษาเป็นอย่างดี และตรวจแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังเป็นบุคคลที่ทำให้กำลังใจให้ผู้เขียนต่อสู้กับอุปสรรคต่างๆ ผู้เขียนขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร. เสวต อินทศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมสร สิงขรัตน์ ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของลำอนุภาค และพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร. อมรมาศ กิรติสิน และ ดร. บงกช พิชัยกำจรูฒ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ในการถ่ายภาพด้วยกล้องไมโครสโคปและเครื่องมือวิเคราะห์อัญมณี

ขอขอบพระคุณ คุณฉยม ทองเหลือง ช่างเทคนิคผู้ชำนาญการที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทดลองแต่ละครั้งในการทำงานกับเครื่องเร่งอนุภาค Tandetron

ขอขอบพระคุณ คุณธวัชชาติ จุฬาปกรณ์ ที่ให้ คำแนะนำ และ ความช่วยเหลือ ในการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นทำการวิจัยจนการวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีวิทยา ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุน ให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

บุษบากร ศรีสถาพร



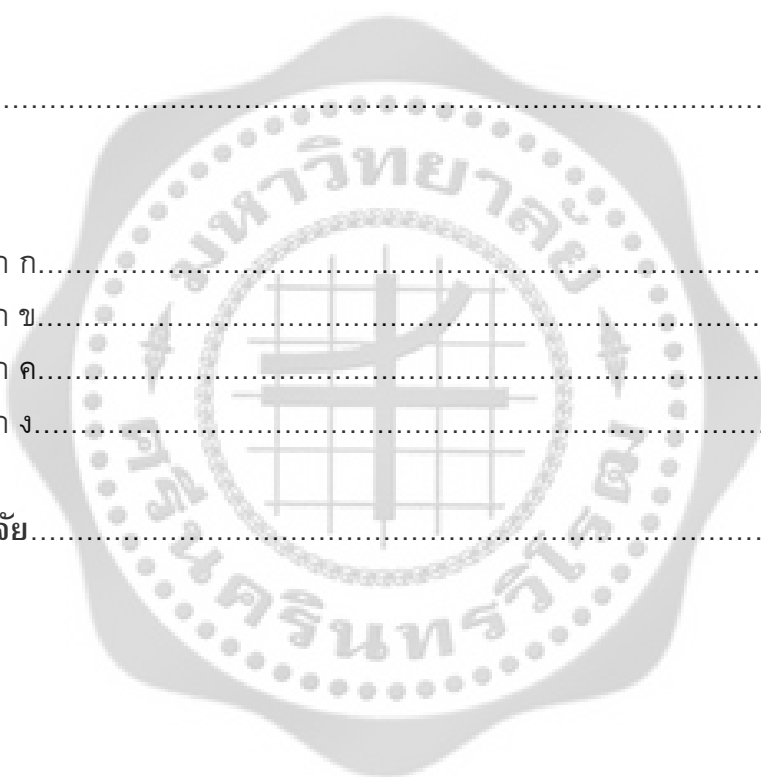
# สารบัญ

บทที่	หน้า
<b>1 บทนำ</b> .....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	4
ระยะเวลาดำเนินงานวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	5
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
<b>2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	6
ลักษณะทั่วไปของสปีเนล.....	6
การเกิดสีของสปีเนล.....	9
ลักษณะตำหนิภายใน.....	10
แหล่งที่พบสปีเนล.....	12
ธรณีวิทยาแหล่งโมกก.....	13
การปรับปรุงคุณภาพพลอย.....	16
ลักษณะทางสเปกโทรสโกปีของสปีเนล.....	19
เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน.....	20
Particle Induced X – ray Emission (PIXE).....	20
Ionoluminescence (IL).....	24
Ion Implantation.....	29
<b>3 วิธีการทดลอง</b> .....	35
การจัดเตรียมตัวอย่าง.....	35
เทคนิคการวิเคราะห์.....	35
เทคนิคการตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน.....	36
เทคนิคการวิเคราะห์ตรวจสอบขั้นสูง.....	44

## สารบัญ

(ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการศึกษาวิจัย.....	59
ลักษณะทางกายภาพ.....	59
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี.....	61
การวิเคราะห์สมบัติเชิงแสง.....	66
การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิคลำไอออน.....	72
5 สรุปผลการวิจัย.....	106
บรรณานุกรม.....	112
ภาคผนวก	115
ภาคผนวก ก.....	116
ภาคผนวก ข.....	121
ภาคผนวก ค.....	123
ภาคผนวก ง.....	125
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	157



## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 สี สาเหตุการเกิดสี และตำแหน่งการดูดกลืนแสงของธาตุทรานซิชันในสปีเนล.....	20
2 แสดงรายละเอียดของความยาวคลื่นของพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	26
3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพสปีเนลธรรมชาติที่นำมาใช้ในการศึกษา.....	59
4 ผลการจำแนกสีสปีเนลตามระบบเจมเซต.....	61
5 องค์ประกอบเคมีในสปีเนลตามกลุ่มสีต่างๆ ด้วยเทคนิค PIXE.....	64
6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของธาตุโครเมียมและเหล็กในสปีเนลตามกลุ่มสี.....	64
7 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันสปีเนลกลุ่มสีส้มแดง.....	72
8 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดง.....	96
9 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพสปีเนลธรรมชาติ.....	106
10 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่เป็นสาเหตุของการเกิดสีในสปีเนล.....	107
11 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนช่วง UV-Visible ของสปีเนล.....	108
12 สรุปจำนวนตัวอย่างสปีเนลที่แสดงสีแดงชัดเจนขึ้นภายหลังไอออนอิมพลานเตชัน.....	109

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงโครงสร้างผลึกของสปีเนล โดย A-atoms คือตำแหน่งของ $Mg^{2+}$ และ B-atoms คือตำแหน่งของ $Al^{3+}$ .....	6
2 แสดงส่วนประกอบแร่กลุ่มสปีเนล.....	7
3 แสดงรูปผลึกทรงแปดหน้าของสปีเนล.....	8
4 แสดงรูปผลึกทรงสิบสองหน้าของสปีเนล.....	8
5 แสดงรูปผลึกแฝดของสปีเนล.....	8
6 แสดงตำหนิของผลึกสปีเนลรูป octahedral.....	10
7 แสดงตำหนิคล้ายรอยนิ้วมือในสปีเนล.....	10
8 แสดงตำหนิรอยแตกร้าวภายในของสปีเนล.....	11
9 แสดงกลุ่มตำหนิของแข็งภายในของสปีเนล.....	11
10 แสดงตำหนิรอยแตกรูปร่างคล้ายขนนก.....	11
11 แผนที่แสดงแหล่งที่พบสปีเนล.....	13
12 แผนที่แสดงลักษณะธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โมกกและพม่าตอนบน.....	14
13 สปีเนลที่พบในหินอ่อนจากแหล่งโมกก.....	15
14 การทำเหมืองแหล่งพลอยที่เป็นแบบตะกอนน้ำพา.....	16
15 แผนภาพแสดงการเกิด Characteristic x – ray.....	21
16 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ตามมาหลังจากการเกิด ionization ด้วยลำอนุภาค.....	22
17 แสดง energy level diagram ของการทรานซิชันในอะตอม.....	22
18 แผนภาพระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE.....	23
19 แสดง sample holder พร้อมนำไปใส่ใน Analysis Chamber.....	23
20 แสดงภาพภายในอุโมงค์วิเคราะห์ของระบบ Ion Beam Analysis ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่.....	24
21 แผนภาพระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL.....	25
22 แสดงตำหนิบางชนิดในผลึกโลหะที่เป็น color center.....	27
23 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าซึ่งมีการชนกันแบบ cascade.....	31
24 ส่วนประกอบของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์.....	33
25 แสดงเครื่องชั่ง (hydrostatic balance) สำหรับชั่งน้ำหนักและหาค่าความถ่วงจำเพาะของอัญมณี.....	37

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
26 แสดงเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) สำหรับวัดค่าดัชนีหักเหของอัญมณี.....	38
27 แสดงกล่องแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV lamp) สำหรับตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณี.....	39
28 ลักษณะของไฟแบบ darkfield illumination.....	40
29 แสดงกล้องจุลทรรศน์สำหรับวิเคราะห์อัญมณี.....	40
30 แสดงชุดเทียบสีของ GIA (GIA Gem Set หรือ Color master).....	41
31 แสดงสีสัน (Hue) ในระบบเจมเซต.....	42
32 แสดงสีสันของระบบเจมเซต และวรรณะสี.....	42
33 แสดงระดับความมืดสว่างในระบบเจมเซต.....	43
34 แสดงระดับความอึมตัวของสีในระบบเจมเซต.....	43
35 แสดงการติดอัญมณีตัวอย่างบน sample holder.....	45
36 แสดงการวัดพิคตของอัญมณีแต่ละเม็ดเทียบกับตำแหน่งของสารเรืองแสง.....	45
37 แสดงภาพ sample holder ภายใน Vacuum chamber.....	46
38 แสดงโปรแกรมควบคุมระบบ goniometer.....	47
39 แสดงโปรแกรม FRMTC สำหรับแปลงไฟล์ของสเปกตรัม.....	48
40 หัวข้อย่อยภายในเมนู File.....	49
41 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ต้องการวิเคราะห์.....	49
42 แถบเครื่องมือของโปรแกรม GupixWin.....	50
43 หน้าต่างโปรแกรม GupixWin แสดงเส้นบอกตำแหน่งของธาตุเหล็ก.....	51
44 การ calibrate สเปกตรัมของธาตุเหล็กและธาตุสังกะสี.....	52
45 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับเลือกประเภทของวัตถุตัวอย่าง.....	52
46 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับกำหนดโครงสร้างของตัวอย่าง.....	53
47 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับกำหนดธาตุที่คาดว่าจะประกอบ.....	54
48 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมแสดงตารางธาตุสำหรับกำหนดธาตุองค์ประกอบ.....	54
49 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับเลือกว่าจะทำการบันทึกข้อมูลหรือไม่.....	55
50 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าจากการวัด.....	56
51 ผลต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากการวัดกับค่าจากการวิเคราะห์.....	56
52 เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer.....	57
53 ตำนานภายในต่างๆ ที่พบในสปีเนลธรรมชาติ.....	60

## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
54 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส S11.....	62
55 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 1.....	62
56 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SN 3.....	63
57 ปริมาณของโครเมียมและเหล็กในสปีเนลกลุ่มสีส้มแสดและแดงส้ม.....	65
58 ปริมาณของโครเมียมและเหล็กในสปีเนลกลุ่มสีส้มแสด แดงส้ม และแดงส้ม.....	66
59 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 13.....	67
60 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 19.....	67
61 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 22.....	68
62 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 23.....	68
63 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 25.....	69
64 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 30.....	69
65 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM 39.....	70
66 กราฟแสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี Ionoluminescence (IL) ซึ่งใช้เวลารับแสง 100 ms.....	71
67 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM1.....	74
68 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM1.....	75
69 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM2.....	76
70 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM2.....	77
71 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM3.....	78
72 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM3.....	78
73 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM5.....	79
74 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแสด รหัส SM5.....	80



## บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
102 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S17.....	101
103 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S17.....	101
104 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S20.....	102
105 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S20.....	103
106 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S10.....	104
107 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S13.....	105





# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญและมีส่วนช่วยแก้ปัญหาเศรษฐกิจของประเทศไทย ดังข้อมูลจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ สันค้ำอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศไทยมีมูลค่าการส่งออกสูง (604.50 ล้านบาทสหรัฐ) และอยู่ในอันดับต้นอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด (The Gem and Jewelry Institute of Thailand. 2012) อีกทั้งประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นศูนย์กลางการเพิ่มมูลค่าพลอยดิบโดยหลากหลายกระบวนการ เช่น โดยการใช้ความร้อน (gemstone heat treatment) หรือบางครั้งเรียกว่า การเผาพลอย/หุงพลอย นอกจากนั้นคือการเจียรไนพลอย (gemstone cutting) ซึ่งวิทยาการทั้งสองนี้ได้สร้างชื่อเสียงให้กับประเทศไทย จนเป็นรากฐานสำคัญของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยที่มีประวัตินับย้อนหลังไปได้หลายร้อยปี สามารถนำเงินเข้าประเทศได้เป็นจำนวนมาก การพัฒนาของอุตสาหกรรมนี้มีมาตั้งแต่ในอดีตจนได้ชื่อว่าเป็นประเทศไทยเป็นแหล่งพัฒนาพลอยที่สำคัญของโลก จนมีสถานภาพเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าการส่งออกพลอยสีอย่างไรก็ตามแม้ปัจจุบันวัตถุดิบพลอยสีภายในประเทศจะมีจำนวนน้อยลงไปมาก จนทำให้ต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด แต่ประเทศไทยก็ยังคงมีความมั่งคั่งในการเป็นแหล่งผลิตพลอยสีที่สำคัญของโลกได้ โดยเฉพาะพลอยเนื้อแข็งตระกูลคอรันดัม (ทับทิมและแซปไฟร์) อย่างไรก็ตามการขาดแคลนพลอย ทับทิมและแซปไฟร์ ขนาดใหญ่ คุณภาพดี ที่ต้องการเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้นยังคงเป็นอีกปัญหาใหญ่หนึ่งที่ต้องการให้แก้ไข ผู้ค้าอัญมณี จึงหันมาให้ความสนใจกับพลอยเนื้ออ่อนที่เริ่มมีมูลค่าและความนิยมที่เพิ่มมากขึ้น เช่น โทแพซ เซอร์คอน อะความารีน ทัวร์มาลีน ควอตซ์ และสปิเนล เป็นต้น ซึ่งพลอยเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ เหล่านี้ ได้มีการนำมาทดลองปรับปรุงคุณภาพและได้ผลลัพธ์ที่ดี ตลอดจนมีการศึกษาวิจัยในเชิงวิทยาศาสตร์มาก่อนข้างมาก ยกเว้นพลอยสปิเนล ซึ่งเป็นที่สำคัญในตลาดอัญมณีขณะนี้ พบว่าสปิเนลมีข้อมูลการศึกษาวิจัย ด้านการปรับปรุงคุณภาพน้อยมาก ทั้งที่ สปิเนลสีแดงสด คุณภาพดี มีความคล้ายกับทับทิมมากที่สุด ทั้ง แหล่งที่ พบ โทนาลี และตำหนิ ภายใน ซึ่งผู้ค้าอัญมณีให้ความสนใจมาใช้ทดแทนทับทิม หรือเป็นทางเลือกใหม่ให้แก่ผู้บริโภค โดยเฉพาะสีแดงสดที่มีน้ำหนักมากและมีตำหนิ น้อยจะมีมูลค่าสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ตัวอย่างพลอยสปิเนลสีแดงที่ก่อนหน้านี้ผู้คนส่วนใหญ่เข้าใจว่าเป็นทับทิมและมีชื่อเสียง เป็นที่รู้จัก (Cimnakpan. 2010) เช่น สปิเนลเม็ดใหญ่ที่สุดเท่าที่เคยพบมี

น้ำหนักถึง 520 กะรัต ปัจจุบันอยู่ในพิพิธภัณฑน์ British Gemmological Museum of London ส่วนเม็ดที่มีชื่อเสียงที่สุดคือ Timur Ruby ประดับในมงกุฎของกษัตริย์อังกฤษ (Crown Jewel of England) เป็นพลอยสปิเนลสีแดงที่ไม่ได้เจียรไน ตัดเหลี่ยมเพียง แต่ขัดเงาที่ผิว ซึ่งเดิมเป็นของ Tamelane ผู้ครองแคว้นมองโกล หลานของเจงกิสข่าน สลักชื่อเจ้าของเดิม ไว้เป็นภาษาอาระบิกที่ขอบพลอย ทำให้เป็นพลอยประวัติศาสตร์ที่น่าสนใจยิ่ง ส่วนสปิเนลที่เด่นอีกเม็ดหนึ่ง คือ Black Prince's Ruby เป็นสปิเนลสีแดงที่เข้าใจว่าเป็นทับทิมเช่นเดียวกับ Timur Ruby และได้จากแหล่งเดียวกัน คืออัฟกานิสถาน มีประวัติเล่าว่า Black Prince Ruby เม็ดนี้ King Henry นำมาสวม ใส่ออกรบในสงคราม 100 ปีของ Agincourt ส่วนสปิเนลเด่นๆ ที่น่าสนใจอีก ได้แก่ คอลเลกชันของ Crown Jewel of Iran ซึ่งเป็นสปิเนลสีแดง น้ำดีเยี่ยม น้ำหนักตั้งแต่ 100 - 500 กะรัต ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสปิเนลเป็น พลอยชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจและมี ศักยภาพทางการตลาดสูงขึ้น มาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันอาจเทียบเท่าทับทิม เพราะความต้องการซื้อสูงขึ้น อย่างไรก็ตามปัญหาของสปิเนลสีแดงคือ ต้นทางการผลิตจากเหมืองสปิเนลที่เป็นสีแดงสดมีจำนวนน้อย เช่น แหล่งจากโมกอก (Mogok) ประเทศพม่า ส่วนใหญ่มีสีไม่สด เนื่องจากมีสีอื่นเจือปนอยู่ เช่น สีแดงแกมส้ม สีแดงแกมน้ำตาล สีแดงแกมม่วงดำ สีชมพูแกมม่วง สปิเนลกลุ่มสีดังกล่าวจะมีมูลค่าทางการตลาดต่ำกว่าสปิเนลสีแดงสดมาก ซึ่งความอึดตัวของสีและความสะอาดเป็นคุณสมบัติสำคัญมากต่อมูลค่าของอัญมณี ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้สปิเนลได้สีที่อึดขึ้นและไม่มีสีรอง เช่น สีน้ำตาล รวมถึงลดปริมาณตำหนิ เพื่อหลังจากการเจียรไนแล้ว จะให้พลอยที่มีความสวยงาม ทั้งนี้การเจียรไนสปิเนลเป็นเรื่องยาก เนื่องจากมีความเปราะสูง แต่นักเจียรไนอัญมณีของประเทศไทยมีชื่อเสียงและมีฝีมือในด้านการเจียรไนอัญมณีเป็นอย่างมาก หากสามารถปรับปรุงคุณภาพ เพื่อให้พลอยสะอาดและมีสีที่เข้มสดจะทำให้เพิ่มมูลค่าขึ้นได้มาก

ในการปรับปรุงคุณภาพ พลอยดิบสปิเนล ส่วนใหญ่มักทำโดยการใช้ความร้อน เช่น การใช้ความร้อนกับสปิเนลสีแดงแกมม่วงและสีแดงแกมส้ม สามารถลดสีแกมม่วงของสปิเนลได้ ทำให้สปิเนลมีสีแดงเข้มสดมากขึ้น อย่างไรก็ตามวิธีการให้ความร้อนยังมีข้อจำกัด เช่น หากต้องการเปลี่ยนสีและให้มีการเปลี่ยนแปลงเชิงแสงที่ชัดเจน เช่น ให้สีเข้มสดขึ้น พลอยใส โปร่งแสง ต้องใช้ความร้อนสูงและระยะเวลาาน โดยเฉพาะ พลอยคุณภาพต่ำที่มีตำหนิประเภทฟองอากาศ หรือของเหลวซึ่งอาจทำให้พลอยแตกร้าว เนื่องจากการให้ความร้อนสูงกับพลอยโดยตรง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ต้องมีการศึกษาหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพ โดยที่ไม่มีความร้อนสูงเข้ามาเกี่ยวข้อง ในการศึกษาได้นำเทคนิคลำไอออนมาศึกษา ลักษณะเฉพาะของ พลอย สปิเนล และศึกษา การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ ทางแสงของสปิเนล เช่น สี และเพิ่มความใส สะอาดของเนื้อพลอย ด้วยการ

สลายตำหนิ ทั้งนี้ได้เลือกใช้วัตถุตัวอย่างเป็นพลอย สปิเนลคุณภาพต่ำจากแหล่งโมกอก เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และเงื่อนไขต่างๆ ในการใช้พลังงานจากลำไอออน ในระดับต่างๆ เปลี่ยนคุณสมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงแสงของพลอยสปิเนล เพื่อให้เป็นไปตามความต้องการของตลาดพลอย รวมถึงการเพิ่มมูลค่าให้สูงขึ้น

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของพลอยสปิเนลสีแดงธรรมชาติ เช่น ลักษณะตำหนิภายในสปิเนล สี ความเข้ม การอิมิตัว และวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี
2. วิเคราะห์ปริมาณธาตุหลัก และปริมาณธาตุร่องรอยในโครงสร้างที่เป็นสาเหตุของการเกิดสีในสปิเนลด้วยเทคนิคลำไอออน
3. ศึกษาการวิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสงของสปิเนลด้วยเทคนิคลำไอออน
4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณภาพ ของสปิเนลคุณภาพต่ำในโทนสีแดงอมน้ำตาลให้มีสีแดงสดขึ้น และมีเนื้อใสขึ้นโดยใช้ลำไอออน
5. ศึกษาการเพิ่มมูลค่าสปิเนล สีแดงอมน้ำตาล ให้มีคุณสมบัติทางแสงที่ดี เช่น ลดตำหนิ เพิ่มความสะอาด ความใส

### ขอบเขตของการวิจัย

1. จัดเตรียมสปิเนลจากแหล่งโมกอก (Mogok) ประเทศพม่าที่มีคุณภาพต่ำ ราคาถูก เช่น มีสีไม่สด เนื่องจากมีสีรองอื่นปนอยู่ และมีตำหนิชนิดต่างๆ
2. ทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างสี โดยใช้ระบบการประเมินคุณภาพสีของ GIA ซึ่งใช้พื้นฐานระบบสี Munsell
3. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ
4. ศึกษาการวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี และลักษณะตำหนิในสปิเนลธรรมชาติ
5. ใช้เทคนิค PIXE และ IL เพื่อวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสีแตกต่างกัน และรูปแบบการเปล่งแสงของสปิเนล
6. ทดลองปรับปรุงคุณภาพของสปิเนลด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน
7. เปรียบเทียบผลของสมบัติเชิงแสง ทั้งการทดลองก่อนและหลังการทำไอออนอิมพลานเตชัน



กิจกรรมและงาน	เดือนที่								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2. ตรวจสอบสมบัติทางแสง		↔							
3. ทำฐานข้อมูล เชื่อมโยงลักษณะภายนอก และธาตุร่องรอยที่มีอยู่ภายใน			↔						
4. ทดลองปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิค ไอออนอิมพลานเตชัน				↔					
5. สรุปผลการวิจัยและตีพิมพ์เผยแพร่				↔					

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ข้อมูลการศึกษาเชิงลึกของคุณสมบัติต่างๆ ของสปีเนลธรรมชาติ
2. ศึกษาการใช้เครื่องมือหรือเทคนิควิเคราะห์ขั้นสูง เช่น UV-Vis-NIR, PIXE และ IL
3. ผลการวิจัยสามารถตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารได้ และนำเสนอผลงานระดับชาติ
4. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน สำหรับการวางแผน การพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

### นิยามศัพท์เฉพาะ

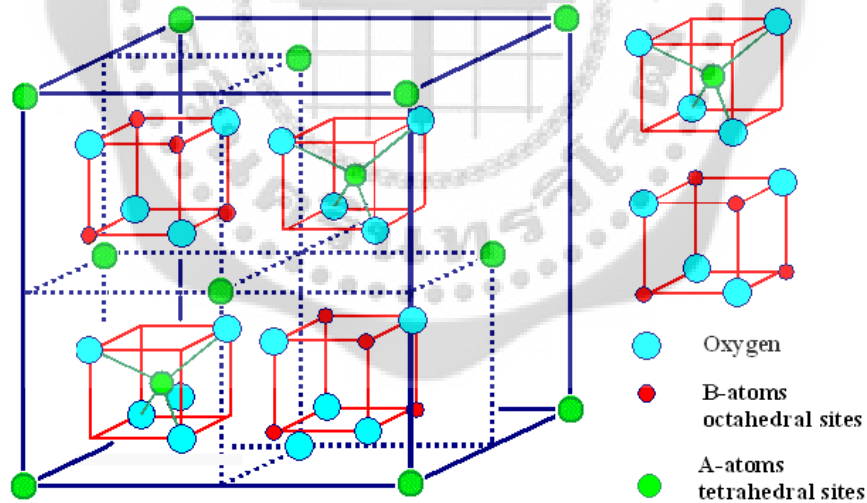
1. สมบัติทางกายภาพ หมายถึง น้ำหนัก ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ การเรืองแสง กลุ่มของสี ความสว่าง และระดับความอึมตัวของสี
2. สมบัติทางแสง หมายถึง สี ความใส และความสะอาด
3. เนื้อใส หมายถึง ปริมาณตำหนิภายใน พลอยลดลง ทำให้พลอยมีความใสและความสะอาดขึ้น
4. สีสด หมายถึง สีของอัญมณีมีความเข้มหรือความอึมตัวมากขึ้น
5. สีแดงแกมน้ำตาล หมายถึง กลุ่มสีแดงแกมส้ม (orangy red) ส้มแดง (red-orange) ส้มแกมแดง (reddish orange)

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ลักษณะทั่วไปของสปิเนล

สปิเนลเป็นแร่ในกลุ่มออกไซด์ (oxides) ที่มีแมกนีเซียม (Mg) และอะลูมิเนียม (Al) รวมตัวกับออกไซด์ มีสูตรเคมีเป็น  $MgAl_2O_4$  (แมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์) หรืออาจเขียนอีกแบบเป็น  $MgO \cdot Al_2O_3$  ประกอบด้วย MgO 28.2%,  $Al_2O_3$  71.8% อาจมี  $Fe^{2+}$ , Zn และ  $Mn^{2+}$  (เหล็กเฟอร์รัส สังกะสี และแมงกานีส) เข้าไปแทนที่ Mg บ้างแต่ไม่เสมอไป โครงสร้างแร่ในตระกูลสปิเนลประกอบด้วยออกซิเจน 32 อะตอม และ cation 24 อะตอม ใน 1 unit cell (แมกนีเซียม 8 อะตอม และอะลูมิเนียม 16 อะตอม) โดยมีการจัดเรียงตัวของอะตอมออกซิเจนแบบลูกบาศก์ (cubic closest packing) ซึ่งจะทำให้เกิดช่องว่างแบบชิดที่สุด 2 ช่อง คือ tetrahedral และ octahedral interstices โดยจะมีธาตุแมกนีเซียมเข้าอยู่ในตำแหน่ง tetrahedral และธาตุอะลูมิเนียมเข้าอยู่ในตำแหน่ง octahedral ดังในภาพประกอบ 1



$AB_2O_4$  spinel The red cubes are also contained in the back half of the unit cell

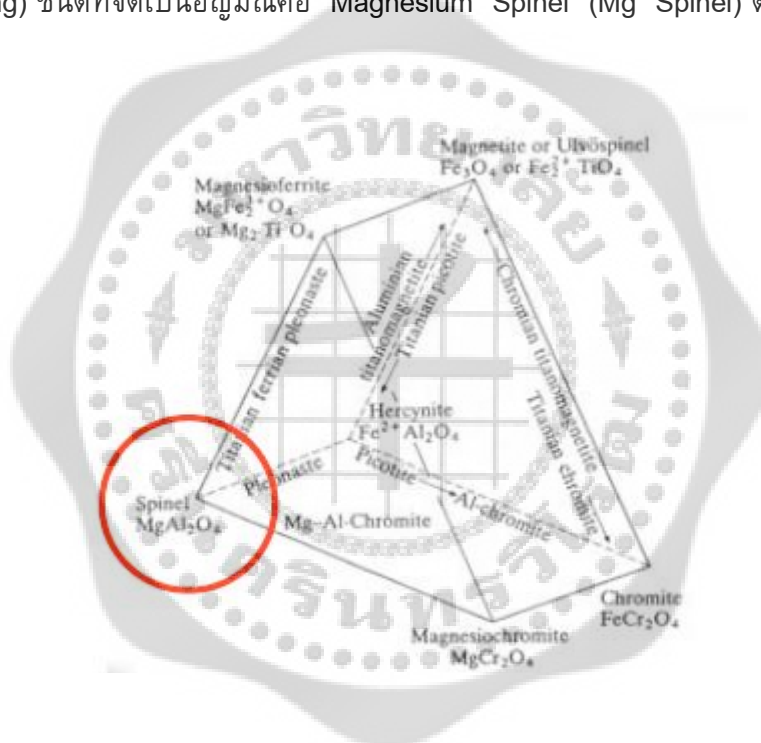
ภาพประกอบ 1 แสดงโครงสร้างผลึกของสปิเนล โดย A-atoms คือตำแหน่งของ  $Mg^{2+}$  และ B-atoms คือตำแหน่งของ  $Al^{3+}$  (Deer, Howie & Zussman. 1966)

ในโครงสร้างของสปิเนล จากการที่ไอออน  $Mg^{2+}$  มีขนาดใหญ่กว่าไอออนของออกซิเจน จึงทำให้ธาตุทรานซิชันหรือ cation อื่นที่ขนาดเล็กกว่า สามารถเข้ามาแทนที่ได้ง่าย นอกจากนี้ในส่วนของไอออน  $Al^{3+}$  ก็สามารถถูกแทนที่ด้วยธาตุทรานซิชันอื่นๆ ได้เช่นกัน โดย

A. ตำแหน่งของ  $Mg^{2+}$  สามารถถูกแทนที่ด้วย  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Co^{2+}$  หรือ  $Zn^{2+}$  และอาจถูกแทนที่ด้วย  $Cu^{2+}$  และ  $Ge^{2+}$

B. ตำแหน่ง  $Al^{3+}$  สามารถถูกแทนที่ด้วย  $Fe^{3+}$  หรือ  $Cr^{3+}$  และอาจถูกแทนที่ด้วย  $V^{3+}$  ได้

แร่กลุ่มสปิเนล แบ่งได้เป็นส่วนประกอบสุดท้ายหลายชนิด แต่สปิเนลที่มีคุณสมบัติเป็นอัญมณีมีส่วนประกอบใกล้เคียงกับ  $MgAl_2O_4$  มีอะตอมของออกซิเจนจับตัวกันแน่นแบบลูกบาศก์ (cubic closed packing) ชนิดที่จัดเป็นอัญมณีคือ Magnesium Spinel (Mg Spinel) ดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แสดงส่วนประกอบแร่กลุ่มสปิเนล (Swiss Gemmological Institute. 2010)

สปิเนลมีรูปผลึกอยู่ในระบบสามแกนเท่า (isometric) หรือ cubic มักมีรูปผลึกแบบทรงแปดหน้า (octahedral) หรืออาจพบเป็นผลึกทรงสิบสองหน้า (dodecahedral) ที่มีขนาดเล็ก หรือผลึกแฝดสปิเนล (spinel twin) แบบ contact twin ดังแสดงในภาพประกอบ 3-5 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แสดงรูปผลึกทรงแปดหน้าของสปีเนล (Swiss Gemmological Institute. 2010)



ภาพประกอบ 4 แสดงรูปผลึกทรงสิบสองหน้าของสปีเนล (Swiss Gemmological Institute. 2010)



ภาพประกอบ 5 แสดงรูปผลึกแปดของสปีเนล (Swiss Gemmological Institute. 2010)

สปีเนลมีระดับความแข็งเท่ากับ 8 ตามมาตรฐานความแข็งของโมส์ (Moh's scale) สีผงเป็นสีขาว ความถ่วงจำเพาะ 3.5 - 4.1 มีความวาวคล้ายแก้ว (vitreous) ไม่แสดงแนวแตกเรียบ มีรอยแตกแบบก้นหอย (conchoidal fracture) มีความโปร่งใสจนเกือบทึบแสง (transparent to opaque) สปีเนลมีคุณสมบัติทางแสงแบบหักเหเดี่ยว มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ 1.710 - 1.735 การกระจายแสงต่ำ (0.02)



การเรืองแสง สปิเนลสีแดงและสีชมพูเรืองแสงสีแดงเล็กน้อยถึงปานกลางในช่วงคลื่นสั้น และเรืองแสงเป็นสีแดงเข้มในช่วงคลื่นยาว สปิเนลสีน้ำเงินเข้ม ไม่เรืองแสง ทั้งในช่วงคลื่นสั้นและคลื่นยาว สปิเนลสีม่วง ไม่เรืองแสงในช่วงคลื่นสั้น และเรืองแสงสีส้มถึงสีแดงในช่วงคลื่นยาว

### 1.1 การเกิดสีของสปิเนล (Nassau, 1978)

การเกิดสีต่างๆ ในสปิเนล มีสาเหตุเกิดจากธาตุโลหะทรานซิชันต่างๆ เข้าไประหว่างกระบวนการการเติบโตของผลึก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สปิเนลมีสีที่แตกต่างกัน โดยกลไกการเกิดสีจากโลหะทรานซิชันเหล่านี้ สามารถศึกษาได้โดยใช้เครื่องมือทางด้านสเปกโทรสโกปี โดยมีทฤษฎีที่สามารถอธิบาย ได้แก่ ทฤษฎีสนามผลึก (crystal field theory) และ/หรือ ทฤษฎีการถ่ายเทประจุ (charge transfer transition)

ทฤษฎีสนามผลึก อธิบายสาเหตุการเกิดสีของสปิเนลว่า เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนของธาตุทรานซิชัน ในชั้น 3d-orbital เช่น  $\text{Cr}^{3+}$  และ/หรือ  $\text{Fe}^{2+}$  เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานใน d- และ f-orbital ซึ่งมีการบรรจุอิเล็กตรอนไม่เต็ม เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานจากชั้น ground state ไปยัง excited state แล้วปล่อยพลังงานออกมาเป็นสีที่ตามนุษย์สามารถเห็นได้

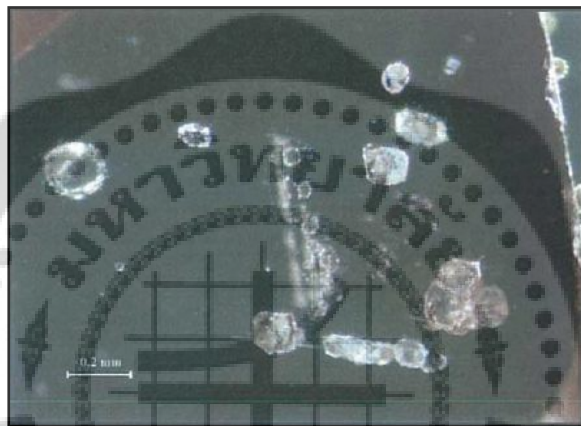
ทฤษฎี charge transfer transition ได้อธิบายสาเหตุการเกิดสีของสปิเนลว่า เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนย้ายจากอะตอมหนึ่งไปยังอะตอมอีกตัวหนึ่ง ซึ่งมีเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ต่างกัน โดยอะตอมนั้นอยู่ติดกัน หรืออยู่ถัดออกไปอีกตัวหนึ่ง เช่น การเกิดสีน้ำเงินในสปิเนลเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง  $\text{Fe}^{2+}$  ที่ตำแหน่ง octahedral site และ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ตำแหน่ง tetrahedral site โดยข้ามผ่านอะตอมของออกซิเจน ( $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$ )

สาเหตุการเกิดสีต่างๆ ของสปิเนล ที่เกิดจากธาตุทรานซิชันต่างๆ สรุปดังนี้

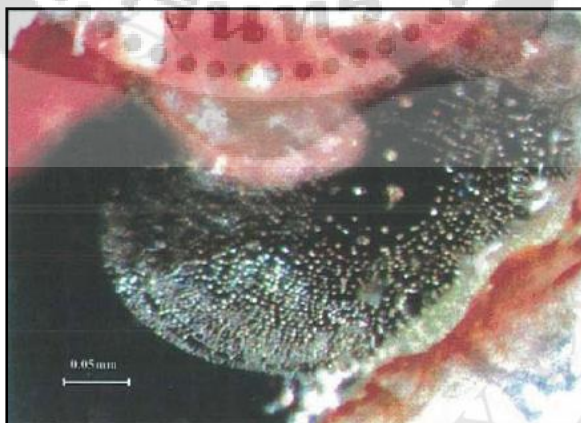
- สีแดง สีชมพู เกิดจากธาตุ  $\text{Cr}^{3+}$  เข้าไปแทนที่ Al
- สีม่วง เกิดจากธาตุ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้าไปแทนที่ Mg ถ้ามี  $\text{Cr}^{3+}$  ร่วมด้วย
- สีน้ำเงิน เกิดจากธาตุ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้าไปแทนที่ Mg ถ้ามี  $\text{Co}^{2+}$  ร่วมด้วย จะมีสีน้ำเงินสด
- สีเขียว เกิดจากธาตุ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้าไปแทนที่ Mg
- สีส้ม สีเหลือง เกิดจากธาตุ  $\text{Fe}^{3+}$  เข้าไปแทนที่ Al ถ้ามี  $\text{Cr}^{3+}$  ร่วมด้วย
- สีดำ เกิดจากธาตุ  $\text{Fe}^{2+}$  เข้าไปแทนที่ Mg จนหมด

## 1.2 ลักษณะตำหนิภายใน

ลักษณะตำหนิภายในที่พบในสปีเนล มีลักษณะเป็นตำหนิรอยแตกกร้าวภายใน ตำหนิของแข็งล้อมรอบด้วยรอยแตก ที่อาจแสดงการเล่นสี แต่ตำหนิที่พบบ่อยที่สุดคือ ตำหนิของแข็งรูป octahedral อาจพบแร่อื่นๆ เป็นตำหนิของแข็งได้หลายชนิด เช่น สปีเนล แคลไซต์ โดโลไมต์ หรือ อะพาไทต์ เป็นต้น บางครั้งพบตำหนิของแข็งรูป octahedral เรียงตัวกันมีลักษณะคล้ายรอยนิ้วมือ ตำหนิที่พบบ่อยอีกชนิดหนึ่งคือ ตำหนิแผ่นฟิล์มบางซึ่งมักมีแร่เหล็กที่ปนเปื้อนเป็นคราบอยู่ มักเกิดร่วมกับผลึก octahedral ขนาดใหญ่ ตำหนิที่ล้อมรอบด้วยคราบสีน้ำตาล มีลักษณะคล้ายขนนก



ภาพประกอบ 6 แสดงตำหนิของผลึกสปีเนลรูป octahedral (Bunnag, 2004)



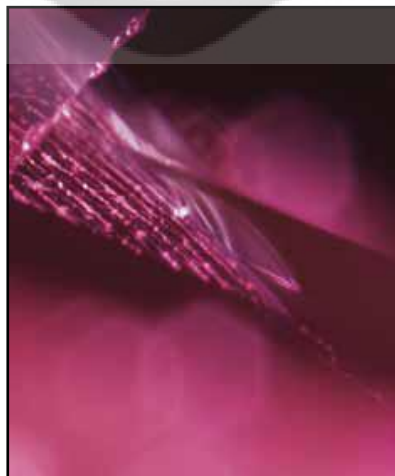
ภาพประกอบ 7 แสดงตำหนิคล้ายรอยนิ้วมือในสปีเนล (Bunnag, 2004)



ภาพประกอบ 8 แสดงตำหนิรอยแตกร้าวภายในของสปีเนล (Bunnag. 2004)



ภาพประกอบ 9 แสดงกลุ่มตำหนิของแข็งภายในของสปีเนล (Smith. 2012)

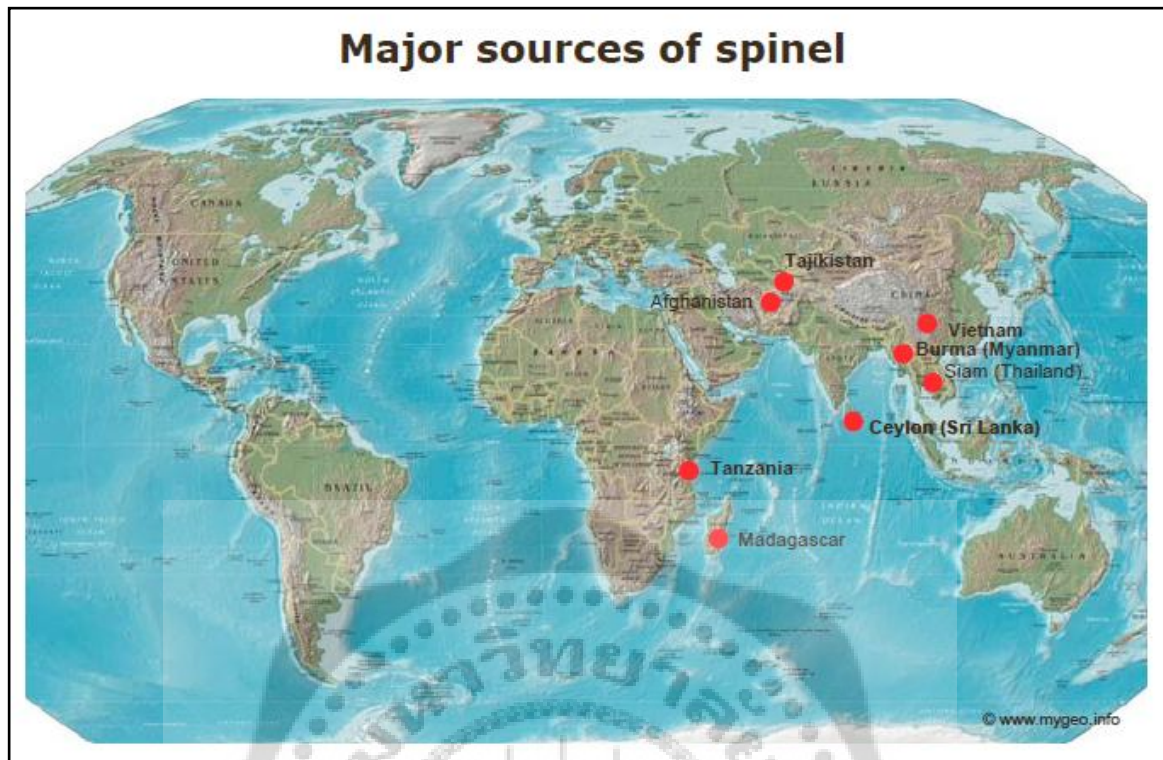


ภาพประกอบ 10 แสดงตำหนิรอยแตกรูปร่างคล้ายขนนก (Smith. 2012)

## 2. แหล่งที่พบสปีเนล (Cimnakpan. 2010)

สปีเนลเกิดอยู่ในหลายแห่งของโลก แต่ละแห่งสัมพันธ์กับกระบวนการทางธรณีวิทยาแบบต่างๆ ดังนี้ แหล่งแบบปฐมภูมิเป็นแร่ในแนวการแปรสัณฐาน (contact metamorphic mineral) ในหินปูน (limestone) สามารถพบเกิดร่วมกับแร่เซอร์เพนทีน (serpentine) และคอร์รันดัม (corundum) แหล่งแบบทุติยภูมิ พบว่าสปีเนลมีคุณภาพดี ได้จากการถูกกระบวนการทางธรณีวิทยา ทำให้เกิดการสะสมตัวของสปีเนลในตะกอน น้ำพา (alluvial deposits) แหล่งสปีเนลที่พบในประเทศต่างๆ แสดงในภาพประกอบ 11 ได้แก่

- แหล่งโมกอก ประเทศพม่า (Mogok, Myanmar) เป็นแหล่งที่สำคัญ พบในหินอ่อนและแหล่งตะกอนน้ำพา สามารถพบได้ทั้งที่เป็นผลึกสมบูรณ์ในทุกขนาด ก้อนขนาดใหญ่ไปถึงขนาดเล็ก หรืออาจเป็นชิ้นส่วนที่แตกหัก มีหลายโทนสี แต่ที่มีคุณภาพดีจะเป็นสีแดง สีส้มและสีชมพู สปีเนลสีแดงจากแหล่งนี้จะมีโครเมียม (Cr) สูงกว่าแหล่งอื่นๆ จึงทำให้มีสีแดงเข้มกว่า
- ประเทศศรีลังกา (Sri Lanka) พบในชั้นตะกอนน้ำพา มีหลายสี แต่สีที่มีคุณภาพดีที่สุดคือสีน้ำเงินและสีม่วง
- หุบเขาฮานซาประเทศปากีสถาน (Hansa Valley, Pakistan) พบเป็นเมทริกซ์ (matrix) ของหินคาร์บอเนตสีขาว (white carbonate rock) สีที่พบได้แก่ สีชมพู และสีน้ำเงิน
- ประเทศมาดากัสการ์ (Madagascar) พบในแหล่งตะกอนน้ำพา และจะเกิดร่วมกับเขตหินสการ์น (skarn area) ในแหล่งสะสมตัวของแซปไฟร์ (sapphire deposits) สีที่พบคือ สีน้ำเงิน
- ประเทศทาจิกิสถาน (Tajikistan) พบในหินอ่อนสีขาว บริเวณเทือกเขา Pamir Range สีที่มีคุณภาพดีคือ สีชมพูและสีแดง
- ประเทศอัฟกานิสถาน (Afghanistan) พบในแหล่งสะสมตัวของคอร์รันดัม (corundum deposits)
- ประเทศไทย (Thailand) สปีเนลที่พบในประเทศไทยเป็นสปีเนลสีดำ พบร่วมกับคอร์รันดัมในแหล่งตะกอนน้ำพา บริเวณจังหวัดจันทบุรี ตราด แพร่ และกาญจนบุรี
- ประเทศแทนซาเนีย (Tanzania) พบร่วมกับคอร์รันดัมในแหล่งตะกอนน้ำพา บริเวณ Uмба Valley
- แหล่ง Luc Yen ประเทศเวียดนาม (Vietnam) พบในหินอ่อนสีขาว

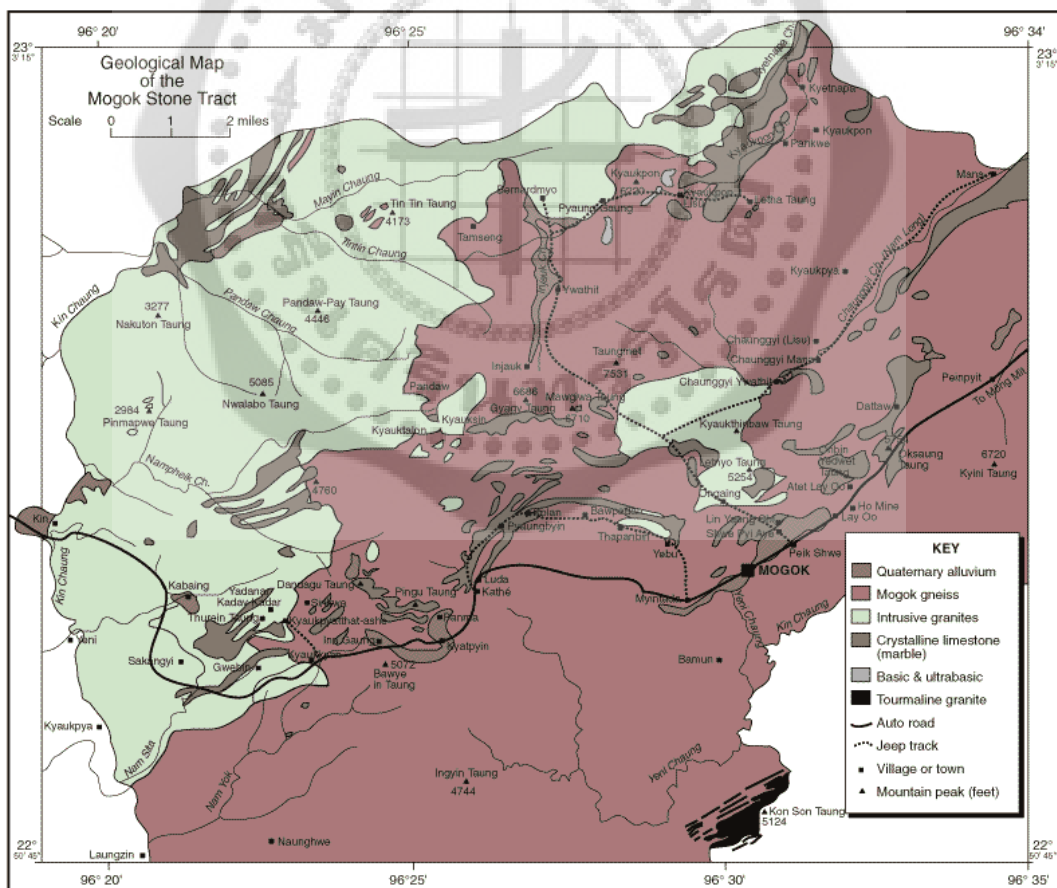


ภาพประกอบ 11 แผนที่แสดงแหล่งที่พบสปิเนล (Swiss Gemmological Institute. 2010)

### 3. ธรณีวิทยาแหล่งโมกก

สำหรับแหล่งพลอยที่สำคัญและนำมาศึกษาในครั้งนี้มาจากแหล่งโมกก ลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งพลอยนี้อยู่ในบริเวณแนวหินแปรโมกก ( Mogok metamorphic belt) ซึ่งมีความยาวมากกว่า 1450 กิโลเมตร และกว้างกว่า 40 กิโลเมตร ประกอบด้วยหินแปรและหินแกรนิตที่วางตัวอยู่ทางตอนใต้ของที่ราบสูงฉาน ( Shan plateau) หินที่พบบริเวณพื้นที่โมกกจึงมีความหลากหลาย ส่วนใหญ่ประกอบด้วย หินอ่อนที่มีแร่สปิเนลซึ่งมีต้นกำเนิดจากหินตะกอนช่วงอายุโพรเทอโรโซอิก (Proterozoic) มีช่วงเวลา 2,500-570 ล้านปี ก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการชนกันของอนุทวีปในช่วงครีเตเชียส ( Cretaceous) ช่วงอายุตั้งแต่ 140-66.4 ล้านปี และช่วงเทอร์เชียรี (Tertiary) มีช่วงอายุตั้งแต่ 66.4 –1.6 ล้านปี แร่ที่พบในหินอ่อนนอกจากสปิเนล ( spinel) และแคลไซต์ ( calcite) แล้ว ยังพบแกรไฟต์ ( graphite) มัสโคไวต์ ( muscovite) และไพไรต์ ( pyrite) (Harlow; et al. 2006) หินอ่อนนี้มีการหาอายุจากแรฟโกลิไทต์ ( phlogopite) ได้อายุประมาณ 18.7 ล้านปี (Garnier; et al. 2006) ซึ่งคาดว่าเป็นอายุของการแปรสภาพครั้งสุดท้ายในบริเวณนี้ นอกจากนี้หินอ่อนแล้วยังพบหินชีสต์ (schist) และสายแร่ควอตซ์ ( quartz) แทรกตัดเข้ามาในหินอ่อนด้วยหิน

ไนส์ (gneiss) ซึ่งมีองค์ประกอบหลากหลาย โดยรวมเรียกว่า Mogok gneiss (ภาพประกอบ 12) มีลักษณะผลึกหยาบเป็นหิน silimanite-garnet gneiss พบหิน calc-silicate และหินอัลตราเมฟิก (ultramafic) ได้แก่ dunite, harzburgite และ chromitite โดยหินอัลตราเมฟิกเหล่านี้ บางส่วนถูกตัดด้วยสาย pegmatite vein และ graphic granite dyke ส่วนหิน nepheline syenite พบเป็นลักษณะหินอัคนีแทรกซอนขนาดเล็ก (Mitchell; et al. 2007) หินแกรนิตในบริเวณนี้มีการหาอายุด้วยวิธี  $Ar^{40}/Ar^{39}$  จากแร่ไบโอไทต์ (biotite) ได้อายุ 15.8 ล้านปี และจากแร่ไบโอไทต์ในหินแปรได้อายุประมาณ 19.5-16.5 ล้านปี (Bertrand; et al. 2001) จากการหาอายุด้วยวิธี U-Pb ของแร่เซอร์คอน (zircon) ได้อายุประมาณ 32-31 ล้านปี (Yui; et al. 2008) ซึ่งมีอายุแก่กว่าการแปรสภาพครั้งสุดท้ายและหินแกรนิตที่แทรกดันขึ้นมา นอกจากนี้หินคาร์บอนเนตอายุแคมเบรียน -ดีโวเนียน-ครีเทเชียสตอนต้น พบมีโครงสร้างการโค้งงอ ( fold) วางตัวอยู่ในแนวตะวันออกเฉียงเหนือ และมุมเอียงเทอยู่ในทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Mitchell; et al. 2007)



ภาพประกอบ 12 แผนที่แสดงลักษณะธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่โมกกและพม่าตอนบน (Hughes. 1997)



ภาพประกอบ 13 สปิเนลที่พบในหินอ่อนจากแหล่งโมกก

ที่มา: <http://www.minfind.com>

การเกิดแร่สปิเนลในบริเวณนี้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ กระบวนการที่เกิดจากภายในเปลือกโลก (Endogenic Process) และกระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวโลก (Exogenic Process) กระบวนการที่เกิดจากภายในเปลือกโลก จะพบสปิเนลมีการสะสมตัวแบบปฐมภูมิ โดยมีกระบวนการค่อนข้างซับซ้อน ทั้งกระบวนการแปรสภาพ (metamorphism) สัมผัสกับหินอ่อน การแทรกดันของหินอัคนี (igneous intrusion) และปฏิกิริยาสการ์น (skarn reaction) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลส่วนใหญ่บ่งชี้ว่าสปิเนลที่เกิดขึ้น น่าจะมาจากกระบวนการแปรสภาพขั้นสูง (high-grade metamorphism) ที่อุณหภูมิ 600-650 องศาเซลเซียส และความดัน 4.5 kb และจากข้อมูลความสัมพันธ์ของหินแปรและหินอัคนีบริเวณพื้นที่นี้ พบว่ามีการเกิดกระบวนการแปรสภาพ 2 ครั้ง โดยเกิดขึ้นในยุคจูแรสสิกตอนต้น (Early Jurassic regional metamorphism) และอีกครั้งในช่วงอายุเทอร์เชียรีตอนต้น (Early Tertiary metamorphism) โดยกระบวนการแปรสภาพขั้นสูงนี้น่าจะเกิดในช่วงที่มีการชนกันของแผ่นอินเดียนและยูเรเชีย เมื่อ 65-55 ล้านปี และถูกแทรกดันด้วยหินอัคนีแทรกซอน ซึ่งพบว่าเป็น hornblende syenite และ leucogranite ในช่วงระหว่าง 35-23 ล้านปี ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดแนวหินแปรแม่น้ำแดง (Red River metamorphic belt) ในประเทศเวียดนาม ช่วงอายุ Eocene-Oligocene ถึงช่วงอายุ Miocene (Barley; et al. 2003) ส่วนใหญ่พบสปิเนลในหินอ่อนที่ถูกล้อมรอบด้วยหิน aluminous gneiss และ granulites ซึ่งถูกตัดด้วยหินแกรนิต แต่พบว่าแกรนิตนี้ไม่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดสปิเนลในบริเวณนี้ ส่วนกระบวนการที่เกิดขึ้นที่ผิวโลก จะพบสปิเนลมีการสะสมตัวแบบทุติยภูมิ โดยจะพบสปิเนลที่ถูกพัดพามาสะสมตัวอยู่ในแหล่งสะสมตะกอนน้ำพา (alluvial deposits) เหมือนพลอยในบริเวณนี้มักทำในแหล่งสะสมตัวแบบทุติยภูมิเป็น

ส่วนใหญ่ คือ จากตะกอนแม่น้ำ แต่แหล่งสะสมตัวแบบนี้มีไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะอยู่ทางใต้ของ โมงกประมาณ 13 กิโลเมตร จึงจำเป็นที่จะต้องขยายการทำเหมืองไปในบริเวณที่เป็นแหล่งสะสมตัว แบบปฐมภูมิ คือ แหล่งสะสมในหินอ่อน แหล่งพลอยที่เป็นแบบตะกอนน้ำพา นั้นมีการเรียกตาม ภาษาท้องถิ่นว่าไบออน (byon) ภาพประกอบ 14 ไบออนนี้เกิดจากการกัดกร่อนของหิน โดยน้ำหรือ ลม พลอยที่พบบริเวณนี้จึงมีลักษณะเรียบ และมักพบในบริเวณดินกรวด ที่ความลึกประมาณ 20-100 ฟุต



ภาพประกอบ 14 การทำเหมืองแหล่งพลอยที่เป็นแบบตะกอนน้ำพา

ที่มา: <http://http://raresource.com>

#### 4. การปรับปรุงคุณภาพพลอย

การเพิ่มคุณภาพโดยการใช้ความร้อน หรือเรียกว่าการเผาพลอยเป็นกรรมวิธีที่สำคัญและ จำเป็นมากในวงการอุตสาหกรรมอัญมณี ทั้งนี้กระบวนการกับสภาวะบรรยากาศ เป็นตัวแปรสำคัญ ในการสร้างความเปลี่ยนแปลงของสีให้กับ พลอย ทั้งนี้เพื่อพัฒนาพลอยชนิดต่างๆ ให้มีสีสดสวยและมีเนื้อใสสะอาดขึ้น โดยส่วนใหญ่ในธรรมชาติ พลอยที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผาเพื่อเพิ่มคุณภาพมัก มีสีไม่สวยและเนื้อไม่ใสสะอาด ดังนั้นการเผาพลอยหรือการหุงพลอย จึงเป็นกรรมวิธีที่ช่วยเพิ่ม มูลค่าพลอย อีกทั้งยังเป็นที่ยอมรับในตลาดการค้า พลอยทั่วโลกอีกด้วย โดยไม่ถือว่าเป็นการทำ เทียมหรือหลอกหลวงผู้ซื้อ เนื่องจากจะเป็นการเปลี่ยนแปลงแบบถาวร ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ ความ



ร้อนแก่พลอย อุณหภูมิสูง มากกว่า 1000 องศาเซลเซียส จะทำให้ธาตุโลหะทรานซิชันเกิดการเคลื่อนย้ายตำแหน่งที่อยู่ หรือเกิดการเปลี่ยนประจุ (oxidation state) เช่น สีแดงของสปีเนลเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr) เข้าไปแทนที่ธาตุอะลูมิเนียม (Al) ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งสีแดงที่เห็นอาจมีสีอื่นปน ได้แก่ สีแดงแกมส้ม สีแดงแกมม่วง สีรองที่เข้ามาปนดังกล่าว อาจเกิดจากการที่สปีเนลนั้นมีปริมาณธาตุเหล็กอยู่ในรูปของ  $Fe^{2+}$  ปนอยู่ในโครงสร้างด้วย ดังนั้นวิธีการเผา สปีเนลสีแดงให้มีสีที่สดแดงยิ่งขึ้น จึงไม่ใช้การเผาเพื่อเพิ่มปริมาณธาตุโครเมียม (ธาตุโครเมียมที่อยู่ในรูปของ  $Cr_2O_3$  มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก) แต่เป็นการเผาเพื่อให้ธาตุเหล็กที่ปนอยู่มีการเปลี่ยนประจุจากไอออน  $Fe^{2+}$  เปลี่ยนเป็นไอออน  $Fe^{3+}$  ทำให้ธาตุเหล็กดังกล่าวไม่มีผลต่อสี หลักคือสีแดงของพลอย แต่จะมีผลต่อสีรองคือไม่ทำให้เกิดเป็นสีน้ำเงินให้สีพลอยเป็นสีแดงอมม่วง แต่จะเป็นสีแดงอมส้ม ทำให้พลอยเม็ดนั้นจึงมีสีแดงที่ชัดและมีความสดสว่างมากขึ้น

ในงานวิจัยของ Chopelas; & Hofmeister. (1991) ได้กล่าวว่า โครงสร้างของสปีเนล ( $MgAl_2O_4$ ) ในธรรมชาติมีแนวโน้มที่จะมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ (order) แต่เมื่อเผาสปีเนล โดยให้อุณหภูมิประมาณ 670 องศาเซลเซียส โครงสร้างภายในของสปีเนลจะมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (disorder) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแคตไอออนระหว่างตำแหน่ง octahedral site และ tetrahedral site ขณะที่โครงสร้างของสปีเนลสังเคราะห์จะมีการจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการสังเคราะห์

ในงานวิจัยของ Nassau. (1994) ได้กล่าวว่า เมื่อนำสปีเนลสีม่วงและสีชมพูมาเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส สปีเนลดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แต่สีจะกลับมาเป็นเหมือนเดิมเมื่อพลอยเย็นตัวลง ขณะที่สปีเนลสีน้ำเงินจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งสีดังกล่าวจะคงทน

ในงานวิจัยของ กนต์พจน์ ทองแถม. (2009) ได้ทำการศึกษาผลของการเผาต่อคุณลักษณะของสปีเนลโดยใช้เทคนิครามาน อีเอสอาร์ (ESR technique) และการดูดกลืนเชิงแสง พบว่าความกว้างของพีครามานในโหมด Eg แสดงให้เห็นว่าการเกิดความเป็นระเบียบของไอออนบวกในสปีเนลเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส โดยกระบวนการเกิดความเป็นระเบียบนั้นมีสองรูปแบบคือ การสลับตำแหน่งของ Fe กับ Mg และ Al กับ Mg การศึกษาโดยเทคนิคอีเอสอาร์แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงสถานะประจุของ  $Cr^{3+}$  และ  $Mn^{2+}$  ภายหลังจากการเผา จากการวัดการดูดกลืนแสงและดัชนีสีแสดงให้เห็นถึงการลดลงของแถบการดูดกลืนเนื่องจาก  $Fe^{3+}$  และคู่  $Fe^{3+}-Fe^{2+}$  ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของสีฟ้าในตัวอย่างสปีเนล นอกจากนั้นแล้วเนื่องจากการบิดเบี้ยวไปเชิงโครงสร้าง

ทำให้ peak การดูดกลืนเนื่องจากการทรานซิชัน  $^4A_{2g} \rightarrow ^4T_{2g}$  ของ  $Cr^{3+}$  เลื่อนไปความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเผาที่ 800 องศาเซลเซียส

ในงานวิจัยของ บุญทวี ศรีประเสริฐ; และคณะ. (2009) ได้ทำการศึกษาการเผาสปีเนลสีแดงแกมม่วง และสีแดงแกมส้ม ในสภาวะบรรยากาศออกซิไดซิง และสภาวะบรรยากาศรีดิวซิง ที่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ความร้อนกับสปีเนลสีแดงแกมม่วง และสีแดงแกมส้มในสภาวะบรรยากาศออกซิไดซิง เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง สามารถลดสีแกมม่วง ทำให้สปีเนลมีสีแดงเข้มสดมากขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ที่ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส สีของสปีเนลที่ได้จากการใช้ความร้อนจะมีความสวยงามและคงทนในสภาวะปกติ ในสภาวะบรรยากาศรีดิวซิง สปีเนลไม่มีการเปลี่ยนสีและมีเนื้อขุ่นมากขึ้น

งานวิจัยของ Saeseaw; et al. (2009a) ได้ทำการศึกษาสปีเนลสีชมพู และสีแดงจากประเทศแทนซาเนียบางเม็ดสามารถเผาเพื่อให้มีสีที่ดีขึ้นได้ จากการทดลองเผาสปีเนลจำนวน 5 ตัวอย่างจากประเทศแทนซาเนียที่อุณหภูมิ 1,100 ถึง 1,700 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศออกซิไดซิง พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีในทางที่ดีขึ้น แต่สีของสปีเนลกลับมีสีเข้มมีดมากขึ้น

งานวิจัยของ Saeseaw; et al. (2009b) ได้ทำการศึกษาสปีเนล 100 ตัวอย่างจากประเทศแทนซาเนีย ทาจิกิสถาน พม่า และศรีลังกา โดยใช้อุณหภูมิ 250 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่าสปีเนลส่วนใหญ่มีเนื้อพลอยที่ใสสะอาดขึ้นเมื่อทำการเผาอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 950 ถึง 1,150 องศาเซลเซียส โดยการเผาสปีเนลที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงดังกล่าว สีและมลทินภายในสปีเนลมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ในงานวิจัยของ Cimnakpan. (2010) ได้ทำการศึกษาวิจัยการเพิ่มคุณภาพสปีเนลด้วยความร้อน ตัวอย่างพลอยที่เข้ามาจากแหล่งต่างๆ คือ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ อ.แม่สาย จ.เชียงราย อ.แม่สอด จ.ตาก โดยใช้กระบวนการเผาที่แตกต่างกัน 4 รูปแบบ คือ แบบที่ 1. ใช้เตาไฟฟ้ากับเบ้าอลูมินา แบบที่ 2. ใช้เตาไฟฟ้ากับเบ้าอลูมินาชั้นในและเบ้าแกรไฟต์ชั้นนอก แบบที่ 3. ใช้เตาไฟฟ้ากับเบ้าอลูมินาชั้นนอกและเบ้าแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรตชั้นใน และแบบที่ 4. ใช้เตาก๊าซกับเบ้าแคลเซียมซัลเฟตฮีโมไฮเดรต โดยกระบวนการเผาทั้ง 4 แบบ ใช้อุณหภูมิในการเผา  $900^{\circ}C$  ในสภาวะแบบออกซิเดชัน เป็นระยะเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าหลังการเผาสปีเนลส่วนใหญ่มีความอึดตัวและมีระดับโทเนสอ่อนลง มีอัตราการเปลี่ยนเป็นสีแดงไม่แน่นอน และมีความถ่วงจำเพาะ ลักษณะทางแสง ลักษณะภายในไม่แตกต่างกันมากนัก

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าการวิเคราะห์ และปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิคลำไอออนกับคอร์ันดัมซึ่งเป็น พลอยเนื้อแข็งให้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับ พลอยได้

(saweat. et al. 2009) แต่ยังไม่มีการใช้เทคนิคการปรับปรุงคุณภาพด้วยการใช้ลำไอออน มาประยุกต์ใช้กับสปีเนลซึ่งเป็นพลอยเนื้ออ่อน (สปีเนลมีระดับความแข็งเท่ากับ 8 ตามมาตรฐานความแข็งของโมห์ (Moh's scale) ซึ่งจัดว่าเป็นพลอยเนื้ออ่อน ส่วนคอรัันดัม มีระดับความแข็งเท่ากับ 9 จะจัดว่าเป็นพลอยเนื้อแข็ง)

## 5. ลักษณะทางสเปกโทรสโกปีของสปีเนล (UV-Vis spectroscopy)

งานวิจัยของ Bunnag; & Thanasuthipitak. (2003) ได้ศึกษา UV-Vis-NIR spectroscopy ของสปีเนลจากแหล่งโมกก ประเทศพม่า พบว่าสปีเนลสีแดงแสดงการดูดกลืนของ  $Cr^{3+}$  (octahedral coordination) ที่ตำแหน่งประมาณ 388, 415 และ 540 nm ขณะที่สปีเนลสีน้ำเงินอมเขียว และสปีเนลสีม่วงแสดงการดูดกลืนของ  $Fe^{2+}$  (tetrahedral coordination) ที่ตำแหน่ง 371, 383, 457, 559 และ 659 nm และแสดงการดูดกลืนของ  $Fe^{2+} / Fe^{3+}$  charge transfer ที่ตำแหน่งประมาณ 912-925 nm

งานวิจัยของ Peretti; & Gunther. (2003) ได้ศึกษา UV-Vis spectroscopy ของสปีเนลจากแหล่ง Namya ประเทศพม่า พบว่าสปีเนลสีม่วงถึงสีเขียวแสดงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 630-650, 550-565, 460, 378 และ 373 nm สปีเนลสีน้ำตาลถึงสีส้มแดงแสดงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 550 nm และสปีเนลสีชมพูถึงแดงแสดงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 538 และ 391 nm

งานวิจัยของ (Smith; et al. 2008) ได้ศึกษา UV-Vis spectroscopy ของสปีเนลจากประเทศเวียดนาม พบว่าสปีเนลสีแดงถึงชมพูแสดงการดูดกลืนที่ชัดเจน โดยแสดงสเปกตรัมเป็นแถบกว้างที่ตำแหน่งประมาณ 388 และ 540 nm มี shoulder ที่ประมาณ 415 nm ซึ่ง peak ดังกล่าวเป็นผลจาก  $Cr^{3+}$  ในตำแหน่ง octahedral coordination ซึ่งให้ผลตรงกับการทดลองของ Bunnag and Thanasuthipitak (2003) ในขณะที่สปีเนลสีม่วงถึงน้ำเงินแสดงการดูดกลืนของ  $Co^{2+}$  ที่ตำแหน่ง 550, 585 และ 625 nm และการดูดกลืนของ  $Fe^{2+}$  ที่ตำแหน่ง 370, 385, 455, 477 และ 555 nm

ในงานวิจัยของ บุญทวี ศรีประเสริฐ ; และคณะ. (2009) ได้ทำการศึกษา UV-Vis spectroscopy ของสปีเนลจากประเทศพม่า พบว่าสปีเนลสีแดงถึงสีแดงอมม่วงที่ผ่านการเผามาแล้วแสดงการดูดกลืนของ  $Cr^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 390 และ 545 nm และแสดงการดูดกลืนของ  $Fe^{2+}$  ที่ตำแหน่ง 372 nm

งานวิจัยของ Saeseaw; et al. (2009b) ได้ทำการศึกษาสปีเนลจากประเทศแทนซาเนีย ทาจิกิสถาน พม่า และศรีลังกา พบว่าสปีเนลสีแดงและสีชมพูที่ผ่านการเผามาแล้ว เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สปีเนลจะแสดงการดูดกลืนเคลื่อนจากตำแหน่ง 536-539 nm เป็น 544-547 nm จากการหาข้อมูลเบื้องต้น พบว่าเมื่อเปรียบเทียบตัวอย่าง สปีเนล ที่มาจากแหล่ง หรือ ประเทศที่แตกต่างกัน แต่มีผลการดูดกลืนแสง ที่เหมือนกัน ซึ่งเกิดจากการที่มี ชาติให้สีที่เหมือนกัน จึงทำให้สปีเนลที่มาจากแหล่งหรือประเทศที่แตกต่างกัน เกิดสีเดียวกัน ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 สี สาเหตุการเกิดสี และตำแหน่งการดูดกลืนแสงของธาตุทรานซิชันในสปีเนล

สาเหตุของการเกิดสี	สี	ตำแหน่งการดูดกลืนแสง (nm)
Cr <sup>3+</sup> ที่ตำแหน่ง octahedral site	แดง, ชมพู, ม่วง	388-391, 413-415, 538-545
Fe <sup>2+</sup> ที่ตำแหน่ง tetrahedral site	น้ำเงิน, น้ำเงินอมเขียว, ม่วง	370-372, 383-385, 455-457, 555-559, 659
Co <sup>2+</sup> ที่ตำแหน่ง tetrahedral site	น้ำเงิน	550, 555, 625
Fe <sup>2+</sup> / Fe <sup>3+</sup> charge transfer	น้ำเงิน, น้ำเงินอมเขียว	912-925

## 6. เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน (Ion Beam Analysis)

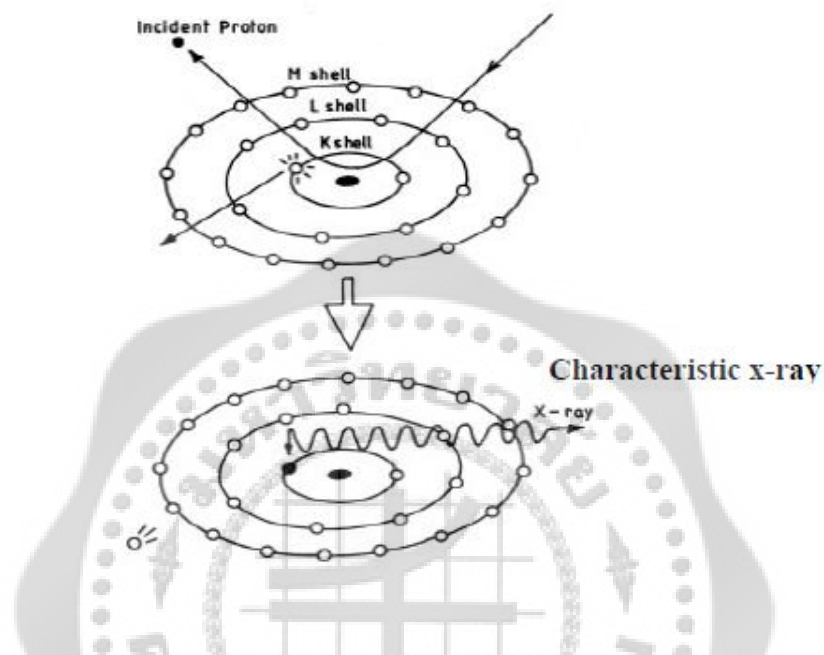
### 1. Particle Induced X – ray Emission (PIXE) (Johansson. 1970)

เทคนิค Particle Induced X-ray Emission (PIXE) ปัจจุบันได้กลายเป็นเทคนิคมาตรฐาน มีการใช้กันอย่างกว้างขวางหลายวงการ เพราะมีลักษณะเด่นเหนือเทคนิคอื่น เช่น สามารถวิเคราะห์ ได้หลายธาตุในคราวเดียว ( multi-elemental analysis) เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายวัสดุตัวอย่าง ( non-destructive testing) เทคนิค PIXE จะตรวจวัดรังสีเอกซ์ ( characteristic x-ray) ที่เกิดจากการ กระตุ้นด้วยลำอนุภาคกระสุนที่มีพลังงานอยู่ในเรอีน MeV เมื่อวัดค่าพลังงานของรังสีเอกซ์เหล่านี้ทำให้สามารถบอกได้ว่าวัสดุตัวอย่างนั้นประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง

### หลักการของ Particle Induced X – ray Emission (PIXE)

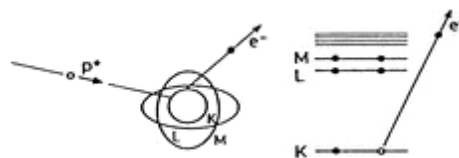
เมื่อกระตุ้นด้วยลำอนุภาคกระสุนพลังงานเรอีนล้านอิเล็กตรอนโวลต์ อนุภาคกระสุนจะผลักรให้ orbital electron วงในๆ หลุดออกจากวงโคจรรอบนิวเคลียสเกิดเป็นกระบวนการ ionization อะตอมจึงต้องมีการปรับตัวเพื่อให้เกิดสภาวะสมดุลใหม่ โดย orbital electron วงนอกกว่าจะ

เคลื่อนย้ายลงมาแทนที่ เนื่องจากเป็นการย้ายจากระดับพลังงานที่มีค่ามากมายยังระดับพลังงานที่มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานไม่ต่อเนื่อง โดยเรียกรังสีเอกซ์นี้ว่า “characteristic x - ray” ดังภาพประกอบ 15

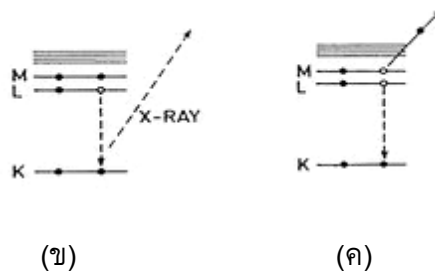


ภาพประกอบ 15 แผนภาพแสดงการเกิด Characteristic x – ray

แต่บางกรณีก็ไม่สามารถหลุดรอดออกมาจากอะตอมเพราะถูกดักจับไว้โดย orbital electron อีกตัวเสียก่อน และทำให้มันได้เป็นอิสระ เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาแบบนี้ว่า Auger electron ภาพประกอบ 16 (ก)

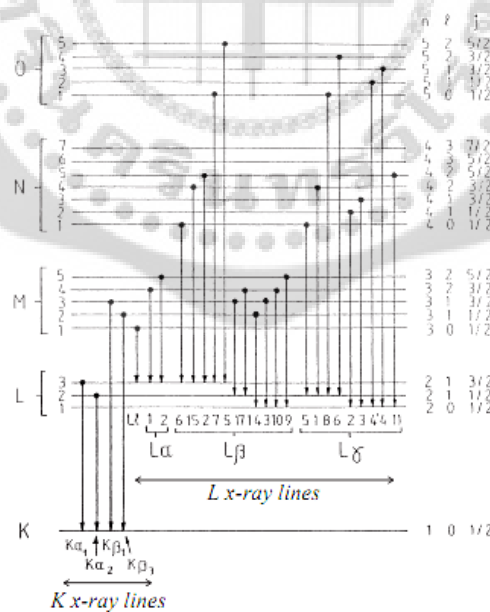


(ก)



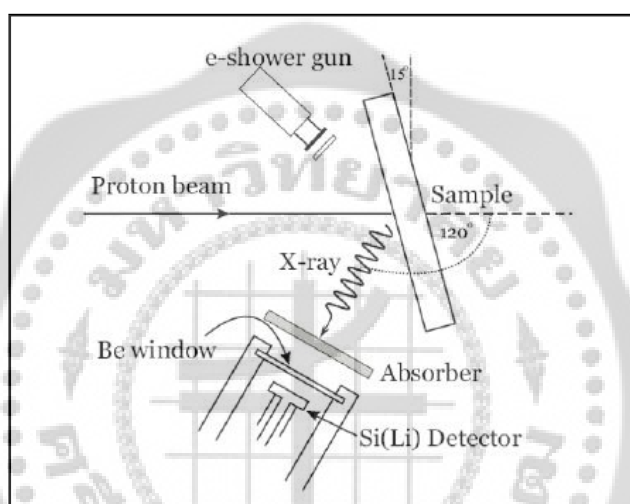
ภาพประกอบ 16 แผนภาพแสดงกระบวนการที่ตามมาหลังจากการเกิด ionization ด้วยลำอนุภาค (ก) K-shell ionization (ข) การปลดปล่อย Characteristic x-ray (ค) Auger electron (Govil. 2001)

การเรียกขานการทรานซิชันของ orbital electron ในลักษณะต่างๆ นั้นถูกกำหนดไว้โดยศาสตราจารย์ Kai M. Siegbahn แห่งมหาวิทยาลัยอุปราชา ซึ่งมีรายละเอียดดัง ภาพประกอบ 17 โดยกำหนดชื่อเรียกการทรานซิชันในอะตอมจากวงนอกสู่วงใน จะใช้อักษรพิมพ์ใหญ่ของชั้นที่ถูกทรานซิชันลงมาถึง ตามด้วยอักษรกรีกแล้วห้อยด้วยตัวเลข



ภาพประกอบ 17 แสดง energy level diagram ของการทรานซิชันในอะตอม (Cohen. 1991)

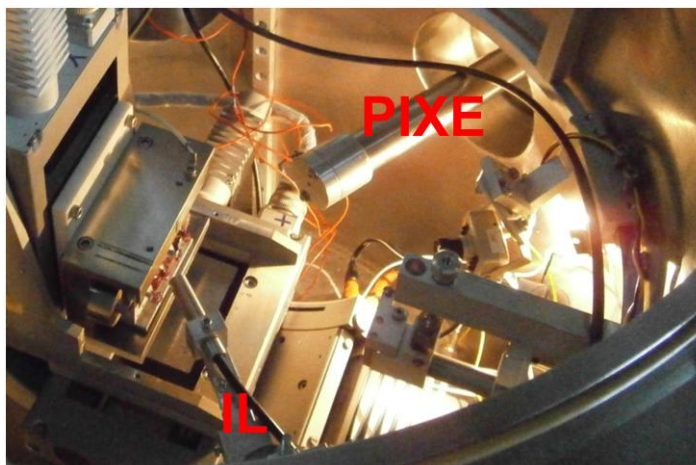
การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE ทำการทดลองใน Analysis Chamber ระดับความดันอากาศในช่วง  $10^{-5} - 10^{-6}$  torr [1 atm = 760 torr (mmHg) = 1.013 bar] โดยใช้หัววัดรังสีเอกซ์ Lithium-drifted silicon [Si(Li)] Model SSL 30150 ของบริษัท Canberra ที่มี energy resolution ประมาณ 150 eV สอดเข้าไปใน Analysis Chamber ทำตำแหน่งกับแนวลำอนุภาค  $120^\circ$  และที่ปลายของหัววัดจะปิดไว้ด้วยแผ่นเบริลเลียมบางๆ เรียกว่า Be window หัววัดชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีเอกซ์ในช่วงพลังงาน 3 - 20 keV ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งเชื่อมต่อเข้ากับไนโตรเจนเหลวซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 77 เคลวินหรือ  $-196^\circ\text{C}$



ภาพประกอบ 18 แผนภาพระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PIXE



ภาพประกอบ 19 แสดง sample holder พร้อมนำไปใส่ใน Analysis Chamber



ภาพประกอบ 20 แสดงภาพภายในตู้วิเคราะห์ของระบบ Ion Beam Analysis ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## 2. การเปล่งแสง (Ionoluminescence : IL)

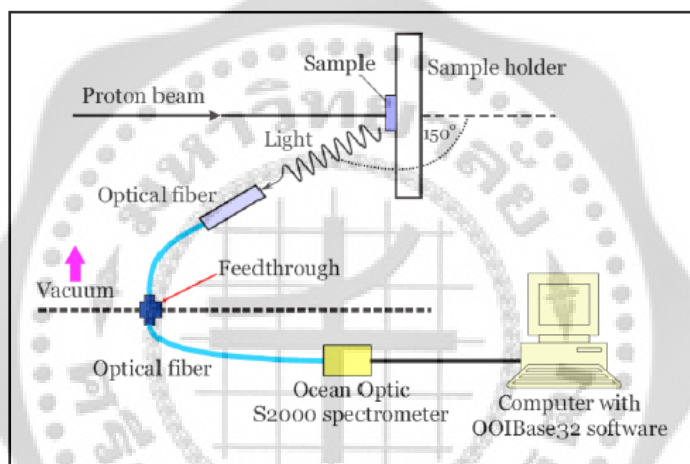
การเปล่งแสง (luminescence) ของวัตถุที่ถูกกระตุ้นด้วยลำไอออนที่มีพลังงานเรือน MeV ทำให้ทราบสมบัติทางกายภาพที่น่าสนใจของวัตถุ ปรากฏการณ์นี้เป็น พื้นฐานของ อีกเทคนิคหนึ่งของเทคนิค Ion Beam Analysis (IBA) ที่เรียกว่า ionoluminescence (IL) การศึกษาลักษณะการเปล่งแสงของวัตถุต่างๆ ทำให้ทราบถึงชนิดของความบกพร่อง ( defect) ชนิดของมลทิน (impurity) และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure)

### หลักการ luminescence

ปรากฏการณ์การเปล่งแสงสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดตามเวลาของการเปล่งแสง คือ fluorescence (การร้าวแสง) กับ phosphorescence (การเรืองแสง) โดย fluorescence จะมีการร้าวแสงหลังถูกกระตุ้นในเวลาสั้นมาก ซึ่งน้อยกว่า  $10^{-8}$  วินาที แต่ในกรณีของ phosphorescence นั้น จะใช้เวลาในการกระตุ้นการร้าวแสงที่นานกว่า  $10^{-8}$  วินาที นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่ทำให้สารเกิดการเปล่งแสงได้อีกหลายปัจจัย เช่น การเปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี (radioluminescence) เกิดจากเนื้อเยื่อที่มีชีวิต (bioluminescence) การกระตุ้นโดยอนุภาคมีประจุ (ionoluminescence) การดูดกลืนแสงและปลดปล่อยออกมาเป็นความร้อน (thermoluminescence) การละลายของสารในน้ำ (lyoluminescence) เป็นต้น โดยย่านของแสงที่น่าสนใจอยู่ในช่วง near - UV, visible light, near - IR ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างของโมเลกุล



เทคนิค IL เป็นการให้พลังงานกระตุ้นแก่อิเล็กตรอนในสารตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนในสารตัวอย่างมีพลังงานสูงขึ้น โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคเร่งไอออนของก๊าซและเข้าชนวัสดุ และเกิดการถ่ายเทพลังงานไปยังอะตอมหรือโมเลกุลของสาร เมื่ออิเล็กตรอนวงนอกเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานขึ้นไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) และอิเล็กตรอนไม่มีเสถียรภาพ เมื่อกลับสู่สถานะพื้นดั้งเดิมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงในย่านที่มองเห็นได้ (visible light) โดยที่แสงหรือโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมานี้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะ โดยการใช้ fiber optic ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000  $\mu\text{m}$  เป็นตัวรับแสงที่เกิดขึ้น แสงที่ได้จะถูกส่งไปยัง spectrometer ซึ่งจะแยกแยะและบันทึกสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 177-880 nm



ภาพประกอบ 21 แผนภาพระบบการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL ทำการทดลองในอุโมงค์วิเคราะห์ ระดับความดันอากาศเช่นเดียวกับเทคนิค PIXE โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอุโมงค์วิเคราะห์เป็นสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุ โดยปลายหนึ่งของเส้นใยนำแสงจะนำไปจ่อในระยะห่างจากตัวอย่างประมาณ 5 ซม. ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับ optical feedthrough ยาวประมาณ 10 ซม. (ตัวเชื่อมต่อระหว่างภายในกับภายนอกอุโมงค์วิเคราะห์) ปลายด้านนอกของ optical feedthrough ต่อโดยตรงกับสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่ง output ของสเปกโตรมิเตอร์จะเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งถูกส่งผ่านทางสาย interfacing cable ไปถูกบันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยบอร์ดและโปรแกรม OOIBase 32 ของบริษัท Ocean Optics Inc.

การวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นครอบคลุมย่านที่ตามองเห็น คือกลุ่มของแสงที่แสดงไว้ดังตาราง 2 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) กับพลังงานโฟตอน ( $E_{\text{photon}}$ ) ดังนี้

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240.701}{E_{\text{photon}}(\text{eV})} \dots\dots\dots (1)$$

ตาราง 2 แสดงรายละเอียดของความยาวคลื่นของพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสง	ความยาวคลื่น (nm)	พลังงานของโฟตอน (eV)
Ultraviolet	100 - 400	14.2 – 3.10
Violet	400 – 425	3.10 – 2.92
Blue	425 – 492	2.92 – 2.52
Green	492 – 575	2.52 – 2.15
Yellow	575 – 585	2.15 – 2.12
Orange	585 – 647	2.12 – 1.92
Red	647 – 700	1.92 – 1.77
Near Infrared	700 - 10000	1.77 – 0.12

#### Luminescence Emission (Yang. 1993)

เทคนิค IL เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่มีความไว (sensitivity) สูงมาก โดยอาศัยการตรวจวัดการเปล่งแสงที่เกิดจากมลทินและตำหนิ (defect) ภายในโครงสร้างของวัสดุตัวอย่าง โดยเทคนิค IL มีความสามารถในการตรวจวัดลักษณะของการเปล่งแสงที่เกิดจากต้นตอแตกต่างกัน เช่น ผลของตำหนิจากศูนย์กลางสี (color center) และผลของมลทินที่มีไอออนของธาตุ transition และธาตุ rare earth เจือปน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสีในพลอย

ในที่นี้จะมุ่งความสนใจไปที่แสงในย่านที่ตามองเห็นเป็นสำคัญ โดยสาเหตุในการเกิดเปล่งแสง แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. Intrinsic luminescence โดยเกิดจากความบกพร่องที่เกิดขึ้นภายในของผลึก โดยแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- Band to Band luminescence เกิดขึ้นในพวกผลึกที่มีความบริสุทธิ์สูง

- Exciton luminescence เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอิเล็กตรอนใน conduction band กับ hole ใน valence band เกิดอันตรกิริยาต่อกันด้วยแรงคูลอมบ์ เกิดระบบที่เรียกว่า exciton ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปมาโดยไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า

- Color center luminescence เมื่อ anion บางตัวในโมเลกุลถูกรบกวนจนหลุดออกจากตำแหน่งเดิมใน lattice เกิดเป็น anion vacancy ทำให้เกิดความบกพร่องแบบจุด ต่อมาเมื่ออิเล็กตรอนเข้ามาแทนที่ กลายเป็น "color center" จากภาพประกอบ 22 อธิบายได้ดังนี้

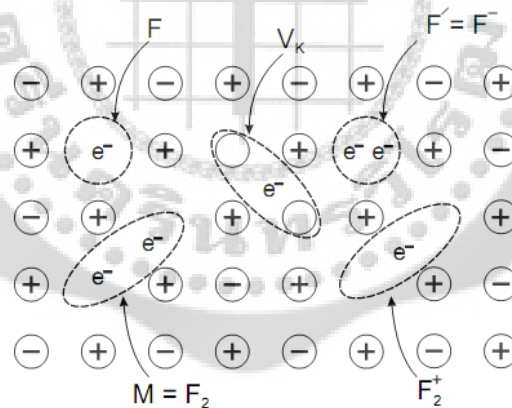
F center หมายถึง 1 vacancy +  $n e^-$  (เมื่อ  $n$  = จำนวนประจุของ anion)

F' center หมายถึง 1 F center + 1  $e^-$

$F_2$  center หมายถึง 1 F center + 1 F center (ที่อยู่ติดกัน)

$F_2^+$  center หมายถึง 2 vacancy (ที่อยู่ติดกัน) + 1  $e^-$  (ในระหว่างกลาง หรือ 1 F center) ที่สูญเสีย 1  $e^-$

$V_k$  center หมายถึง 2 hole (ที่อยู่ติดกัน) + 1  $e^-$  (ระหว่างกลาง)



ภาพประกอบ 22 แสดงตำหนิบางชนิดในผลึกโลหะที่เป็น color center (Nassau, 2001)

2. Extrinsic Luminescence เป็นการเปล่งแสงเนื่องจากมีมลทิน (impurity) เข้าไปอยู่ในโครงสร้างผลึก ซึ่งได้แก่ โลหะทรานซิชัน (transition metal ion) และโลหะหายาก (rare earth element) โดยเรียกมลทินเหล่านี้ว่า activator

- Transition metal ion ด้วยลักษณะการจัดเรียงตัวของโลหะทรานซิชันเป็นแบบ 3d ทำให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ใน d ออร์บิทัลมีอันตรกิริยากับ crystal field อย่างรุนแรง โดยโลหะพวกนี้มีผลต่อสีของอัญมณี เมื่อเข้าไปเจือปนในโครงสร้าง ซึ่งโดยหลักๆแล้วมี 8 ชนิดคือ

1. โครเมียม (chromium) ให้สีแดงในทับทิม (ruby) และสปีเนล สีเขียวในมรกต (emerald) และหยกเจไดต์ (jadeite)

2. เหล็ก (iron) ให้สีเหลืองในคริสโซเบริล (chrysoberyl) และซิทริน (citrine) ให้สีฟ้าในแซปไฟร์ (sapphire) ทัวร์มาลีน (tourmaline) อะความารีน (aquamarine) สปีเนล และสีแดงในอัลมันดีนการ์เนต (almandine garnet)

3. แมงกานีส (manganese) เป็นธาตุที่สามารถพบได้ทั้งในอัญมณีประเภทอิดิโอโครเมติก (idiochromatic) และประเภทอัลโลโครเมติก (allochromatic) โดยให้สีชมพูในโรโดโครไซต์ (rhodochrosite) และโรโดไนท์ (rhodonite) มอร์แกนไนท์ (morganite) และคุนไซต์ (kunzite) สีส้มในสเปซซาไทท์การ์เนต (spessartite garnet)

4. ทองแดง (copper) จะพบในอัญมณีประเภทอิดิโอโครเมติก (idiochromatic) เท่านั้น โดยให้สีฟ้าในคริสโซโคลลา (chrysocolla) เทอร์ควอยซ์ (turquoise) และอะซัวร์ไรต์ (azurite) สีเขียวในมาลาไคต์ (malachite) และไดออปไซด์ (diopside)

5. นิกเกิล (nickel) โดยทั่วไปแล้วจะไม่ค่อยเกิดในอัญมณี มีน้อยชนิดมาก โดยให้สีเขียวในคริสโซเพรส (chrysoprase) และเพรสโอปอล (prase opal) ส่วนใหญ่จะใช้ในการให้สีแก่พลอยสังเคราะห์ เช่น แซปไฟร์สังเคราะห์สีเหลือง เป็นต้น

6. วาเนเดียม (vanadium) ให้สีเขียวในเบริล (beryl) กรอสซูลาไรท์ (grossularite) ซาโวไรท์ (tsavorite) อเล็กซานไดรต์ คล้ายแซปไฟร์สังเคราะห์ (synthetic alexandrite-like sapphire) และซอไซต์ (zoisite)

7. ไทเทเนียม (titanium) เป็นธาตุที่จะเกิดร่วมกับธาตุเหล็ก (iron) ในบางครั้ง โดยให้สีน้ำเงินในแซปไฟร์ (sapphire) และเบนิทอยท์ (benitoite)

8. โคบอลต์ (cobalt) เป็นธาตุที่พบในธรรมชาติได้น้อยมาก แต่นิยมใช้ให้สีในพลอยสังเคราะห์ และพลอยเลียนแบบ โดยให้สีน้ำเงินในสปีเนลสังเคราะห์ (synthetic spinel) แก้ว (glass) ควอตซ์น้ำเงินสังเคราะห์ (synthetic blue quartz)

- Rare earth element (REEs) หรือธาตุหายาก (rare earth elements) หมายถึงธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Lanthanides (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) ซึ่งมีเลข

อะตอม 57-71 และมักจะรวมธาตุ Sc, Y, Th และ U เข้าไว้ด้วยเพราะมีคุณสมบัติคล้ายกัน ธาตุหายากแบ่งเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่มคือ

- 1.กลุ่มธาตุหายากชนิดเบา (light rare earths) ได้แก่ La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu
- 2.กลุ่มธาตุหายากชนิดหนัก (heavy rare earths) ได้แก่ Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb,

Lu

โดยธาตุเหล่านี้มีการจัดเรียง อิเล็กตรอนเป็น  $4f^n [5s^2 5p^6]$  การจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนลักษณะนี้ทำให้ไอออนของธาตุเหล่านี้เกิดการเปล่งแสงออกมาเป็นพิคแคบๆ โดยแสงที่เปล่งออกมาเกิดจากอิเล็กตรอนใน 4f ออร์บิทัล ซึ่งอิเล็กตรอนในชั้นนี้ถูกป้องกันจาก electron crystal field ของผลึกแม่ด้วยอิเล็กตรอนวงนอก ดังนั้นระดับพลังงานของไอออนธาตุหายาก จะเหมือนกันไม่ว่าจะอยู่ในผลึกแม่ชนิดไหนก็ตาม

### 3. ไอออนอิมพลานเตชัน (Ion Implantation)

ไอออนอิมพลานเตชัน คือ กระบวนการปรับปรุงพื้นผิว โครงสร้าง และสมบัติของวัสดุด้วยการฝังไอออน เพื่อปรับผิวหน้าวัสดุให้มีสมบัติเชิงกล และเชิงกายภาพให้ดีขึ้น สมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของไอออน พลังงาน และโดสของไอออนที่นำมาฝัง ไอออนอิมพลานเตชันเป็นเทคนิคที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว คือ เคลือบวัสดุโดยไม่เปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุนั้น ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการติดแน่นของสารเคลือบกับวัสดุ ไม่มีปัญหา Thermal distortion ผิวชิ้นงานได้รับการขัดไปในตัว การฝังตัวของอะตอมเป็นกระบวนการระดับจุลภาค ดังนั้นการรวมตัวกับธาตุเดิมจึงกลมกลืนที่สุด ในกระบวนการนี้ไอออนของธาตุต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน จะถูกยิงไปฝังบนผิวของวัสดุ

#### หลักการ Ion Implantation

กระบวนการฝังไอออนเป็นการระดมยิงลำไอออนที่ชิ้นงานที่พลังงานไอออนในช่วงกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ถึงเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ความดันในเครื่องอิมพลานเตอร์ต่ำกว่าความดันบรรยากาศซึ่งมีค่าประมาณ  $10^{-6}$  torr ไอออนถูกผลิตโดยแหล่งกำเนิดไอออนและถูกเร่งโดยระบบเร่งอนุภาค ชิ้นงานถูกติดตั้งในห้องอาบชิ้นงาน ซึ่งเครื่องอิมพลานเตอร์บางเครื่องจะมีแม่เหล็กไดโพล (dipole magnet) ทำหน้าที่คัดเลือกลำไอออนที่ต้องการ การโฟกัสของลำไอออนทำได้โดยใช้แม่เหล็กควอดรูโพล (quadrupole magnet) เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าไปในผิวของชิ้นงานจะเกิดการชนกันกับอะตอมของชิ้นงานในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งกำหนดโดยอันตรกิริยาทางคูลอมบ์ เป็นผลทำให้อะตอมชิ้นงานหลุดออกจากตำแหน่งเดิมและชนกับอะตอมชิ้นงานอื่นๆ เป็นผลทำให้เกิดช่องว่างที่

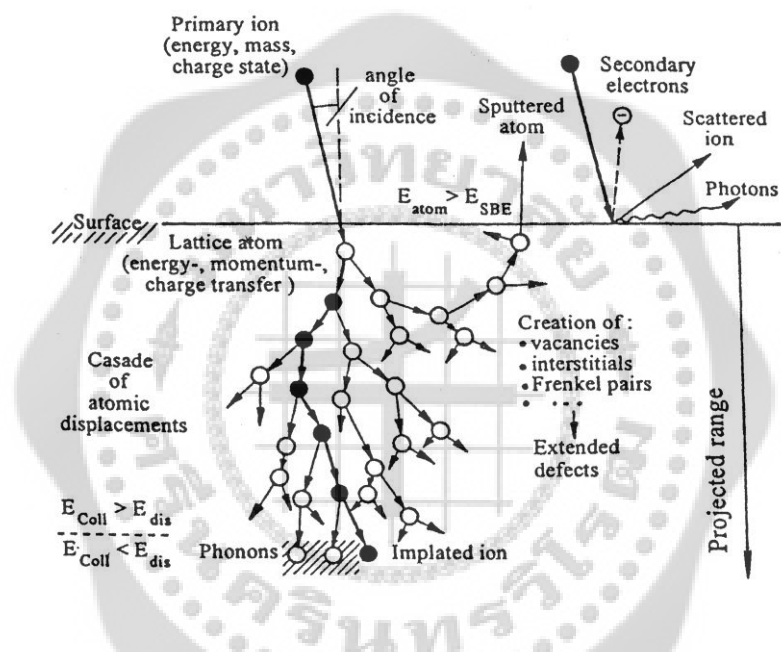
ผิวของชิ้นงาน กระบวนการนี้ถูกเรียกว่า collision cascade ไอออนสามารถทะลุได้หลายชั้นของอะตอมขึ้นอยู่กับพลังงานไอออน มวลไอออน และชนิดของชิ้นงาน ในช่วงของการชน พลังงานของไอออนจะถูกส่งถ่ายไปสู่อะตอมของชิ้นงาน เมื่อพลังงานไอออนหมด อะตอมต่างๆจะพยายามเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยจะพยายามกลับไปสู่ตำแหน่งเดิมแต่ยังคงเหลือช่องว่างบางช่องอยู่ ดังนั้นจึงมีการซ้อนทับกันระหว่างชั้นผิวใหม่และชั้นผิวเก่าของชิ้นงาน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์กับชิ้นงาน ก่อนการเริ่มกระบวนการฝังควรออกแบบเงื่อนไขและตัวแปรต่างๆ สำหรับการฝัง เช่น ชนิดไอออน พลังงานไอออน ไอออนโดส กระแสลำไอออน และความหนาแน่นกระแส เป็นต้น

#### หลักการพื้นฐานของอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัตถุ (Technical guides. 2012)

เมื่อมีไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลาง ไอออนนี้จะมีการสูญเสียพลังงานในขณะที่มันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางอยู่ตลอดเวลา ถ้าการสูญเสียพลังงานนี้ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาของไอออนกับอิเล็กตรอนของอะตอมในตัวกลาง เราจะเรียกว่า electronic stopping power และถ้าหากการสูญเสียพลังงานขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาของไอออนกับนิวเคลียสของอะตอมในตัวกลางเราจะเรียกว่า nuclear stopping power ซึ่งในกระบวนการไอออนอิมพลานเตชันนี้ เป็นการใช้อิออนหนัก พลังงานต่ำ กระแสสูง เมื่อไอออนเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุที่เป็นเป้า จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับอะตอมขึ้นตัวอย่าง ซึ่งจะอยู่ในรูป nuclear stopping นั่นคือ การถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นระหว่างไอออนและอะตอม จึงมีผลในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชิ้นตัวอย่างเป็นอย่างมาก ซึ่งต่างจากการวิเคราะห์ด้วยลำไอออนที่เป็นการใช้อิออนเบา พลังงานสูง กระแสต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับอะตอมขึ้นตัวอย่างในรูป electronic stopping นั่นคือ การถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นระหว่างไอออนกับระบบอิเล็กตรอนของอะตอมเท่านั้น จึงไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในชิ้นตัวอย่าง

เมื่อไอออนวิ่งเข้าชนผิวของวัสดุที่เป็นเป้า บางส่วนจะกระเจิงออกมา บางส่วนที่วิ่งเข้าไปได้ก็ไปชนกับอะตอมของเป้า เกิดอันตรกิริยาคูลอมป์ระหว่างไอออนและอะตอมตามรายทางที่เคลื่อนที่ มีผลทำให้อะตอมกระดอนออกจากตำแหน่งเดิม อะตอมเหล่านี้ก็เคลื่อนที่ไปชนอะตอมตัวอื่นๆ เป็นผลให้อะตอมตัวที่ถูกชนกระเด็นออกไปจากตำแหน่งเดิมด้วยเช่นกัน กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงเวลาประมาณ  $10^{-11}$  วินาที ทำให้เกิดบริเวณภายในวัสดุที่เป็นเป้าที่เต็มไปด้วย interstitials (การแทรกอยู่ผิดตำแหน่งของอะตอม) และ vacancies (ตำแหน่งที่อนุภาคหายไปจากที่ควรมี) น้อยๆ จุดกระบวนการนี้เรียกว่า collision cascade ซึ่งแสดงในภาพประกอบ 23 โดยไอออนจะเคลื่อนที่ไปจนกว่าพลังงานที่พุ่งชนน้อยกว่า solid-atom-displacement energy ( $E_{coll} <$

$E_{dis}$ ) จากนั้นก็จะปล่อยพลังงานความร้อนออกมาแทน ซึ่งเกิดจากการสั่นหรือการหมุนของตัวมันเอง และถ้าอะตอมได้รับพลังงานจากการชนมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวที่ผิว (surface binding energy) ( $E_{atom} < E_{SBE}$ ) อะตอมที่ผิวก็จะหลุดออกไปเป็น sputtered atom แล้วถ้าหากไอออนไปชนและถ่ายเทพลังงานบริเวณผิวของวัสดุที่เป็นเป้า จนทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมเป้าหมายหลุดออกมา จะเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ว่า secondary electrons ส่วนระยะทางที่วัดจากผิวบนสุดลากเส้นตรงไปจนถึงระยะความลึกที่ไอออนหยุดเรียกว่า  $R_p$  (projected range) และระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่ทั้งหมดเรียกว่า  $R$  (total path length)



ภาพประกอบ 23 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าซึ่งมีการชนกันแบบ cascade

ความเข้มของกระแสไอออน (I) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวควบคุมอัตราการยิงฝั่งไอออนซึ่งกระแสไอออนนี้จะมีความสัมพันธ์กับ กับอัตราการยิงฝั่งไอออนลงบนวัสดุ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการ

$$I = \frac{Q}{t} \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ  $Q$  คือจำนวนประจุที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ของวัสดุ และ  $t$  คือเวลาในหน่วยวินาที ซึ่งในขณะเดียวกันจำนวนของประจุก็เป็นตัวบอกจำนวนของไอออน เมื่อหนึ่งประจุมีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์ เมื่อจำนวนของไอออนแทนด้วย  $N$

$$N = \frac{Q}{1.6 \times 10^{-19}} = \frac{It}{1.6 \times 10^{-19}} \dots\dots\dots (3)$$

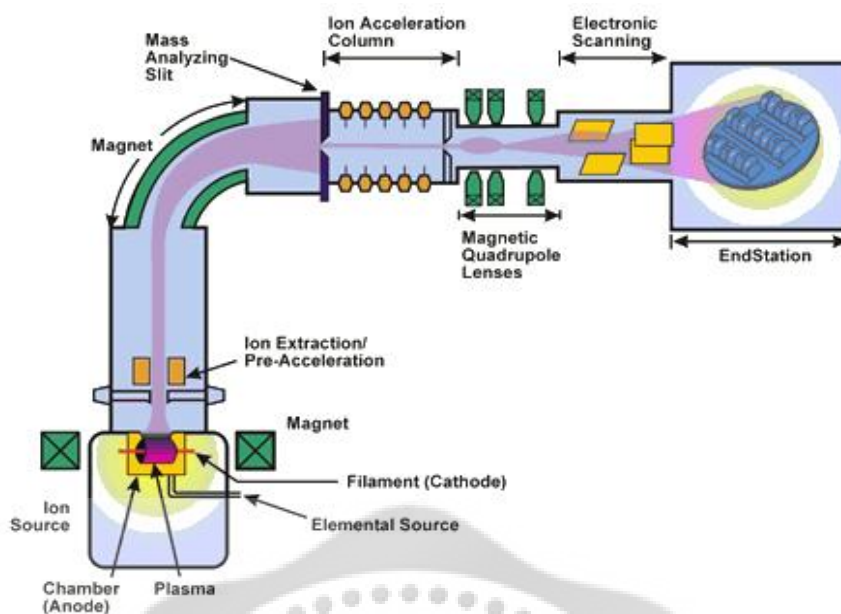
เมื่อให้  $D$  เป็นความหนาแน่น ของจำนวนอนุภาคไอออนที่ใช้ในการยิงฝังบนเป้า

$$D = \frac{It}{1.6 \times 10^{-19} A} \dots\dots\dots (4)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่ทั้งหมดที่เกิดอันตรกิริยาของลำไอออน ซึ่งจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าเมื่อ ค่า  $D$  มีค่าต่างกันก็จะทำให้เกิดความแตกต่างกันของการเกิดการฝังตัวของไอออนที่เป้าด้วย

เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ (Ion Implanter) มีส่วนประกอบหลักคือ เครื่องกำเนิดไอออน (ion source) ระบบเร่งอนุภาค (accelerator) ตัวแยก (analysing magnet) และห้องบรรจุเป้า (target chamber) โดยที่ส่วนประกอบทั้งหมดนี้อยู่ในระบบสุญญากาศ เครื่องกำเนิดไอออนเป็นแหล่งผลิตไอออนให้แก่ระบบ ไอออนจากเครื่องกำเนิดจะถูกเร่งด้วยระบบเร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงตามที่ต้องการ โดยทั่วไปแล้วไอออนที่ผลิตจากเครื่องกำเนิดไอออนมีหลายชนิด เมื่อไอออนเหล่านี้ผ่านเข้าไปในส่วน analysing magnet ที่เป็นระบบแม่เหล็กไฟฟ้า ไอออนชนิดที่ไม่ต้องการก็จะถูกคัดออก ทำให้ได้ลำไอออนที่บริสุทธิ์ออกมา หลังจากนั้นลำไอออนจะถูกนำส่งไปยังพื้นผิวของวัสดุที่วางอยู่ใน target chamber ดังภาพประกอบ 24





ภาพประกอบ 24 ส่วนประกอบของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์

ที่มา: <http://www.spirecorp.com>

ได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลอย Bootkul; et al. (2011) ได้ทำการศึกษาเพื่อเพิ่มคุณภาพคอรันดัมที่มีคุณภาพต่ำจากแหล่งต่างๆ เช่น พม่า อาฟริกา ศรีลังกา เขมร ลาว และประเทศไทย ตัวอย่างที่นำมาศึกษามีขนาดตั้งแต่ 0.5-3 เซนติเมตร ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพลอย โดยการตรวจสอบสีด้วยชุดเปรียบเทียบสีคอรันดัมมาตรฐานของ GIA (Gemological Institute of America) ตรวจสอบลักษณะภายในด้วยกล้องไมโครสโคป เช่น ดำหนิ ศึกษากลายด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน โดยใช้เทคนิค Particle Induced X-ray Emission (PIXE) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอย และเทคนิค ionoluminescence (IL) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสง และปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิคไอออนพลังงานสูงด้วยไอออนของอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน จากเครื่องไอออนอิมพลานเตชัน ผลจากการทดลอง ทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง กระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงจากธาตุร่องรอยที่มีอยู่แล้วใน พลอยโดยใช้ไอออน จะได้ พลอยสีเข้มสวย ทั้งทำให้ผิวของพลอยมีความใสขึ้นอย่างถาวร มีสีสดตามความต้องการของตลาดพลอยได้

ในการวิจัยนี้ได้ตั้งสมมุติฐานการทดลองเกี่ยวกับพลอย สปิเนลสีแดงอมน้ำตาล ที่มาจากแหล่งโมกก ด้วยการใช้เทคนิคการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสีพลอยด้วยลำไอออนหนักพลังงานต่ำ

ซึ่งไอออนที่ใช้ในการอิมพลาเนชันนี้คือ ออกซิเจน โดยการใช้พลังงานจากลำไอออนในระดับต่างๆ ให้เหมาะสมกับเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงแสงของสปีเนล เพื่อสามารถปรับให้สปีเนลที่มีสีน้ำตาลเป็นสี รong ให้เหลือเพียงสีแดงสดได้ รวมถึงสามารถกำจัดตำหนิที่เป็นของเหลวและก๊าซได้ ทำให้พลอยมีสี ที่มีความอึมตัวเพิ่มมากขึ้น เพิ่มความสะอาดและความใส ซึ่งเป็นสมบัติเชิงแสงที่เป็นที่ต้องการของ ตลาด ทำให้พลอยมีมูลค่าเพิ่มขึ้นโดยไม่มีการทำลายเนื้อและลดน้ำหนักของ พลอยลง สำหรับเป็น ทางเลือกที่แตกต่างจากการเพิ่มคุณภาพโดยการเผาพลอย



## บทที่ 3

### วิธีการทดลอง

#### 1. การจัดเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างพลอยในการศึกษาเป็นพลอยสปิเนลธรรมชาติจากประเทศพม่า ซึ่งผู้จัดหาอัญมณีให้อ้างว่ามาจากแหล่งโมกก จำนวน 151 ตัวอย่าง สปิเนลตัวอย่างมีทั้งที่เจียรไนแล้ว และยังไม่ได้เจียรไน โดยสปิเนลที่เป็นพลอย ดิบยังไม่ได้เจียรไน เพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ตรวจสอบ จึงนำพลอยสปิเนลที่ยังไม่ได้เจียรไนไปผ่านการขัดให้มีหน้าเรียบขนานกันจำนวนสองหน้า

#### 2. เทคนิคการวิเคราะห์

เทคนิคการวิเคราะห์ตรวจสอบในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้ เทคนิคการตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน เทคนิคการวิเคราะห์สี เทคนิคการตรวจสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน การตรวจสอบวิเคราะห์ทั้งหมดนี้จะทำการศึกษาที่ ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของลำอนุภาค และพลาสมา ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การศึกษาตัวอย่างอัญมณีโดยการตรวจสอบสมบัติทางอัญมณีทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และองค์ประกอบทางเคมี ถือเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการแยกชนิดของอัญมณี เนื่องจากอัญมณีแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางอัญมณีที่แตกต่างกันซึ่งสามารถระบุได้ว่าเป็นอัญมณีชนิดใด หรือแม้แต่อัญมณีชนิดเดียวกันก็อาจมีสมบัติที่แตกต่างกันได้บ้างในบางประการ การตรวจสอบสมบัติต่างๆ ของตัวอย่างสามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เครื่องมือพื้นฐานและเครื่องมือเทคนิคขั้นสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ศึกษาว่าต้องการข้อมูลเกี่ยวกับตัวอย่างมากน้อยเพียงใด โดยปกติแล้วการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงของตัวอย่างนั้นใช้เพียงเครื่องมือพื้นฐาน สำหรับการตรวจสอบโดยใช้เครื่องมือเทคนิคขั้นสูงนั้นมักใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ระดับสูง หรือใช้ในกรณีที่ไม่สามารถใช้เครื่องมือพื้นฐานตรวจสอบได้ การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางแสงโดยใช้ทั้งเครื่องมือพื้นฐานและเครื่องมือเทคนิคขั้นสูงซึ่งจะกล่าวถึงหลักการและวิธีการศึกษาของเครื่องมือที่ใช้ศึกษาในแต่ละชนิด

## 2.1 เทคนิคการตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน

เทคนิคการวิเคราะห์ตรวจสอบด้วยเครื่องมือพื้นฐาน เป็นการศึกษาสมบัติทั่วไปของ  
อัญมณี ได้แก่

1. เครื่องชั่งหาค่าความถ่วงจำเพาะ ( hydrostatic balance) เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะ  
ของอัญมณี
2. เครื่องวัดหาค่าดัชนีหักเหแสง (refractometer) เพื่อหาค่าดัชนีหักเหของอัญมณี
3. เครื่องวัดการเรืองแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet lamp) เพื่อศึกษาการเรืองแสง  
อัลตราไวโอเล็ตของอัญมณี

### การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

การหาน้ำหนักกะรัตและค่าความถ่วงจำเพาะด้วยเครื่องไฮโดรส

แตตติก

#### (hydrostatic)

ความถ่วงจำเพาะหมายถึง อัตราส่วนของน้ำหนักของสารต่อน้ำหนักของน้ำในปริมาตรที่  
เท่ากัน การหาค่าความถ่วงจำเพาะเป็นวิธีที่สำคัญอีกวิธีหนึ่งในการตรวจสอบอัญมณี วิธีการศึกษา  
แบ่งได้ 2 วิธีหลักๆ คือ 1.วิธีไฮโดรสแตตติก (hydrostatic) 2.วิธีใช้ของเหลว (heavy liquids)

สำหรับการศึกษาคั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีไฮโดรสแตตติก เนื่องจากเป็นวิธีการหาค่าความ  
ถ่วงจำเพาะที่มีความละเอียดและได้ผลแม่นยำกว่าวิธีอื่นๆ โดยการใช้ตราชั่งแบบละเอียด ชั่งอัญมณี  
ตัวอย่างในอากาศและน้ำ น้ำหนักของอัญมณีที่อยู่ในน้ำจะเบากว่าน้ำหนักในอากาศ นำน้ำหนักที่  
หาได้ทั้งในอากาศและน้ำมาคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักอัญมณีในอากาศ}}{\text{น้ำหนักอัญมณีในอากาศ} - \text{น้ำหนักอัญมณีในน้ำ}}$$



ภาพประกอบ 25 แสดงเครื่องชั่ง (hydrostatic balance) สำหรับชั่งน้ำหนักและ  
หาค่าความถ่วงจำเพาะของอัญมณี

### การหาค่าดัชนีหักเหของแสงด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer)

เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้หาค่าดัชนีหักเหของแสงใน  
อัญมณีแต่ละชนิด เนื่องจากอัญมณีแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงต่างกัน ฉะนั้นค่า  
ดัชนีหักเหของแสงจึงมีความต่างกัน

สูตรการคำนวณหาค่าดัชนีหักเหของแสง

$$\text{ค่าดัชนีหักเหของแสง} = \frac{\text{ความเร็วของแสงในอากาศ}}{\text{ความเร็วของแสงในอัญมณี}}$$

อัญมณีที่สามารถนำมาอ่านค่าดัชนีหักเหได้จะต้องเป็นอัญมณีที่ขัดเงา (polish) เป็นที่  
เรียบร้อยแล้ว เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ สามารถวัด ค่าดัชนีหักเหของแสงจาก ค่า 1.350 – 1.810  
เท่านั้น ถ้าอัญมณี มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่า 1.810 จะเรียกว่า “เกินค่าที่อ่านได้” หรือ OTL (over the  
limit) ลักษณะของไฟที่ใช้เป็น monochromatic light สีเหลืองที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 589.3 nm  
เช่น sodium light ซึ่งจะทำให้เห็นขอบที่แสดงค่าดัชนีหักเหชัดเจน เพราะหากใช้ไฟที่ให้แสงสีขาว  
(white light) ขอบที่ตัดระหว่างเขตสว่างและมีดในสเกลจะไม่คมชัด เขตของแนวสว่างและมีด

โดยทั่วไปจะมองเห็นเป็นสีเขียวซึ่งเรียกว่า ปลายสั้นสุดสีเขียว ( green shade cutoff) หากไฟที่ใช้เป็น monochromatic เขตของแนวสว่างและมีดจะเห็นแถบเงาเป็นสีเทาแทนสีเขียว



ภาพประกอบ 26 แสดงเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) สำหรับวัดค่าดัชนีหักเหของอัญมณี

### ตรวจสอบการเรืองแสง (fluorescence) โดยใช้หลอดแสงอัลตราไวโอเล็ต

หลอดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV lamp) เป็นเครื่องมือที่มีแหล่งกำเนิดแสงที่ผลิตขึ้นโดยใช้แสง ultraviolet เพื่อใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์การเรืองแสงของอัญมณี การตรวจสอบการเรืองแสงทำได้โดยหาค่าการเรืองแสงของอัญมณีในช่วงคลื่นสั้น (short wave ultraviolet : SWUV) มีความยาวคลื่นที่ 200 ถึง 280 nm และการเรืองแสงในช่วงคลื่นยาว (long wave ultraviolet : LWUV) มีความยาวคลื่นที่ 315 ถึง 400 nm โดยทั่วไปเครื่องมือ UV lamp ที่ใช้ตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณีจะมีกำลังไฟ 4 ถึง 100 watts ทั้งนี้เพราะยิ่งเครื่องมือมีกำลังสูงมากการเรืองแสงก็จะมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในการตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณีจึงควรใช้เครื่องมือเดียวกันตลอด การเรืองแสง (luminescence) ของอัญมณี เกิดจากการเปล่งแสงของ อัญมณีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยรังสี ทำให้ไอออนของธาตุทรานซิชันที่อยู่ใน อัญมณี ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนย้ายไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า เมื่อไอออนพยายามกลับมาอยู่ในระดับพลังงานเดิม (ground state) จะมีการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงที่เราสามารถมองเห็นได้ อัญมณีแต่ละชนิดเมื่ออยู่ภายในแสงอัลตราไวโอเล็ต จะเรืองแสงสีต่างกับสีของตัวอัญมณีเนื่องจากธาตุให้สีที่ต่างกันให้อัญมณีและตำหนิภายใน รวมทั้งโครงสร้าง

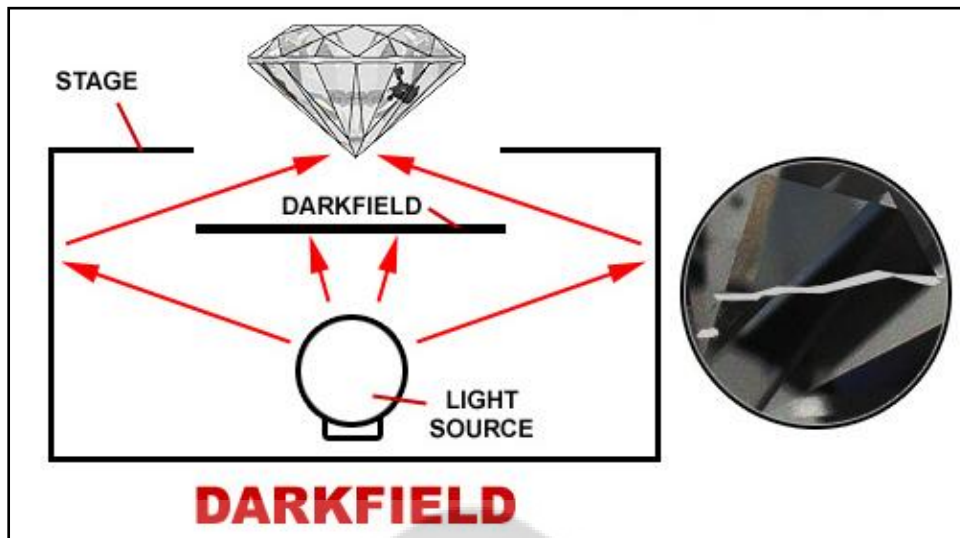
ภายในที่ต่างกัน ส่วนอัญมณีที่มีการเรืองแสงต่อเนื่องหลังจากปิดเครื่องอัลตราไวโอเล็ต เรียกว่า ฟอสโฟเรสเซนส์ (phosphorescence)



ภาพประกอบ 27 แสดงกล่องแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV lamp) สำหรับตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณี

#### กล้องจุลทรรศน์วิเคราะห์อัญมณี (microscope)

กล้องจุลทรรศน์ เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้กันมาก ซึ่งในปัจจุบันนี้กล้องจุลทรรศน์ถือเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่สุดในการวิเคราะห์อัญมณี เพราะสามารถเห็นตำหนิภายในและภายนอกของอัญมณีได้อย่างชัดเจน กล้องจุลทรรศน์เป็นเครื่องมือที่ประกอบด้วยเลนส์สองส่วนคือ เลนส์วัตถุซึ่งเป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุ ( objective) และเลนส์ตาซึ่งเป็นตัวขยายเลนส์วัตถุอยู่ตอนบนของกล้อง (ocular) หรือที่เรียกว่า eyepiece กำลังขยายของ กล้องจุลทรรศน์คำนวณได้จากค่ากำลังขยายของเลนส์ตาคูณด้วยกำลังขยายของเลนส์วัตถุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กำลังขยายตั้งแต่ 10x ถึง 75x ลักษณะของไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์อัญมณีคือ darkfield illumination ลักษณะของไฟเช่นนี้จะส่องด้านข้างของอัญมณีและด้านล่างเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณพื้นฉากหลังอัญมณีมืด ทำให้เห็นตำหนิภายในอัญมณีเป็นจุดสว่างเด่นออกมาจากพื้นฉากหลังที่มืดนั้น ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ลักษณะของไฟแบบ darkfield illumination



ภาพประกอบ 29 แสดงกล้องจุลทรรศน์สำหรับวิเคราะห์อัญมณี



### เทคนิคการวิเคราะห์สี

สีของอัญมณีแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้อาจใช้ในการแยกชนิดของอัญมณีด้วย ในวงการอัญมณี สถาบันทางด้านอัญมณีศาสตร์ นักธรณีวิทยา นักอัญมณีวิทยา ได้พยายามคิดหาระบบการบรรยายคุณลักษณะสีของอัญมณี (Themelis. 1992) เช่น สถาบันอัญมณีของอเมริกา (Gemological Institute of America: GIA) ได้ผลิตชุดเทียบสี (color master) ตั้งภาพประกอบ 30



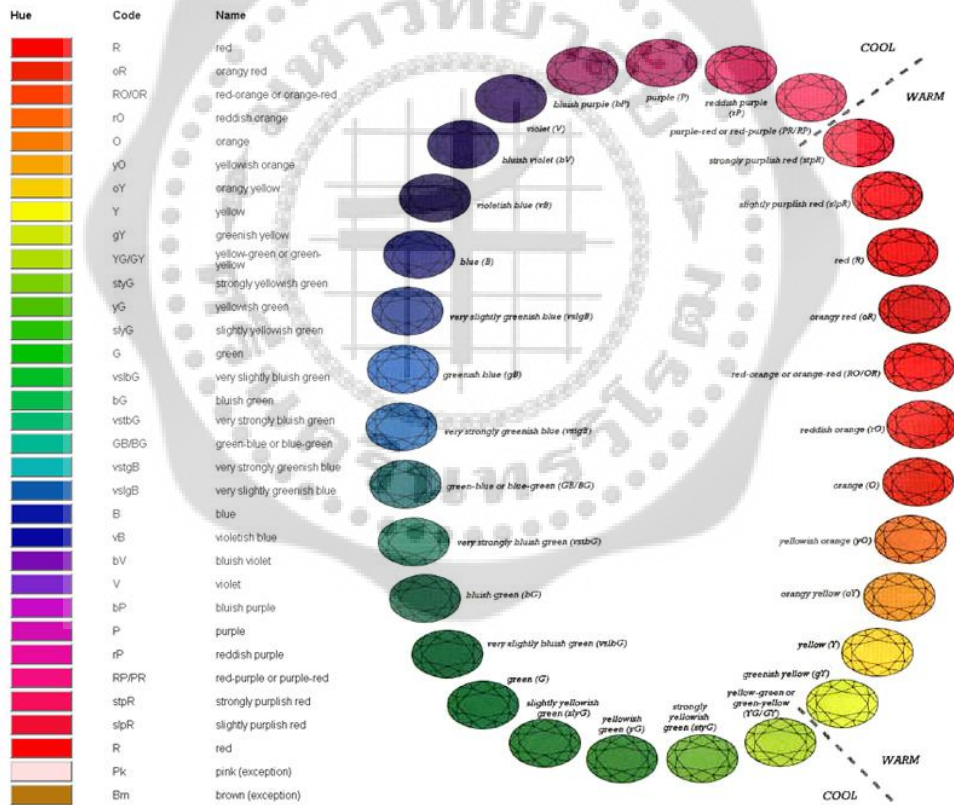
ภาพประกอบ 30 แสดงชุดเทียบสีของ GIA (GIA Gem Set หรือ Color master)

การวิเคราะห์สี ผู้วิจัยได้ศึกษาระบบสีแบบ ระบบสีเจมเซต ( gemset) เป็นระบบสีที่คิดขึ้นโดยสถาบันอัญมณีศาสตร์แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา ( Gemological Institute of America; GIA) เป็นระบบที่แบ่งลักษณะของสีออกเป็น 3 ส่วน คือ สีสัน (hue) ความสว่าง (tone) และความอิ่มตัวสี (saturation)

1. Hue หรือ สีที่มองเห็นจากอัญมณี (body color) มีทั้งหมด 150 สี แต่ตาของมนุษย์สามารถแยกได้เพียง 31 สี ดังภาพประกอบ 31 ซึ่งแต่ละสีมีกำหนดชื่อสีสันเป็นภาษาอังกฤษ และมีอักษรย่อตั้งภาพประกอบ 32 ซึ่งในการเรียกชื่อสี จะใช้ชื่อหลักของสี เช่น สีม่วง น้ำเงิน อาจมีชื่อหลักอยู่ในกลุ่ม violet, bluish violet, violetish blue, blue หากต้องการความละเอียดของสีมากขึ้น จะใช้คำเหล่านี้ very slightly, slightly เป็นต้น



ภาพประกอบ 31 แสดงสีสั้น (Hue) ในระบบเจมเซต



ภาพประกอบ 32 แสดงสีสั้นของระบบเจมเซต และวรรณะสี

ที่มา: <http://www.lauren-elizabeth.co.uk>

2. Tone คือ ความมืด (darkness) หรือความสว่าง (lightness) ของสีอัญมณี แบ่งออกเป็น 10 ระดับ ได้แก่ 1 = Extremely light, 2 = Very light, 3 = Light, 4 = Medium light, 5 = Medium, 6 = Medium dark, 7 = Dark, 8 = Very dark, 9 = Extremely dark และ 10 = Black ภาพประกอบ 33 ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว โทนของอัญมณีจะอยู่ในระดับ 2-8



ภาพประกอบ 33 แสดงระดับความมืดสว่างในระบบเจมเซต

3. Saturation คือ ความเข้มข้น (intensity) หรือความอึมตัวของสีอัญมณี แบ่งออกเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 1 = grayish (brownish), 2 = slightly grayish (brownish), 3 = very slightly grayish (brownish), 4 = moderately strong, 5 = strong และ 6 = vivid ดังภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 แสดงระดับความอึมตัวของสีในระบบเจมเซต

## 2.2 เทคนิคการวิเคราะห์ตรวจสอบขั้นสูง

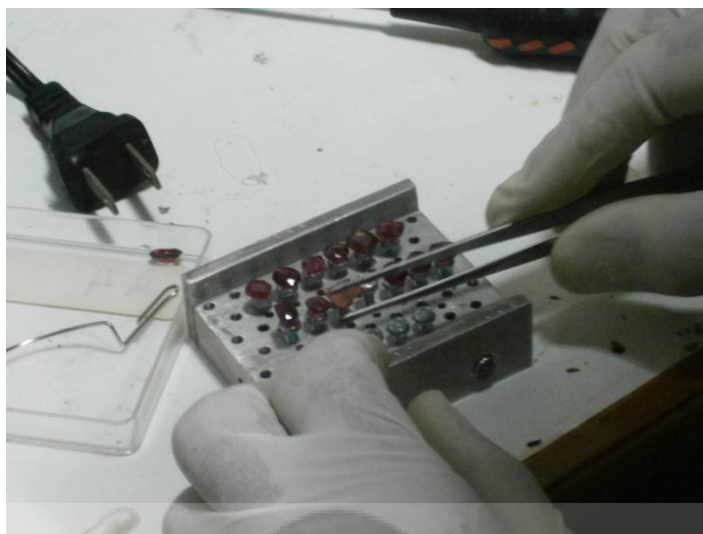
การตรวจสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง ตัวอย่างสปิเนล จะถูกวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยลำไอออน โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ Particle Induced X-ray Emission (PIXE) ส่วนการวิเคราะห์สมบัติเชิงแสง ตัวอย่างสปิเนล จะถูกนำมาวิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสงด้วยเทคนิค Ionoluminescence (IL) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน และ นำมาศึกษาลักษณะทางสเปกโทรสโกปี เพื่อศึกษากระบวนการการเกิดสีของตัวอย่าง โดยใช้วิธีการตรวจสอบ ด้วย Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectrophotometer

### การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี

#### การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย PIXE

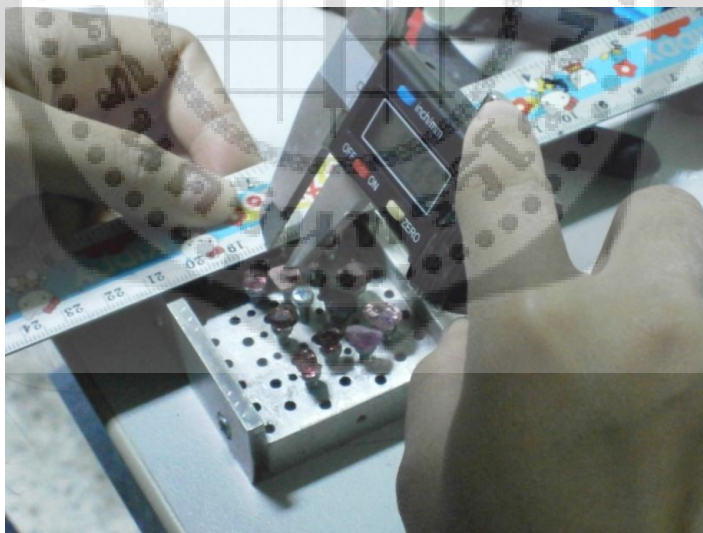
เทคนิค PIXE จะตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยลำอนุภาคกระสุนที่มีพลังงานอยู่ในเรอีน MeV โดยอนุภาคกระสุนที่วิ่งเข้าชนวัสดุตัวอย่างจะผลักรังสี orbital electron วงในๆ หลุดออกไปจากวงโคจรรอบนิวเคลียส ทำให้อะตอมต้องมีการปรับตัวโดย orbital electron วงนอกจะเคลื่อนย้าย (transition) ลงไปแทนที่ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงจากการมีค่าพลังงานที่ติดลบน้อยไปเป็นติดลบมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการปลดปล่อยพลังงานออกไปในรูปของรังสีเอกซ์ที่ไม่ต่อเนื่อง เพราะเกิดระหว่างระดับพลังงานที่มีค่าเฉพาะแน่นอน ซึ่งเรียกว่า characteristic x-ray ซึ่งพลังงานของ characteristic x-ray จะมีค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ เมื่อวัดค่าพลังงานของรังสีเอกซ์เหล่านี้ทำให้สามารถบอกได้ว่าวัสดุตัวอย่างนั้นประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง การวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย PIXE มีวิธีการดังต่อไปนี้

1. ก่อนทำการติดตัณุมณีตัวอย่างบน sample holder ได้ทำความสะอาดโดยใช้ acetone เช็ดพลอยตัวอย่างให้สะอาด และทำความสะอาดอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เช่น คีมคีบขนาดเล็ก, กล้องใส่พลอย และ sample holder ด้วยเมทานอล (methanol) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์ (methyl alcohol) โดยในทุกขั้นตอนต้องใส่ถุงมือเพื่อความสะดวกและป้องกันความชื้นจากเหงื่อที่ออกจากมือด้วย จากนั้นนำพลอยตัวอย่างติดกับหัวน็อตขนาด M 3x6 โดยใช้กาว EPOXY F-05 เป็นตัวยึดติด ซึ่งกาวชนิดนี้มีคุณสมบัติที่ทนต่ออุณหภูมิ เมื่ออยู่ใน vacuum chamber จะไม่ละลาย จากนั้นนำมาขันลงในรูสำหรับหัวน็อตบน sample holder และนำสารเรืองแสงติดที่หัวน็อตเช่นเดียวกับการติด พลอย โดยขันลงตรงกลางของ sample holder และขันหัวน็อตเปล่าใกล้ๆ กับสารเรืองแสง ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงการติดฟลอยด์ตัวอย่างบน sample holder

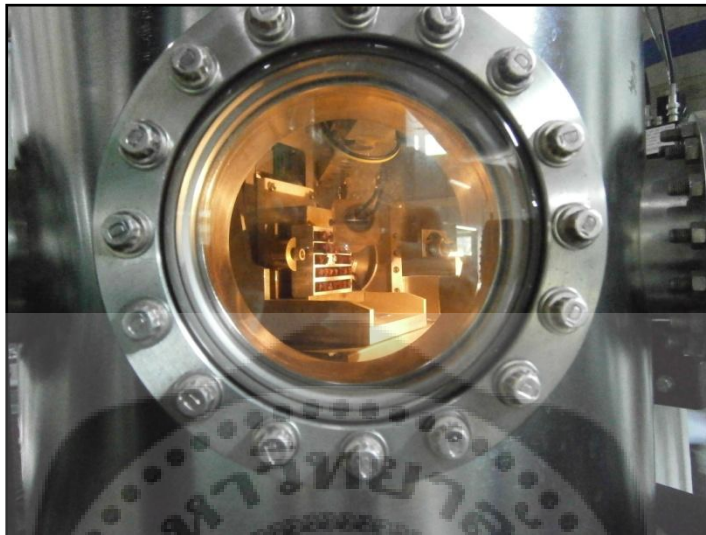
2. ทำการวัดฟิสิกส์ของฟลอยด์แต่ละเม็ดเทียบกับตำแหน่งของสารเรืองแสงให้เป็นฟิสิกส์ (0,0) โดยใช้เวอร์เนีย คาลิเปอร์ (Vernier Calipers) ชนิดดิจิทัล ภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 แสดงการวัดฟิสิกส์ของฟลอยด์แต่ละเม็ดเทียบกับตำแหน่งของสารเรืองแสง

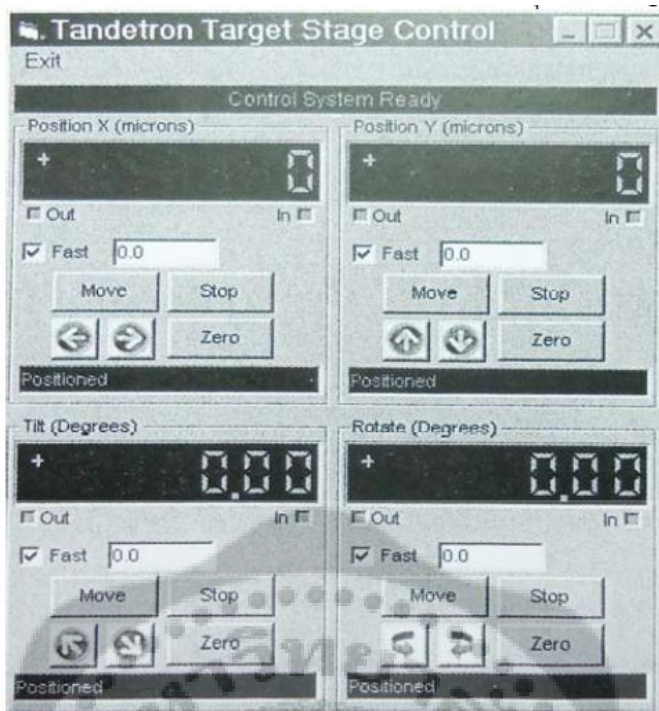
3. นำ sample holder ที่ติดฟลอยด์พร้อมทั้งตรวจสอบความเรียบร้อยแล้ว ใส่ลงในช่องยึด sample holder ใน Vacuum chamber โดยการใส่ควรระวังอยู่ 2 สิ่งหลักๆคือ หัววัด และ electron

gun เมื่อใส่เสร็จแล้วทำการปิดฝา Vacuum chamber ให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศจากข้างนอกเข้าไป จากนั้นทำการลดความดัน โดยให้ความดันใน vacuum chamber อยู่ที่ประมาณ  $10^{-6}$  mbar



ภาพประกอบ 37 แสดงภาพ sample holder ภายใน Vacuum chamber

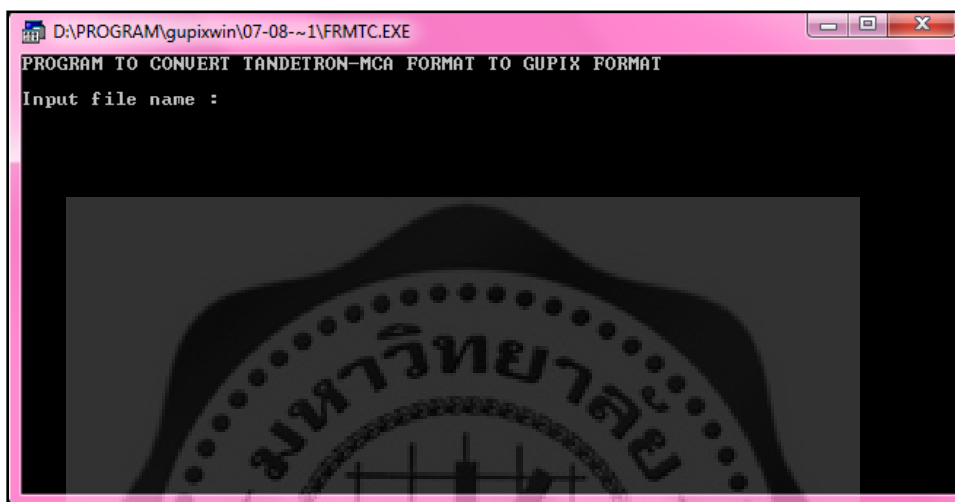
4. เมื่อความดันใน vacuum chamber อยู่ในระดับที่ต้องการแล้ว ทำการเลื่อนตำแหน่ง sample holder โดยการป้อนตัวเลขตำแหน่งของตัวอย่างในโปรแกรมควบคุมระบบ goniometer โดยครั้งแรกให้เลื่อนแบบ manual ไปยังสารเรืองแสง และเซตระบบเป็น zero – zero จากนั้นทำการปรับลำอนุภาคโปรตอนจาก x-y slit ให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม.



ภาพประกอบ 38 แสดงโปรแกรมควบคุมระบบ goniometer

5. เมื่อทำการปรับลำอนุภาคได้ตรงตามที่ต้องการแล้ว ต่อไปป้อนพิกัดของตำแหน่งของหัวน็อด และทำการเปิดลำอนุภาคที่แผ่วงจรรวม และทำการเก็บสเปกตรัมพลังงานด้วยโปรแกรม MEASTRO Program โดยดูว่าพีคพลังงานของธาตุเหล็กและธาตุสังกะสีชั้นพลังงานเคแอลฟา ( $K\alpha$ ) ตรงกับพลังงาน 6.39 และ 8.63 keV หรือไม่ ถ้าตรงแล้วก็ทำการเก็บข้อมูลสเปกตรัมพลังงาน จากนั้นทำการป้อนพิกัดของฟลอยด์ตัวอย่างต่อไป และต้องดูว่าสเปกตรัมพลังงานของฟลอยด์มีลักษณะบวมหรือไม่ โดยสาเหตุเกิดจากการสะสมของประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟลอยด์ซึ่งเป็น insulator (ประจุไฟฟ้าไม่สามารถไหลลงสู่กราวด์ได้) และเมื่อสะสมมากขึ้นจะกลายเป็นพลังงานศักย์สูง ซึ่งจะไปเร่ง secondary electron ที่หลุดออกมาให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้ characteristic x - ray ถูกกลบไป โดยการแก้ปัญหาคือการใช้ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เมื่อใช้ electron gun ควบคู่กับการยิงลำอนุภาคจะทำให้ประจุไฟฟ้าที่สะสมบริเวณผิวหน้าของฟลอยด์เป็นกลาง (neutralize) โดย electron gun จะใช้ไส้ดินสอที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 mm เป็น filament ทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนเมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจนเกิดความร้อน ส่วนแผ่น Accelerating grid จะจ่ายไฟบวกทำหน้าที่ในการเร่งอิเล็กตรอนวิ่งไปข้างหน้า พร้อมกับการดักไม่ให้ไอออนบวกที่อาจเกิดขึ้นวิ่งผ่านไปได้

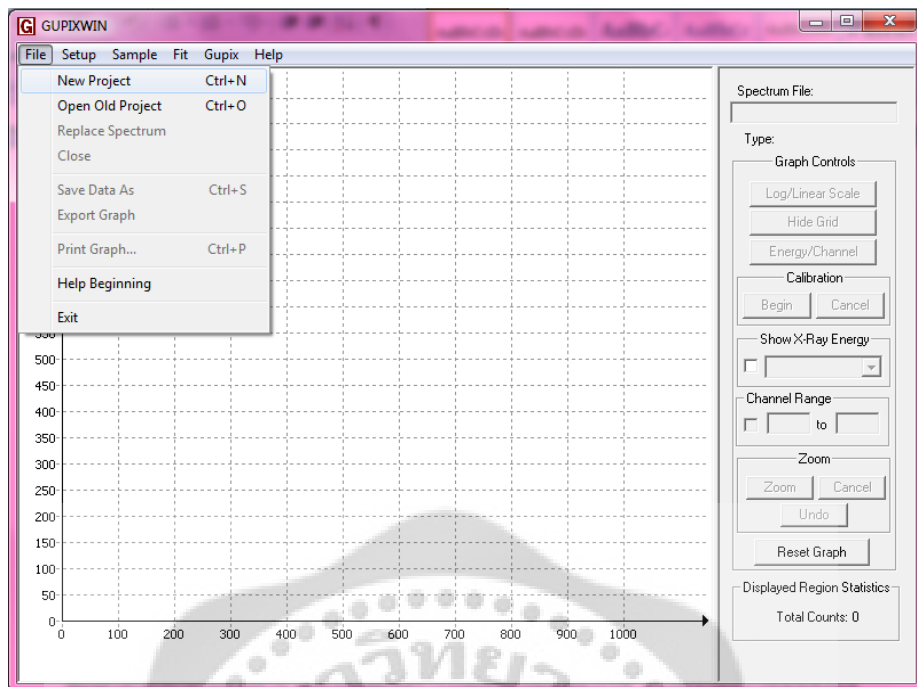
6. วิเคราะห์ผลการทดลองโดยโปรแกรม GupixWin สเปกตรัมจากการวัดที่แสดงผลในคอมพิวเตอร์นั้นจะถูกบันทึกไฟล์เป็นนามสกุล .SPE แต่สเปกตรัมที่ใช้กับโปรแกรม GupixWin นั้นต้องเป็นไฟล์นามสกุล .PIX ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์สเปกตรัมจะต้องทำการแปลงไฟล์โดยอาศัยโปรแกรม FRMTC ดังแสดงในภาพประกอบ 39



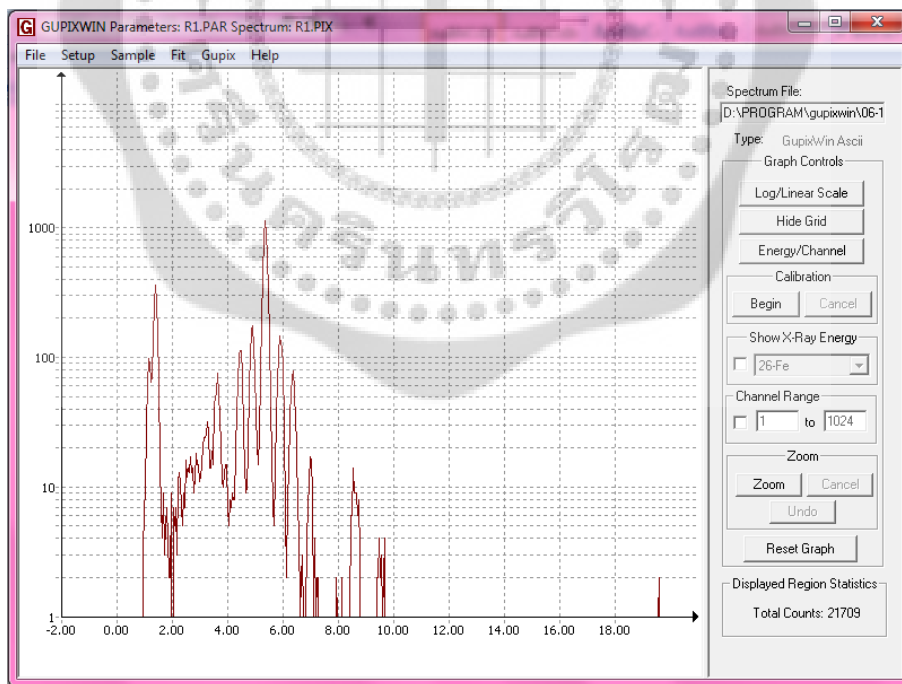
ภาพประกอบ 39 แสดงโปรแกรม FRMTC สำหรับแปลงไฟล์ของสเปกตรัม

เริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม GupixWin ด้วยการเลือกเมนู File > New Project ดังแสดงในภาพประกอบ 40 แล้วเลือกไฟล์ของสเปกตรัมที่ต้องการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพประกอบ 41

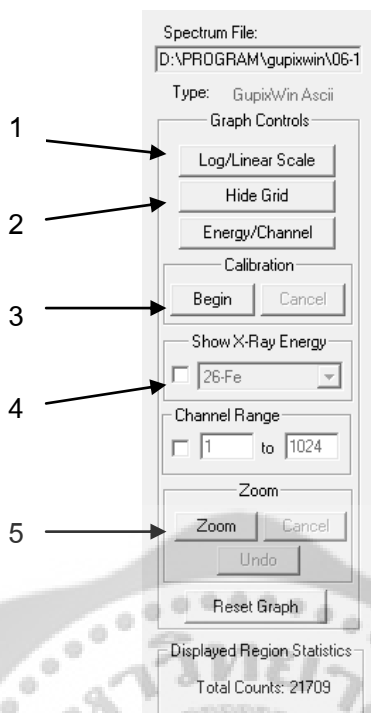




ภาพประกอบ 40 หัวข้อย่อยภายในเมนู File



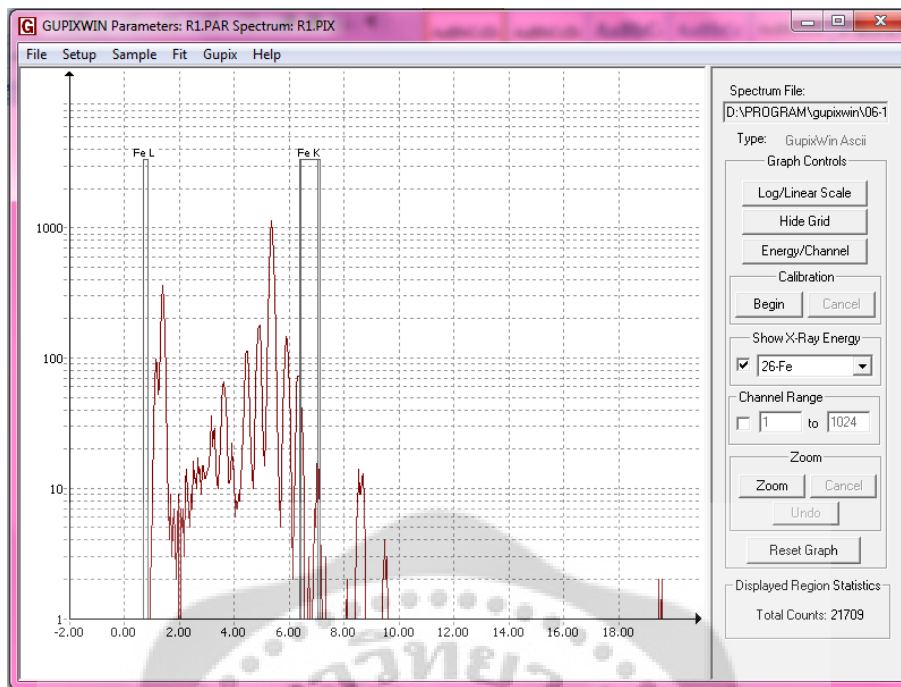
ภาพประกอบ 41 ตัวอย่างสเปกตรัมที่ต้องการวิเคราะห์



ภาพประกอบ 42 แถบเครื่องมือของโปรแกรม GupixWin

แถบเครื่องมือภาพประกอบ 42

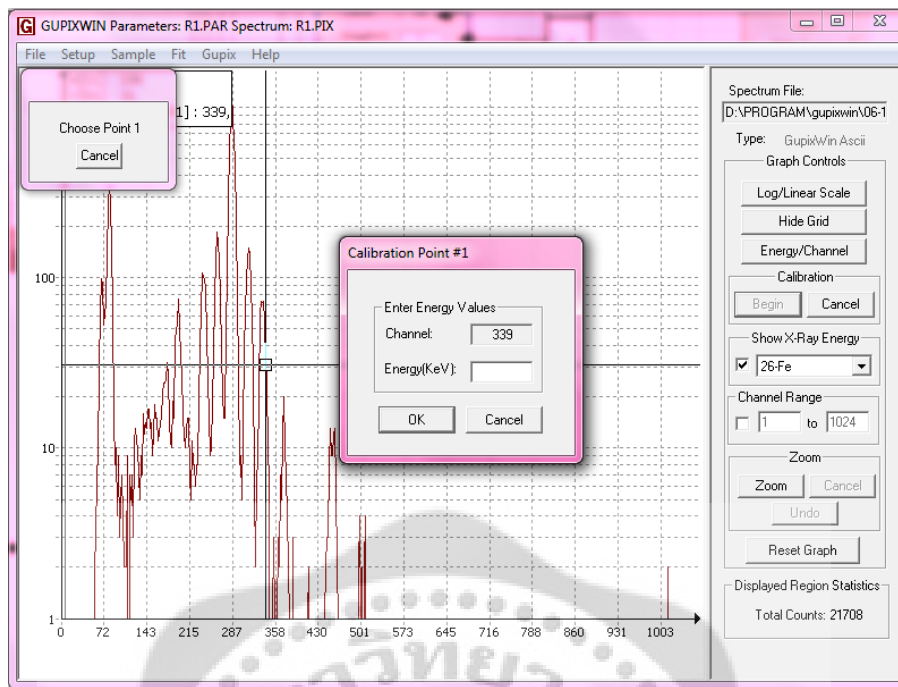
1. ปุ่มเลือกระหว่างการแสดงผลแบบ log scale หรือ linear scale
2. ปุ่มเลือกเพื่อซ่อนเส้น Grid
3. ปุ่มเลือกเพื่อ calibrate สเปกตรัม
4. หลังจากการ calibrate หากคลิกเลือกให้เกิดเครื่องหมาย ✓ ในส่วนนี้ กราฟด้านซ้ายมือจะแสดงเส้นบอกตำแหน่งของธาตุต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 43
5. ปุ่มเลือกเพื่อขยายกราฟในส่วนที่ต้องการ



ภาพประกอบ 43 หน้าต่างโปรแกรม GupixWin แสดงเส้นบอกตำแหน่งของธาตุเหล็ก

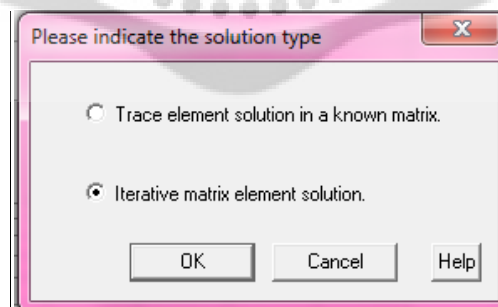
การ calibrate สเปกตรัมของหัวนับที่มีส่วนประกอบหลักเป็นธาตุเหล็กและสังกะสี

1. เลือกที่ปุ่ม **Begin** หลังจากนั้นเลือกจุดสูงสุดที่พีคของธาตุเหล็ก โดยเป็นพีคของพลังงาน  $K\alpha$  แล้ว double click จะทำให้ปรากฏ calibration point
2. ทำการใส่ค่าพลังงาน  $K\alpha$  ของธาตุเหล็ก โดยมีค่า 6.39 keV หลังจากนั้นเลือกจุดสูงสุดที่พีคของธาตุสังกะสี ใส่ค่าพลังงาน  $K\alpha$  ของธาตุสังกะสี โดยมีค่า 8.63 keV



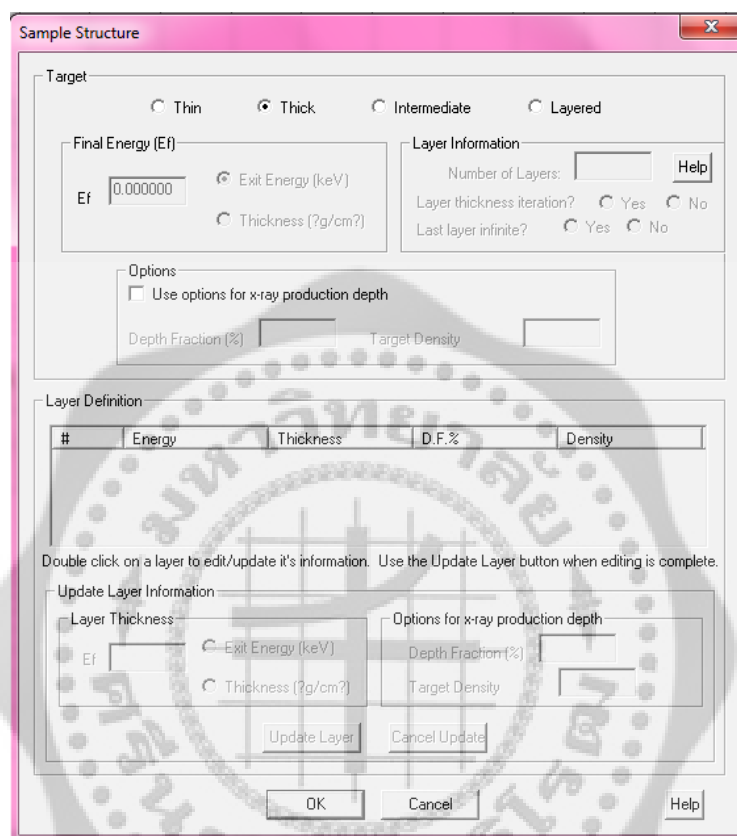
ภาพประกอบ 44 การ calibrate สเปกตรัมของธาตุเหล็กและธาตุสังกะสี

จากนั้นเลือกเมนู Setup > Trace or Matrix เพื่อเลือกว่าวัตถุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์เป็น Trace element หรือ Matrix element ดังแสดงในภาพประกอบ 45 โดยเลือก Trace element สำหรับวัตถุตัวอย่างที่ทราบชนิดและปริมาณของ Matrix composition สำหรับวัตถุตัวอย่างที่มี Matrix ชับซ้อนนั้นเลือก Matrix element



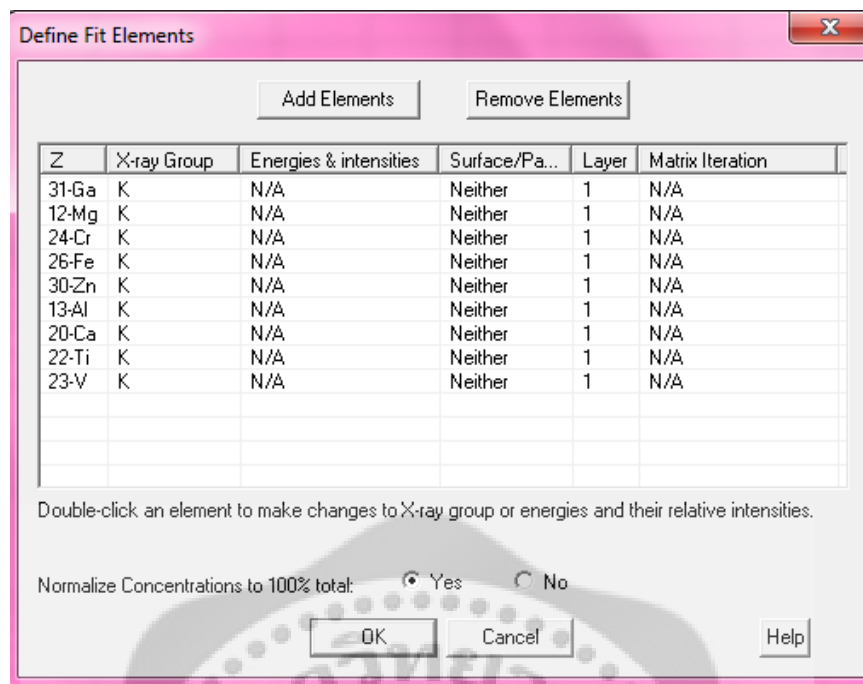
ภาพประกอบ 45 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับเลือกประเภทของวัตถุตัวอย่าง

เมื่อกำหนดประเภทของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์แล้ว เลือกเมนู **Sample > Sample Structure** เพื่อกำหนดโครงสร้างของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ว่ามีโครงสร้างแบบใด ดังแสดงในภาพประกอบ 46



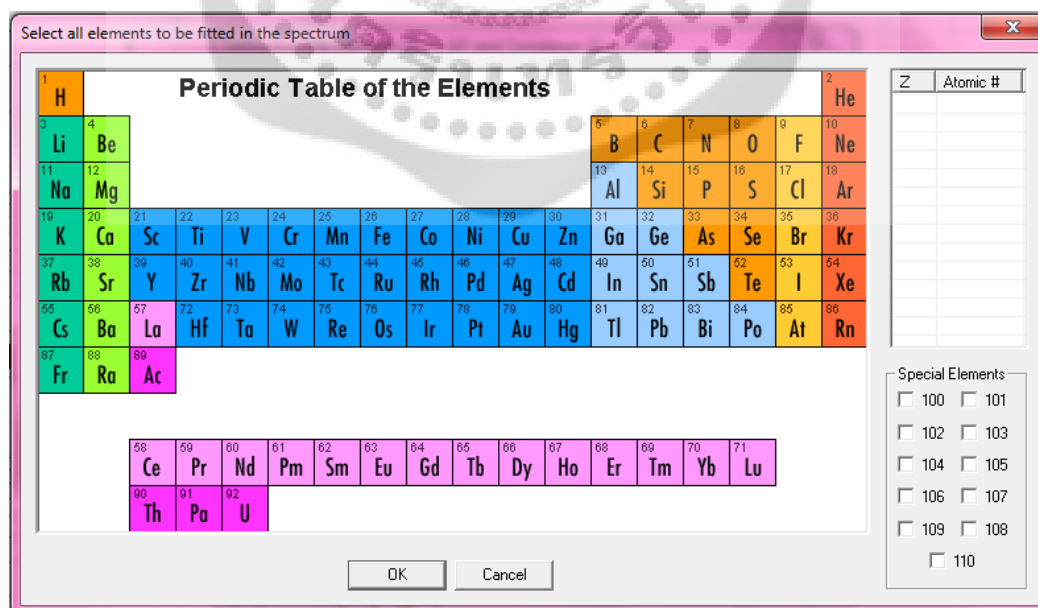
ภาพประกอบ 46 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับกำหนดโครงสร้างของตัวอย่าง

สำหรับวัตถุตัวอย่างที่เป็น **Matrix element** เลือก **Sample > Matrix Element Solution > Define Fit Elements** เพื่อกำหนดธาตุที่คาดว่าจะมีอยู่ในตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพประกอบ 47



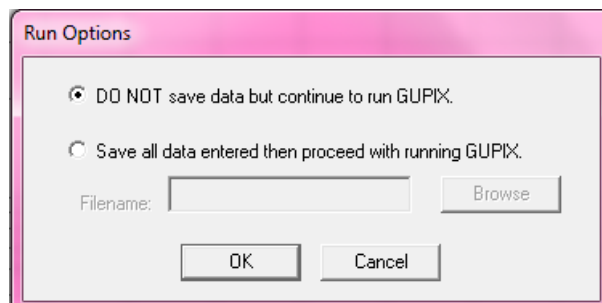
ภาพประกอบ 47 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับกำหนดธาตุที่คาดว่าเป็นองค์ประกอบ

เมื่อคลิกเลือก Add Elements จะปรากฏตารางธาตุ สำหรับเลือกธาตุองค์ประกอบของ  
วัตถุตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 48



ภาพประกอบที่ 48 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมแสดงตารางธาตุสำหรับกำหนดธาตุองค์ประกอบ

เมื่อเลือกเมนู Gupix > Run จะปรากฏหน้าต่างย่อยเพื่อให้เลือกที่จะทำการบันทึกข้อมูลที่ระบุหรือไม่ ข้อมูลที่ถูกบันทึกจะเป็นไฟล์นามสกุล .PAR ดังแสดงในภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 หน้าต่างย่อยของโปรแกรมสำหรับเลือกที่จะทำการบันทึกข้อมูลหรือไม่

ส่วนแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม GupixWin แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. กราฟแสดงผล 2 กราฟ ประกอบด้วย

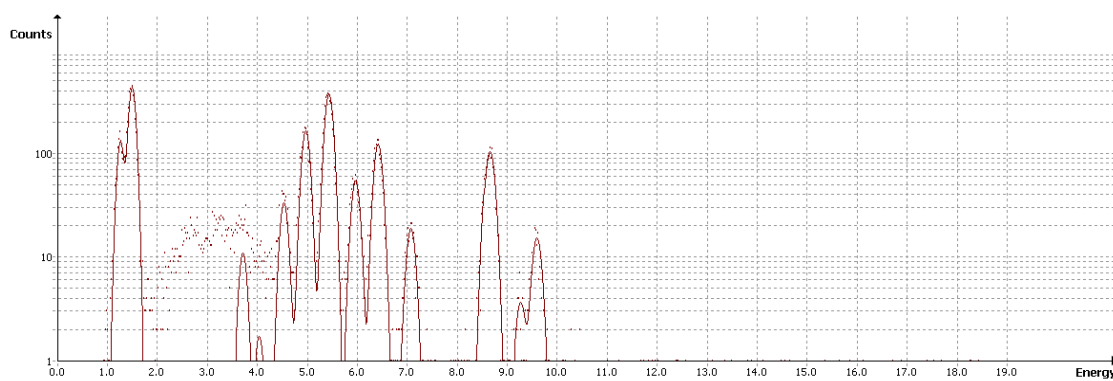
- สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าจากการวัด โดยแกนตั้งคือ จำนวน Count และแกนนอน คือ พลังงานในหน่วย keV ดังแสดงในภาพประกอบ 50
- ผลต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากการวัดกับค่าจากการวิเคราะห์ โดยแกนตั้งคือ ผลต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากการวัดกับค่าจากการวิเคราะห์ และแกนนอน คือ พลังงานในหน่วย keV ดังแสดงในภาพประกอบ 51

2. ไฟล์ตัวอักษร (Text file) ชื่อ Standard Output แสดงรายละเอียดของการวิเคราะห์ทั้งหมด

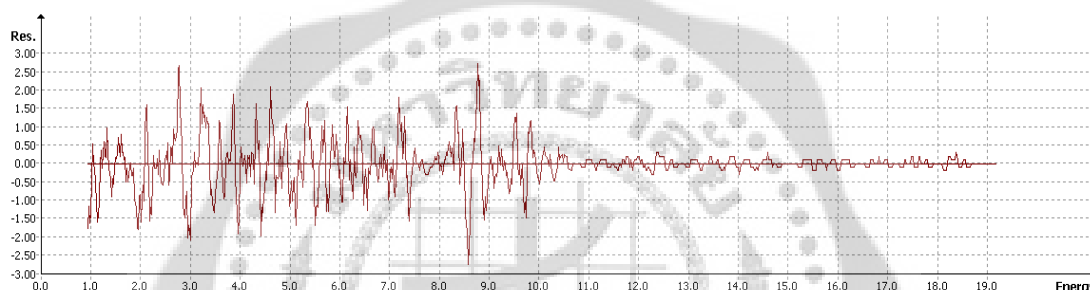
3. ไฟล์นามสกุล .CSV ซึ่งสามารถเรียกอ่านไฟล์เหล่านี้โดยใช้โปรแกรม Excel ประกอบด้วย

- CON.CSV ตารางแสดงค่าความเข้มข้น
- ERR.CSV ตารางแสดงค่าคลาดเคลื่อนในรูปร้อยละ
- DEC.CSV ตารางแสดงค่าการตัดสินใจ (Decision)
- LOD.CSV ตารางแสดงค่า Limit of Detection

4. ไฟล์ตัวอักษรชื่อ PIXTABLE.OUT แสดงปริมาณความเข้มข้นของรังสีเอกซ์ที่ channel และระดับพลังงานต่างๆ จากการทดลอง และการคำนวณ พร้อมทั้งผลต่างระหว่างค่าจากการทดลองและการคำนวณ



ภาพประกอบ 50 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าจากการวัด



ภาพประกอบ 51 ผลต่างระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์จากการวัดกับค่าจากการวิเคราะห์

### การวิเคราะห์สมบัติเชิงแสง

#### Ultraviolet-Visible-Near Infrared (UV-Vis-NIR) Spectrophotometer

เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer ใช้สำหรับวิเคราะห์สาเหตุการเกิดสี โดยวิเคราะห์ถึงชนิดของธาตุโลหะและไอออนของธาตุโลหะ ใช้ในการศึกษาการดูดกลืนแสง หรือให้แสงส่องผ่านโมเลกุลในตัวอย่าง ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตถึงอินฟราเรด ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 240 – 2,600 นาโนเมตร เครื่องมือนี้จะใช้ตรวจสอบและเปรียบเทียบตัวอย่างสปีเนลก่อนและหลังอิมพลาเนชัน โดยวัดค่าในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 – 700 นาโนเมตร โดยใช้คลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดทิวเทอเรียม และคลื่นแสงอินฟราเรดจากหลอดฮาโลเจน ฉายไปเป็นลำแสงกระทบตัวอย่าง ทำให้แสงบางช่วงคลื่นอาจถูกดูดกลืนโดยไอออนต่างๆ ภายใน หรือระหว่างโมเลกุลที่อยู่ภายในตัวอย่าง การดูดกลืนขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของไอออนที่มีอยู่ในตัวอย่าง โดยเครื่องจะมีโมโนโครเมเตอร์ ทำหน้าที่แยกคลื่นแสงออกเป็นคลื่นเดี่ยวที่ต่อเนื่องกัน โดยอัตโนมัติ ในการวัดความเข้มของแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยช่วงคลื่น UV-VIS จะใช้โฟโตมัลติพลายเออร์



ส่วนช่วงคลื่น NIR จะใช้ Cooled Pbs ซึ่งสามารถบันทึกสเปกตรัมได้ต่อเนื่องกัน และอ่านสัญญาณออกมาเป็นกราฟ absorbance (Abs) หรือ transmittance (%T)



ภาพประกอบ 52 เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer

### วิธีการใช้เครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer

1. นำตัวอย่างไปติดกับที่ยึดตัวอย่าง
2. นำที่ยึดตัวอย่างใส่เข้าไปในเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer
3. สั่งให้เครื่องทำงานผ่านคอมพิวเตอร์

### การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL

Ionoluminescence (IL) เป็นการศึกษาสมบัติทางแสงของวัสดุต่างๆ ทำให้ทราบถึงชนิดของตำหนิ (defect) ชนิดของสารเจือ (impurity) และโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (electronic structure) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการเปล่งแสงของวัสดุ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL ทำการทดลองใน Analysis Chamber ที่มีระดับความดันอากาศในระดับเดียวกันกับการทดลองโดยเทคนิค PIXE โดยสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากอูวิเคราะห์เป็นสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากวัสดุตัวอย่างผ่านเส้นใยนำแสง (optical fiber) ซึ่งต้องเลือก core ให้เหมาะสม โดยต้องเป็นวัสดุที่ส่งผ่านคลื่นแสงในช่วง 200 – 750 nm ได้ดี และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง 1000 ไมโครเมตร ที่สามารถนำส่งแสงได้ครบตามที่ต้องการ โดยปลายหนึ่งของเส้นใยนำแสงจะนำไปจ่อในระยะห่างจากตัวอย่างประมาณ 5 ซม. ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับ optical feedthrough ยาวประมาณ 10 ซม. (ตัวเชื่อมต่อ

ระหว่างภายในกับภายนอกตู้วิเคราะห์ ) ปลายด้านนอกของ optical feedthrough ต่อโดยตรงกับสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่ง output ของสเปคโตรมิเตอร์จะเป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งถูกส่งผ่านทางสาย interfacing cable ไปถูกบันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยบอร์ดและโปรแกรม OOIBase 32 ของบริษัท Ocean Optics Inc. ในส่วนของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค IL นั้น ได้ใช้พลอยตัวอย่างชุดเดียวกันกับการทดลองโดยเทคนิค PIXE และสามารถใส่ sample holder ชุดเดียวกัน แต่ต่างกันตรงที่ใช้พลังงานของลำอนุภาคโปรตอน โดยเทคนิค IL ใช้พลังงาน 1.4 MeV



## บทที่ 4

### ผลการศึกษาวิจัย

#### 1. ลักษณะทางกายภาพ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ พลอยเป็นการตรวจสอบพื้นฐาน เนื่องจาก พลอยแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว อย่างชัดเจน อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงแคบๆ ตามองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่บริสุทธิ์ และ/หรือความไม่สมบูรณ์ทางผลึก ซึ่งเป็นปกติของ พลอยจากธรรมชาติ คุณสมบัติเหล่านี้ ได้แก่ ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ค่าดัชนีหักเห (refractive index) การเรืองแสง (fluorescence) ภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet : UV) คลื่นสั้น (short-wave uv : SWUV) และคลื่นยาว (long-wave uv : LWUV) โดยใช้แสงจากหลอดแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV Lamp) ตู้การเรืองแสงภายในกล่องมืดภายในทาสีดำ (UV Box) เนื่องจากการเรืองแสงเกิดจากปฏิกิริยาของธาตุในพลอยที่มีต่อแสงความยาวคลื่นต่างๆ ไม่เหมือนกัน

ผลการคัดเลือกกลุ่มตัวอย่างจากสปิเนลธรรมชาติสีแดง อมน้ำตาลจำนวน 151 ตัวอย่าง โดยจัดให้มีหน้าเรียบขนานกัน ทั้งสองด้าน การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพลอยสปิเนล พบว่ามีค่าดัชนีหักเห 1.705 - 1.725, ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.50 - 4.06 และมีลักษณะเฉื่อยเมื่อถูกรังสี UV คลื่นสั้นและคลื่นยาว ดังแสดงในตาราง 3

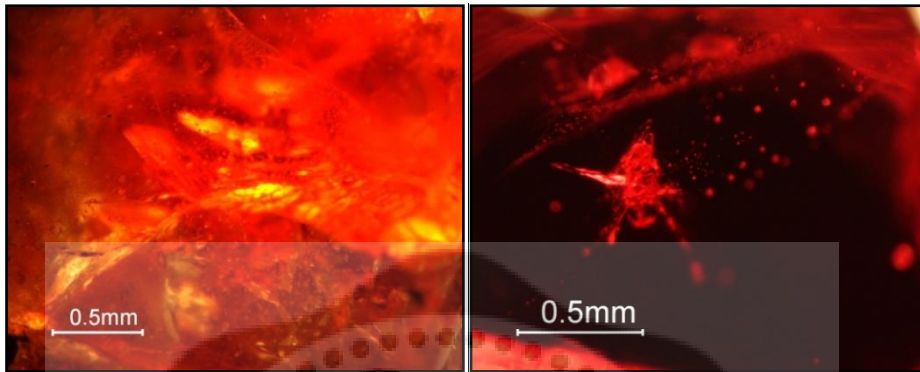
ตาราง 3 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพสปิเนลธรรมชาติที่นำมาใช้ในการศึกษานี้

Properties	Results
Refractive Index	1.705 - 1.725
Specific Gravity	3.50 - 4.06
Long Wave UV	Inert - Strong Red
Short Wave UV	Inert

ลักษณะตำหนิภายในที่พบภายในสปิเนลมีหลายชนิด ดังภาพประกอบ 39 ได้แก่

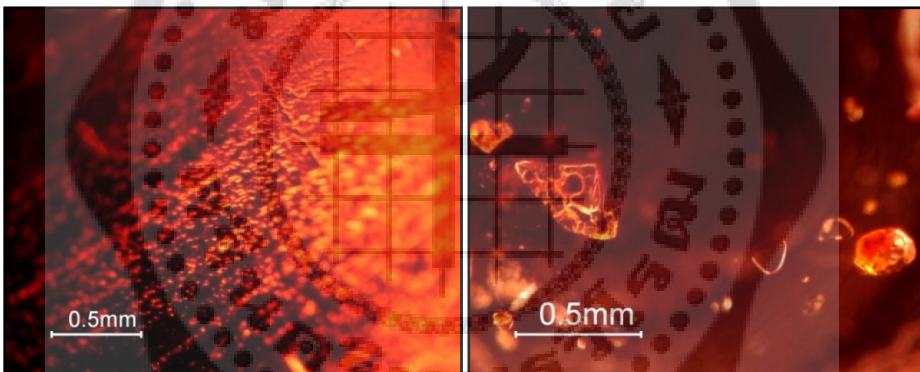
- ตำหนิคล้ายฝุ่น (minute exsolved particle)
- ตำหนิผลึกแร่ (crystal)
- ตำหนิรอยแตกสมานภายในของสปิเนล (healed fracture)

- ตำนิกกลุ่มหมอก (cloud)
- ตำนิกเส้นเข็ม (needle-like inclusion)



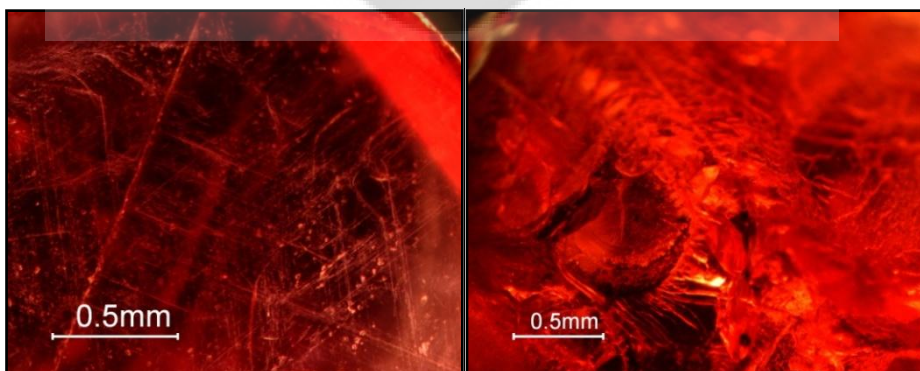
ตำหนักกลุ่มหมอก

ตำหนักผลึกแร่



ตำหนักคล้ายฝุ่น

ตำหนักผลึกแร่



ตำหนักเส้นเข็ม

ตำหนักรอยแตกสมานภายในของสปิเนล

ภาพประกอบ 53 ตำนิกภายในต่างๆ ที่พบในสปิเนลธรรมชาติ

ผลการจำแนกสีของสปีเนลตามระบบเจมเซต (GIA Gems color set) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มสีคือ สีแดงแกมส้ม ส้มแดง และส้มแกมแดง ดังแสดงสี ความมืดสว่าง และความอิ่มตัวของสีของตัวอย่างสปีเนล ดังแสดงในตาราง 4

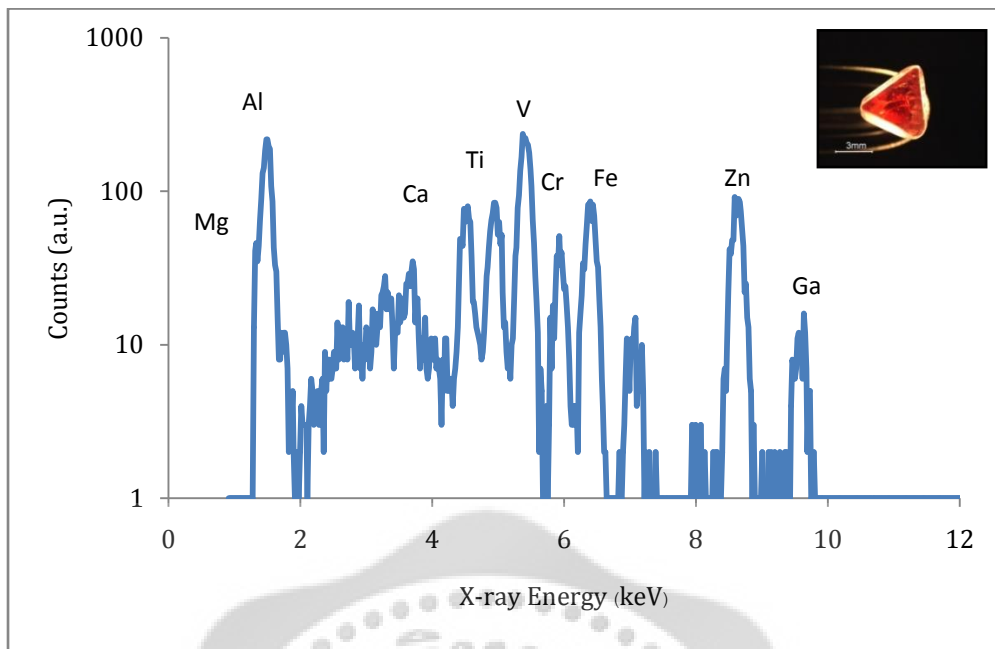
ตาราง 4 ผลการจำแนกสีสปีเนลตามระบบเจมเซต

สี (Hue)	จำนวน (เม็ด)	ความมืดสว่าง (Tone) / ความอิ่มตัวสี (Saturation)
แดงแกมส้ม (orangy Red)	19	4/3, 6/3, 7/4, 8/3
ส้มแดง (Red-Orange)	115	3/2, 4/2, 4/3, 5/4, 6/3, 6/4, 7/4
ส้มแกมแดง (reddish Orange)	17	3/3, 4/3, 5/4, 6/4, 8/3

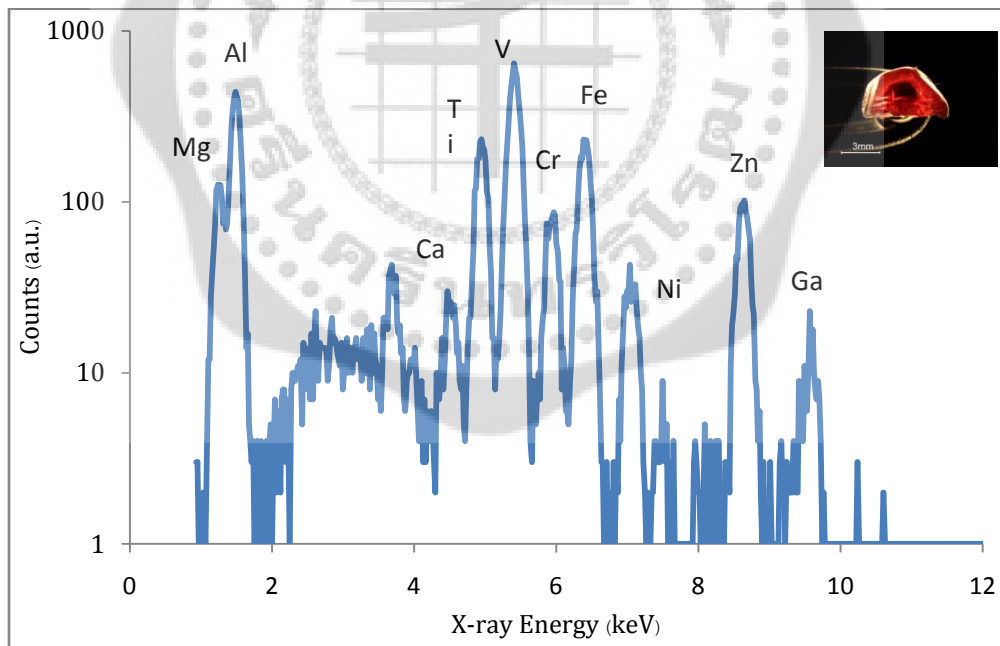
จากการวิเคราะห์คุณลักษณะสีของพลอยตามระบบเจมเซตของสปีเนลทั้ง 3 กลุ่มสี พบว่าสปีเนลกลุ่มสีแดงแกมส้มมีความมืดหรือความสว่างอยู่ในระดับที่ 4-8 (medium light-very dark) และมีความอิ่มตัวของสีอยู่ในระดับ 3-4 (very slightly grayish-moderately strong) สปีเนลกลุ่มสีส้มแดงมีความมืดหรือความสว่างอยู่ในระดับที่ 3-7 (light-dark) และมีความอิ่มตัวของสีอยู่ในระดับ 2-4 (slightly grayish-moderately strong) ส่วนสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงมีความมืดหรือความสว่างอยู่ในระดับที่ 3-8 (light-very dark) และมีความอิ่มตัวของสีอยู่ในระดับ 3-4 (very slightly grayish-moderately strong)

## 2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

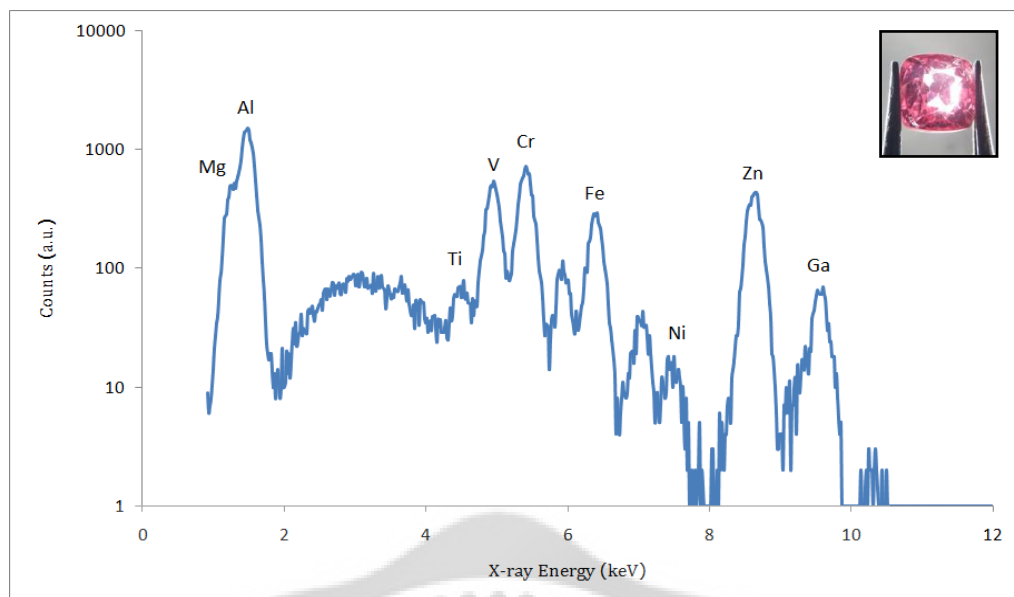
องค์ประกอบทางเคมีของสปีเนลจะประกอบด้วยกลุ่มของธาตุหลักและธาตุที่ให้สีต่างๆ ซึ่งชนิดและปริมาณของธาตุร่องรอย จะมีผลต่อสีที่ปรากฏ ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นตัวอย่างสเปกตรัมในภาพประกอบ 54-56 และสรุปผลไว้ในตาราง 5 ผลการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของธาตุในตัวอย่างสปีเนลจากประเทศพม่า ส่วนใหญ่ประกอบด้วย ธาตุหลัก คือ Mg และ Al และมีธาตุร่องรอย คือ Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn และ Ga



ภาพประกอบ 54 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S11



ภาพประกอบ 55 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส SM 1



ภาพประกอบ 56 แสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี PIXE ของสปีเนลสีแดงแกมส้ม รหัส SN 3

จากสเปกตรัมพลังงานในการวิเคราะห์โดยวิธี PIXE กราฟของสปีเนลแต่ละตัวอย่างแสดงถึงพลังงานเฉพาะของแต่ละธาตุ (Characteristic X-ray) ซึ่งเกิดจากการที่ลำอนุภาคโปรตอนพลังงานสูงกระตุ้นให้ orbital electron วงในของแต่ละธาตุ (ส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น K shell) หลุดออกไปจากวงโคจรรอบนิวเคลียส ทำให้อะตอมของธาตุมีการปรับตัวเพื่อสู่สภาวะสมดุล โดย orbital electron ที่อยู่วงนอกกว่าจะทรานซิชัน ลงมาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากระดับพลังงานมากไปยังระดับพลังงานน้อยกว่า ดังนั้นจึงมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ (X-ray)

กราฟของสปีเนลแต่ละตัวอย่าง นอกจากจะปรากฏพีคพลังงานของธาตุ แมกนีเซียม (Mg) และอลูมิเนียม (Al) ที่เป็นธาตุหลักๆ ที่ควรจะพบในสปีเนลแล้ว ยังพบธาตุร่องรอยอื่นๆ ด้วย เช่น แคลเซียม (Ca), ไทเทเนียม (Ti), วาเนเดียม (V), โครเมียม (Cr), แมงกานีส (Mn), เหล็ก (Fe), โคบอลต์ (Co), นิกเกิล (Ni), สังกะสี (Zn) และแกเลียม (Ga) เป็นต้น และจากกราฟสเปกตรัมพลังงานยังสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของสี ที่ปรากฏของ สปีเนล กับปริมาณของธาตุให้สีได้ด้วย เช่น สปีเนลสีส้มแดงแสดงถึงการมีอยู่ของธาตุเหล็กในปริมาณสูงซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมของเหล็กที่สูง

ตาราง 5 องค์ประกอบเคมีในสปีเนลตามกลุ่มสีต่างๆ ด้วยเทคนิค PIXE

ธาตุต่าง ๆ (Wt%)	ส้มแกมแดง	ส้มแดง	แดงแกมส้ม
Mg	15.77-22.02	16.45-20.88	15.55-19.93
Al	54.97-81.99	73.39-79.15	74.23-78.92
Ca	0.02-0.90	0.02-0.22	0.05-0.14
Ti	BDL.-0.58	0.01-0.54	0.03-0.44
V	0.43-3.50	0.02-2.02	0.54-1.86
Cr	BDL.-8.72	BDL.-7.12	0.15-0.90
Mn	BDL.-0.58	BDL.-0.08	BDL.-0.03
Fe	0.08-18.39	0.06-3.23	0.08-7.19
Co	BDL.-0.14	BDL.-0.02	BDL.
Ni	BDL.-1.49	BDL.-0.16	BDL.-0.04
Zn	BDL.-2.56	0.09-2.94	0.12-1.87
Ga	BDL.-0.12	BDL.-0.14	BDL.-0.04

\* BDL. – below detection limit

จากตารางผลการวิเคราะห์พบว่า ปริมาณของธาตุองค์ประกอบพื้นฐานของสปีเนลในแต่ละกลุ่มสีนั้นแตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน สังเกตได้จากปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) และธาตุเหล็ก (Fe) โดยสามารถสรุปปริมาณธาตุที่สำคัญเหล่านี้เพื่อถ่ายทอดการพิจารณา ดังตาราง 6

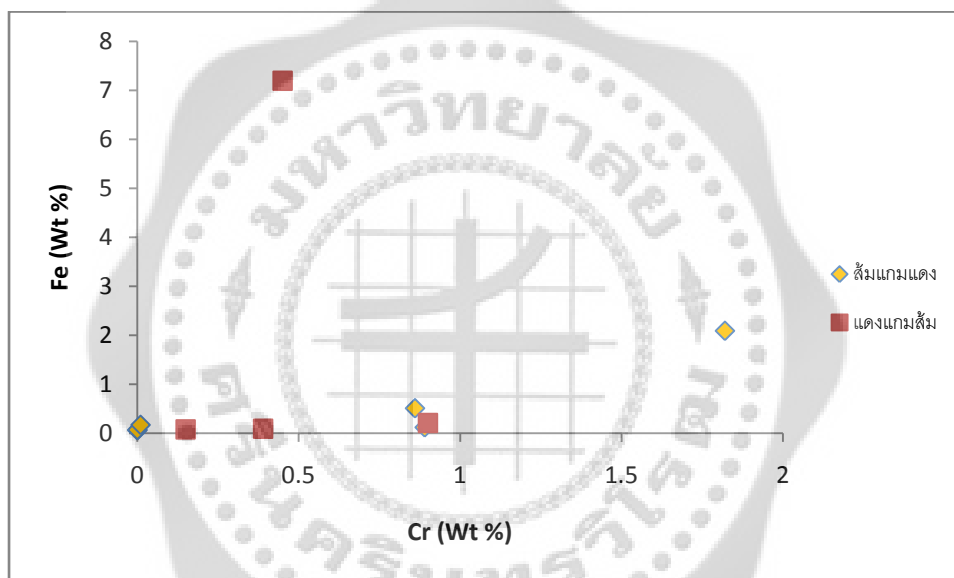
ตาราง 6 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของธาตุโครเมียมและเหล็กในสปีเนลตามกลุ่มสี

สีสัน	Cr (Wt %)	Fe (Wt %)	อัตราส่วน Fe / Cr
ส้มแกมแดง	0.03-8.72	0.08-18.39	0.058-3.6
ส้มแดง	0.01-7.12	0.06-3.23	0.09-7.14
แดงแกมส้ม	0.15-0.90	0.08-7.19	0.23-16

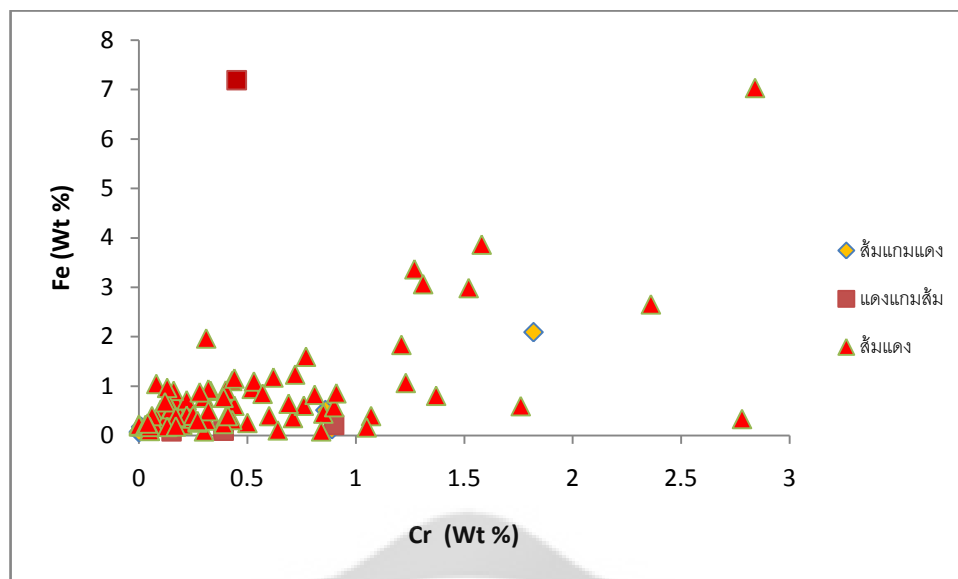
\* BDL. – below detection limit



ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของสปีเนลกลุ่มสีแดงแกมส้ม, ส้มแดง และส้มแกมแดง พบว่า ธาตุ Cr และธาตุ Fe เป็นธาตุที่ทำให้เกิดสีในสปีเนล ซึ่งสปีเนลกลุ่มสีเหล่านี้ จะมีปริมาณ Cr และ Fe ค่อนข้างสูง เนื่องจาก Fe ทำให้เกิดสีน้ำตาลเป็นสีรองเจือปนกับสีแดง ซึ่งสามารถหาปริมาณสัดส่วนธาตุเหล็กต่อโครเมียม ในกลุ่มสปีเนลสีส้มแกมแดงเป็น 0.058-3.6 กลุ่มสีส้มแดงเป็น 0.09-7.14 และกลุ่มสีแดงแกมส้มเป็น 0.23-16 ส่งผลให้สปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงมีสีแดงสดน้อยกว่ากลุ่มสีส้มแดงและกลุ่มสีแดงแกมส้มตามลำดับ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุ โครเมียมและธาตุเหล็ก ในตัวอย่าง สปีเนล มีความสัมพันธ์กับกลุ่มสีต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 57-58



ภาพประกอบ 57 ปริมาณของโครเมียมและเหล็กในสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงและแดงแกมส้ม

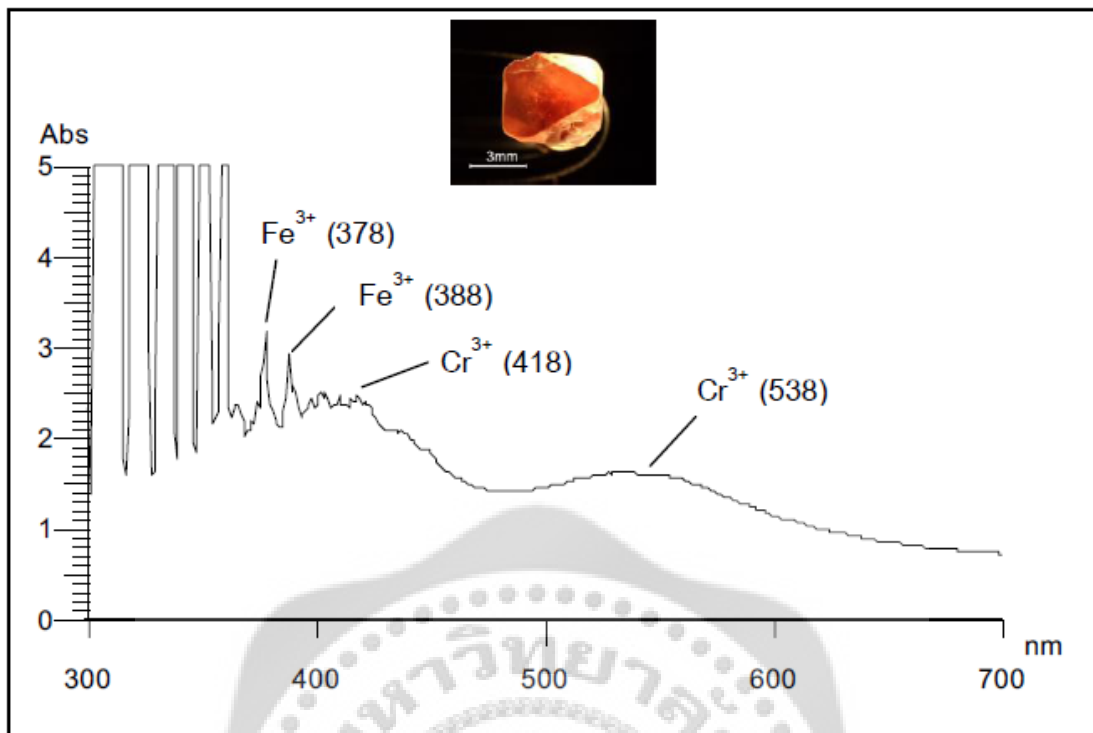


ภาพประกอบ 58 ปริมาณของโครเมียมและเหล็กในสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดง แดงส้ม และแดงแกมส้ม

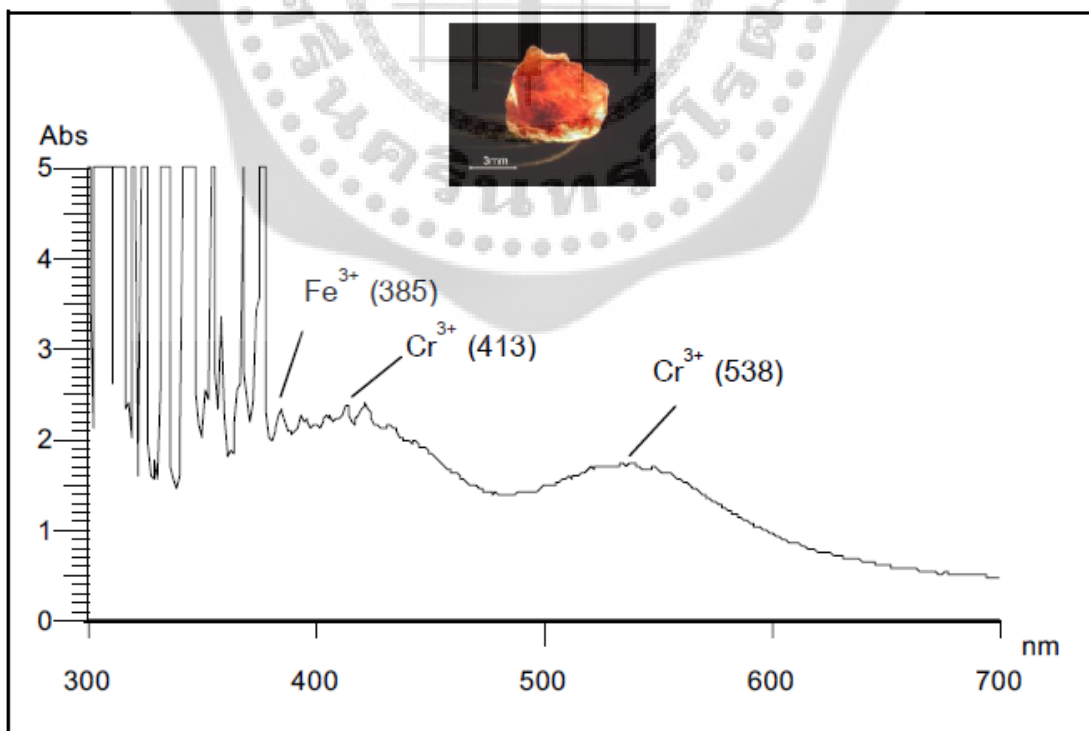
### 3. การวิเคราะห์สมบัติเชิงแสง

#### ผลการวิเคราะห์ UV-Vis-NIR Spectroscopy

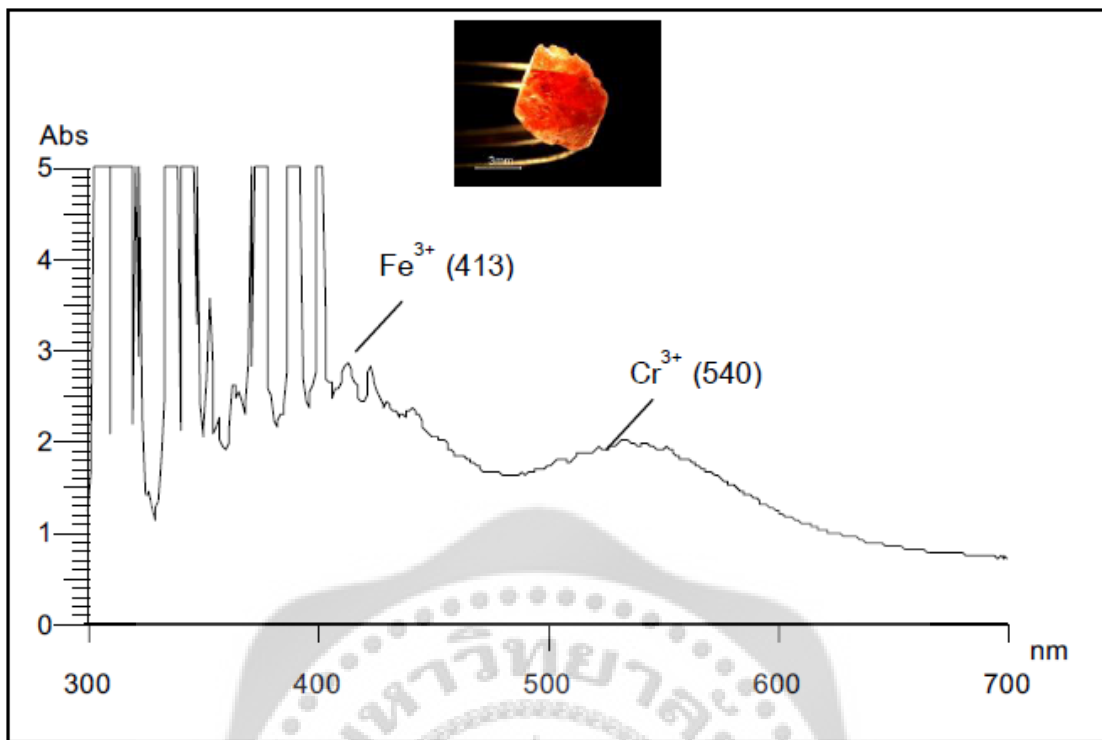
ลักษณะการดูดกลืนช่วง UV-Visible พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างสปีเนลจะมีความสัมพันธ์กับธาตุโครเมียมและเหล็ก ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเกิดสีในสปีเนล สปีเนลกลุ่มสีแดงแกมส้ม ส้มแดง และส้มแกมแดง โดยทั่วไปแสดงสเปกตรัมที่มีลักษณะคล้ายกันคือ แสดงการดูดกลืนของ  $Fe^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 305-330, 371-378 และ 380-381 nm และแสดงการดูดกลืนของ  $Cr^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 391-393, 413-418 และ 538-540 nm ดังแสดงในภาพประกอบ 59-65 สอดคล้องกับการเกิดสีของสปีเนลที่มีสาเหตุหลักมาจากการดูดกลืนของธาตุ  $Cr^{3+}$  และ  $Fe^{3+}$



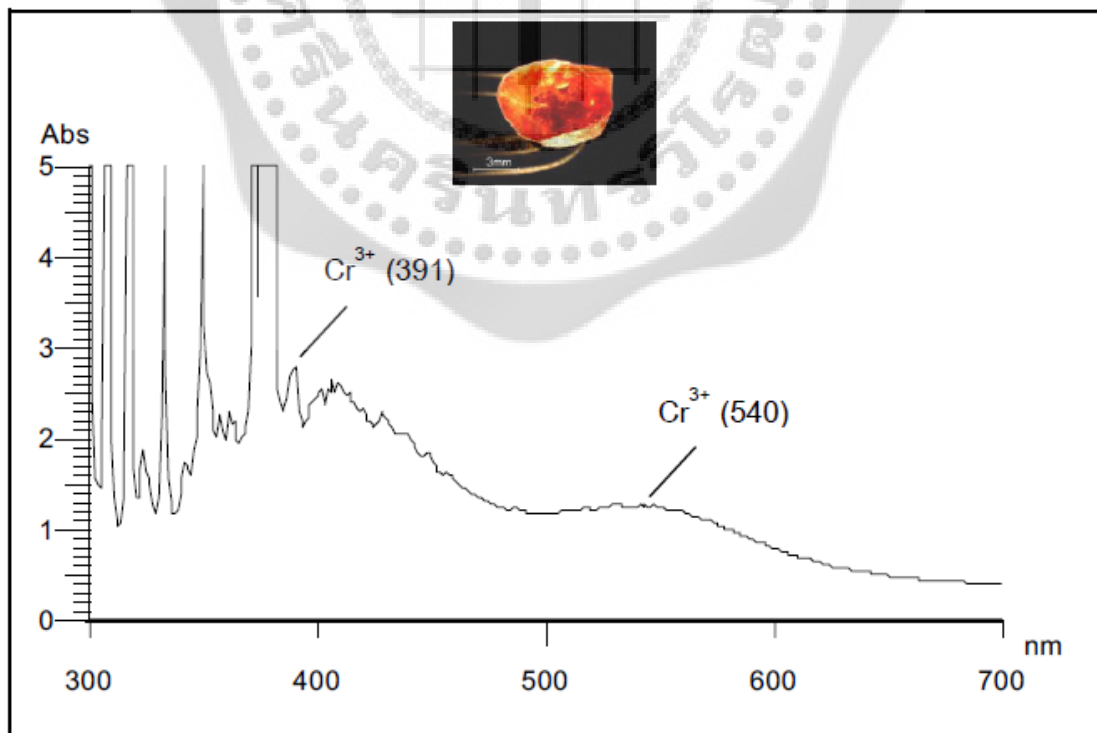
ภาพประกอบ 59 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 13



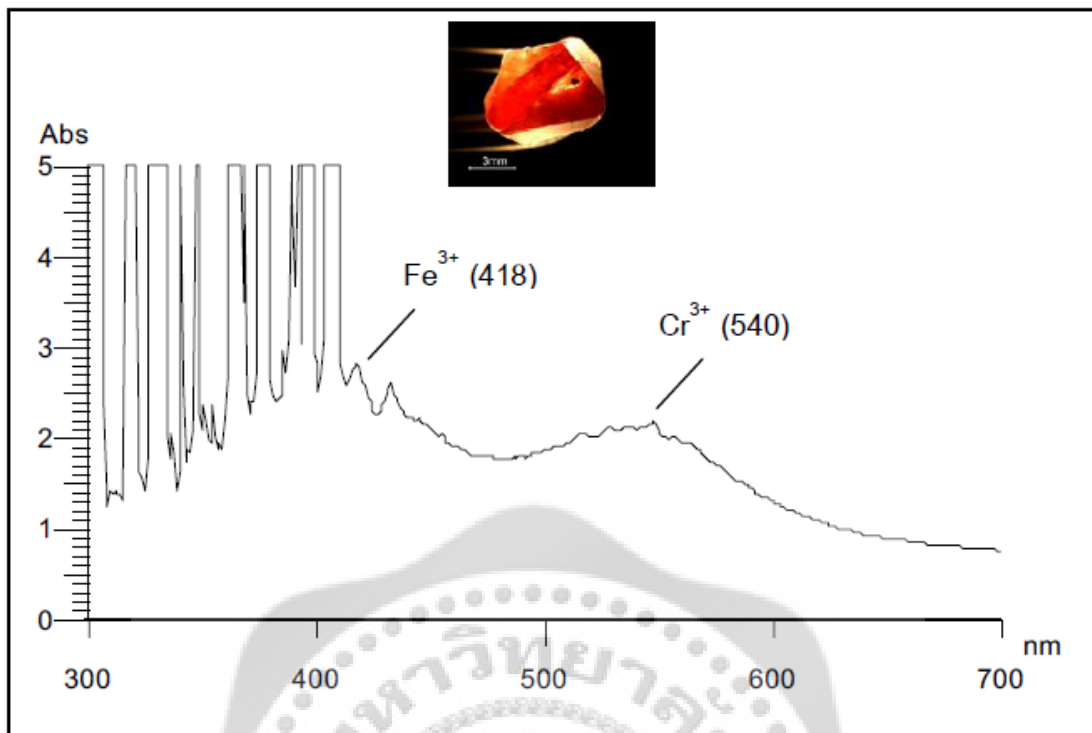
ภาพประกอบ 60 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 19



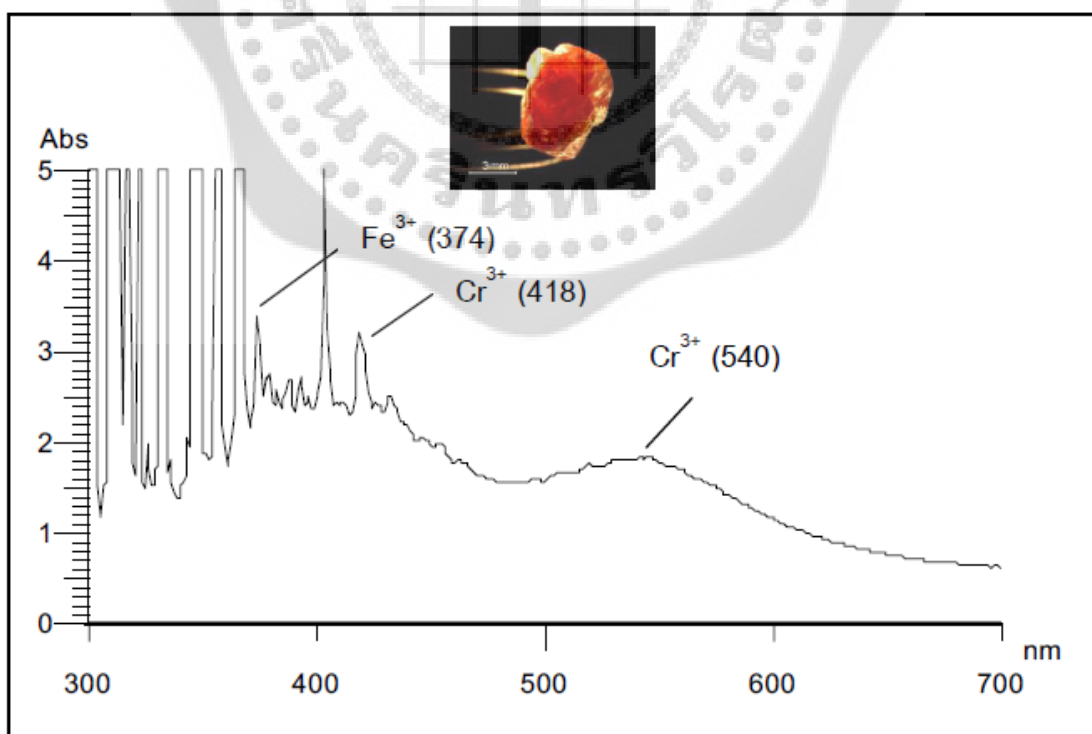
ภาพประกอบ 61 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM 22



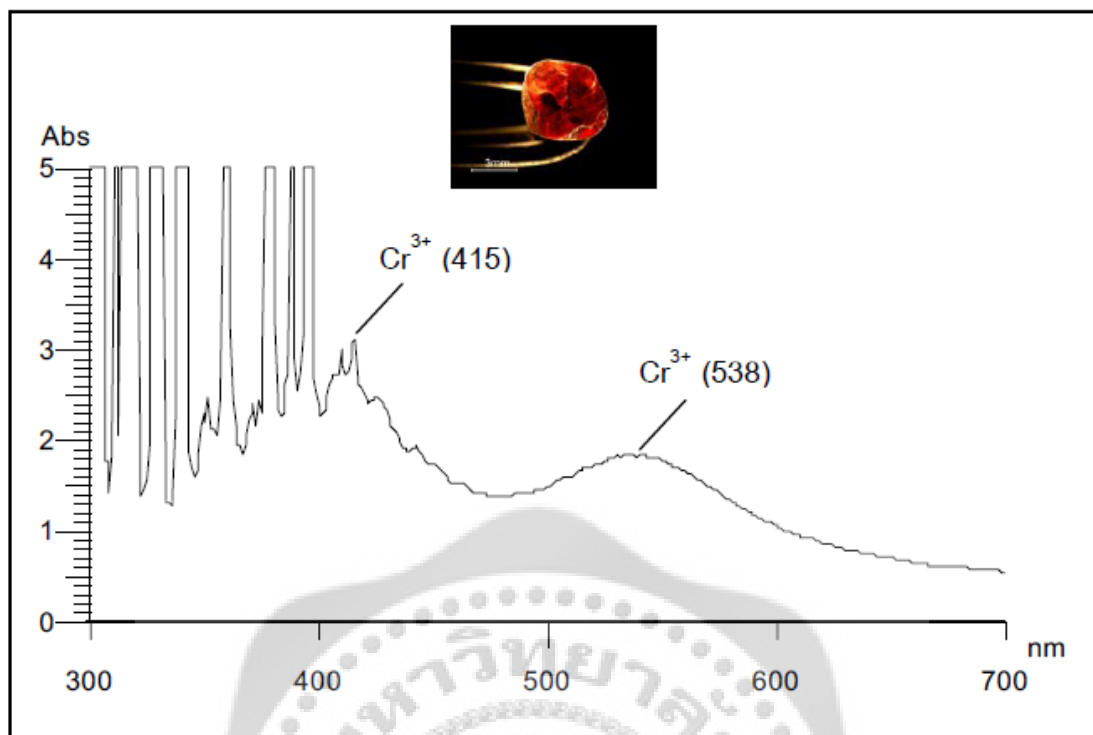
ภาพประกอบ 62 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM 23



ภาพประกอบ 63 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 25



ภาพประกอบ 64 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 30



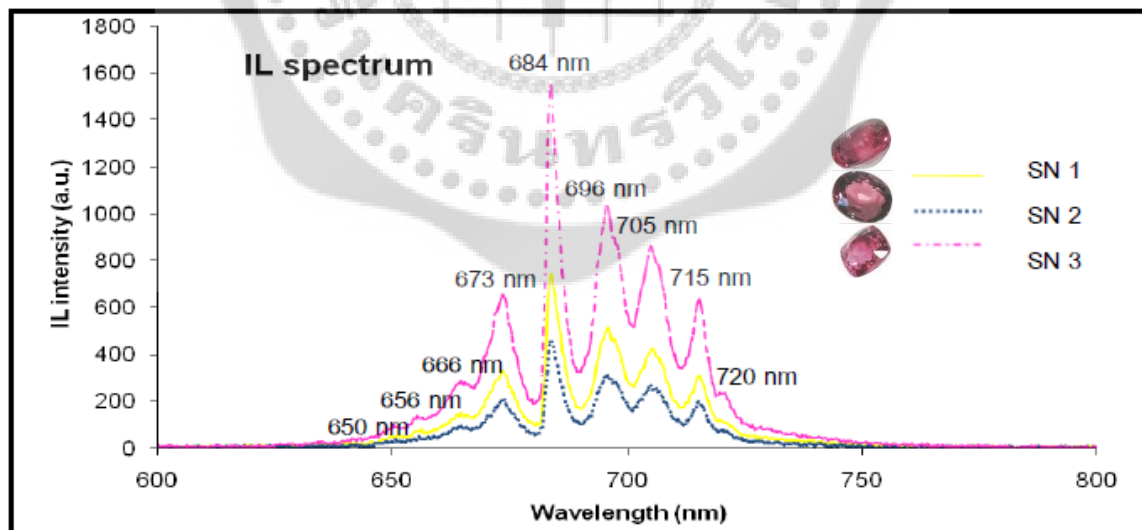
ภาพประกอบ 65 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 39

จากกราฟการดูดกลืนแสงของสปีเนลกลุ่มสี สีส้มแดง และส้มแกมแดง แสดงการดูดกลืนของ  $\text{Cr}^{3+}$  ที่ช่วงความยาวคลื่น 391-393, 413-418 และ 538-540 nm จะเกิดจากการที่  $\text{Cr}^{3+}$  เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ ) นอกจากนี้  $\text{Cr}^{3+}$  จะมีอิทธิพลต่อการดูดกลืนแสงแล้วยังมีไอออนของธาตุตัวอื่นที่มีอิทธิพลต่อการดูดกลืนแสงด้วยคือ  $\text{Fe}^{3+}$  โดยการดูดกลืนแสงของ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ช่วงความยาวคลื่น 371-378 และ 380-381 nm จะเกิดจากการที่  $\text{Fe}^{3+}$  เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอลูมิเนียม ( $\text{Al}^{3+}$ )

#### ผลการวิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสง (Ionoluminescence)

ผลของการกระตุ้นการเปล่งแสงของพลอย สปีเนลสีส้มแดงอมน้ำตาล พบว่ามีพีคของการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 650 – 720 nm (ตรงกับช่วงของแสงสีแดง) โดยรูปแบบการเปล่งแสงของสปีเนลสีส้มแดง เกิดจากการมี  $\text{Cr}^{3+}$  ปนอยู่ในโครงสร้างสปีเนล โดยการเปล่งแสงในช่วงนี้เกิดจากการที่  $\text{Cr}^{3+}$  เข้าไปแทนที่  $\text{Al}^{3+}$  ในโครงสร้างของสปีเนลที่ปกติแล้วจะใสไม่มีสี เนื่องจากความแตกต่างระหว่างระดับ metastable กับ ground state ( ${}^2E_g \rightarrow {}^4A_{2g}$ ) เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยโฟตอนของแสงที่มีพลังงานสูงกว่า 2 eV ขึ้นไป ซึ่งจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 664-715 nm

โดยความเข้มของการเปล่งแสงของไอออน  $\text{Cr}^{3+}$  จะขึ้นอยู่กับจำนวนของไอออน  $\text{Cr}^{3+}$  จากกราฟสเปกตรัมการเปล่งแสง ดังแสดงใน ภาพประกอบ 66 จะเห็นว่าพีคที่ความยาวคลื่น 683.54 nm มีความเข้มของการเปล่งแสงสูงสุด รองลงมาคือที่ 695.53 nm โดยทั้งสองพีคเกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้น valence ของ  $\text{Cr}^{3+}$  ในสถานะกระตุ้น (excited state) ที่อยู่ใน d ออร์บิทัล โดยมีพลังงานตรงกับชั้นพลังงาน  ${}^2E_g$  ทรานซิชันลงมายังสถานะพื้น (ground State ;  ${}^4A_2$ ) ซึ่งจะเห็นว่าทั้งสองพีคมีการแยกพีคกันอย่างชัดเจน เนื่องจากค่าความแตกต่างของพีคทั้งสองมีค่า 11.9 nm ซึ่งมากกว่าค่าการแยกพลังงาน (energy resolution) ของหัววัด IL ถึง 3.4 เท่า โดยการแยกของพีคทั้งสองนี้เป็นเพราะโครงสร้างของ MgO มีผลต่อโครงสร้างของ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ซึ่งทำให้ชั้นพลังงานใน d ออร์บิทัลของโครเมียมเกิดการเลื่อน (shift) ไปจากเดิมคือ ชั้นพลังงานของ  ${}^2E$  แยกออกห่างกันมากขึ้น มีความแตกต่างระหว่างชั้น  $3.14 \times 10^{-2}$  eV ส่วนที่ความยาวคลื่น 650.24, 655.82, 665.96 และ 673.46 nm เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากชั้นพลังงาน  ${}^2T_1$  ลงมายังความยาวคลื่น 715.18 และ 720.31 nm (sideband) ซึ่งทั้ง n - line และ Sideband นั้นไม่ได้อยู่ในช่วงพลังงานของการทรานซิชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิชัน (electronic transition) ของโครงสร้าง Octahedral -  $d^3$  system ดังนั้นอาจเกิดจากการสั่นของอะตอมโมเลกุล (vibrational) หรืออื่นๆ ทำให้เกิดการทรานซิชันลงมาได้



ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงสเปกตรัมที่วัดโดยวิธี Ionoluminescence (IL)

ซึ่งใช้เวลารับแสง 100 ms

#### 4. การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เทคนิคลำไอออน (Ion implantation)

สปีเนลโดยทั่วไปมีหลากหลายสีแต่สีแดงเข้มสด ซึ่งเป็นสีที่มีมูลค่าทางการตลาดสูงมีจำนวนน้อยมาก พลอยดิบสีแดงที่พบส่วนใหญ่เป็นสีแดงไม่เข้ม เนื่องจากมีสีอื่นเจือปนอยู่ เช่น สีแดงแกมส้ม สีแดงแกมน้ำตาล สีแดงแกมม่วง อีกทั้งมีตำหนิจำนวนมาก ทำให้ พลอยดูไม่สะอาด เกิดการกระจายแสงไม่สมบูรณ์ มีผลต่อความสดและอิมพัลของสี ทำให้ พลอยกลุ่มนี้มีมูลค่าการตลาดต่ำกว่าสปีเนลสีแดงสดมาก การปรับปรุงคุณภาพพลอยเพื่อให้พลอยสะอาดและมีสีเข้มสด ส่วนใหญ่มักทำโดยการให้ความร้อน โดยพลังงานจากความร้อนจะไปทำให้ธาตุรอรอยเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตามวิธีการเผาพลอยก็มีข้อจำกัด เช่น หากต้องการเปลี่ยนสีและให้มีการเปลี่ยนแปลงเชิงแสงที่ชัดเจน เช่น ให้สีเข้มสดขึ้น พลอยใส โปร่งแสง ต้องใช้ความร้อนสูงและระยะเวลาาน ซึ่งอาจทำให้พลอยแตกร้าว เนื่องจากการใช้ความร้อนสูงให้กับพลอยโดยตรง ผลการทดลองเบื้องต้นในการใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันกับสปีเนล คุณภาพต่ำสีแดง โดยใช้ ไอออนและอนุภาคพลังงานสูงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนให้ผลเป็นที่น่าพอใจ พบว่าสามารถลดปริมาณ ตำหนิจำพวก minute particle และ liquid inclusion ลงได้ โดยขึ้นกับปริมาณโดสที่ใช้ ทำให้ พลอยดูสดใสแวววาวขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถลดสีรองลงได้ด้วย ผลการทดลองของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันแสดงดังในตาราง 7 เนื่องจากไอออนที่ฝังเข้าไปในพลอยเหนียวทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของธาตุทรานซิชัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี สามารถลดสีรองลงได้ ผลการทดลองแสดงดังใน ภาพประกอบ 53-88 โดยสามารถอธิบายได้ว่า ออกซิเจนไอออนจากขบวนการอิมพลานเตชัน ถูกเร่งด้วยความเร็วสูงทำให้เกิดพลังงานสูงโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของระบบ ทำให้ตำหนิที่อยู่ภายใน พลอย เช่น minute particle และ liquid inclusions ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้ พลอยไม่แตก เพิ่มความสะอาดของ พลอย และความใส (transparent) ซึ่งเป็นสมบัติเชิงแสง ที่เป็นที่ต้องการของตลาด โดยไม่มีการทำลายเนื้อและลดน้ำหนักของพลอยลง

ตาราง 7 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันสปีเนลกลุ่มสีส้มแดง

รหัสตัวอย่าง	ระยะเวลา (นาทื)	โดส (ไอออน/ซม <sup>2</sup> )	สีก่อนอิมพลานเตชัน	สีหลังอิมพลานเตชัน
SM1	60	$2.7 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/3	ส้มแดง 8/2
SM2	60	$3.8 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแดง 8/2



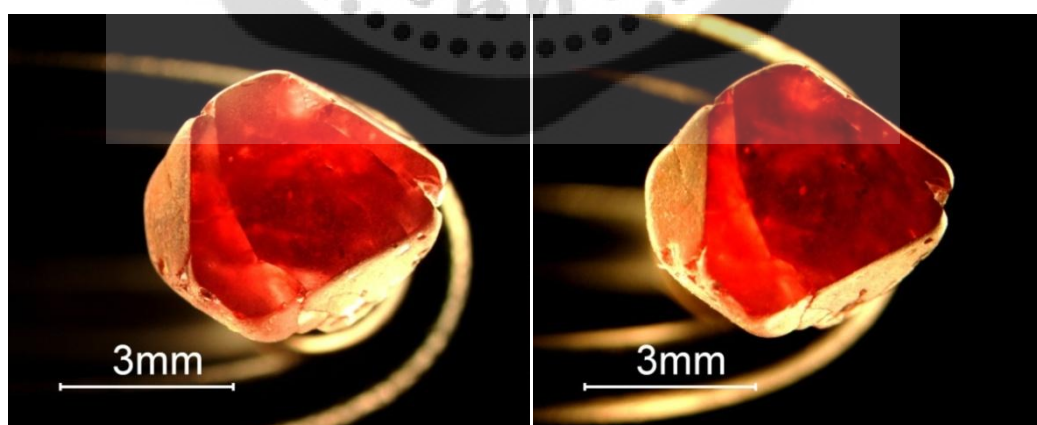
ตาราง 7 (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ระยะเวลา (นาทีก)	โดส (ไอออน/ซม <sup>2</sup> )	สีก่อนอิมพลานเตชัน	สีหลังอิมพลานเตชัน
SM3	60	$4 \times 10^{17}$	ส้มแดง 3/2	ส้มเหลือง 6/3
SM4	60	$3.8 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 7/3
SM5	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM6	60	$7 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแดง 6/3
SM7	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแกมแดง 8/3
SM8	60	$7 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM9	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 5/4	ส้มแดง 6/4
SM10	60	$5 \times 10^{17}$	ส้มแดง 3/2	ส้ม 8/2
SM11	60	$8 \times 10^{17}$	ส้มแดง 3/2	ส้มเหลือง 7/3
SM12	60	$7 \times 10^{16}$	ส้มแดง 3/2	ส้ม 5/2
SM13	60	$7 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/3	ส้มแดง 8/2
SM14	60	$4 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/3	ส้มแดง 8/2
SM15	60	$5 \times 10^{17}$	ส้มแดง 3/2	ส้ม 6/3
SM16	60	$4 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM17	60	$8 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแดง 8/2
SM18	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM19	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM20	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 3/2	ส้ม 6/3
SM21	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 6/3
SM22	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแดง 6/3
SM23	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 6/3
SM24	60	$1 \times 10^{18}$	ส้มแดง 3/2	ส้ม 8/2
SM25	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/3	ส้มแดง 8/2
SM26	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM27	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2

ตาราง 7 (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	ระยะเวลา (นาทีก)	โดส (ไอออน/ซม <sup>2</sup> )	สีก่อนอิมพลานเตชัน	สีหลังอิมพลานเตชัน
SM28	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM29	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM30	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 6/3
SM31	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM32	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 8/2
SM33	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 6/3
SM34	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้มแดง 8/2
SM35	60	$6 \times 10^{17}$	ส้มแดง 4/3	ส้ม 6/3
S12	120	$5.5 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/4	แดงแกมส้ม 7/4
S15	120	$5.5 \times 10^{17}$	ส้มแดง 6/4	แดงแกมส้ม 7/4

การใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันกับสปีเนล กลุ่มสีส้มแดงสามารถ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี สามารถลดสีรองลงได้ เนื่องจากความมืดลดลง มีความสว่างเพิ่มขึ้น และความเข้มตัวของสีพลอยหลังไอออนอิมพลานเตชันมีมากขึ้น ดังภาพประกอบ 67-76

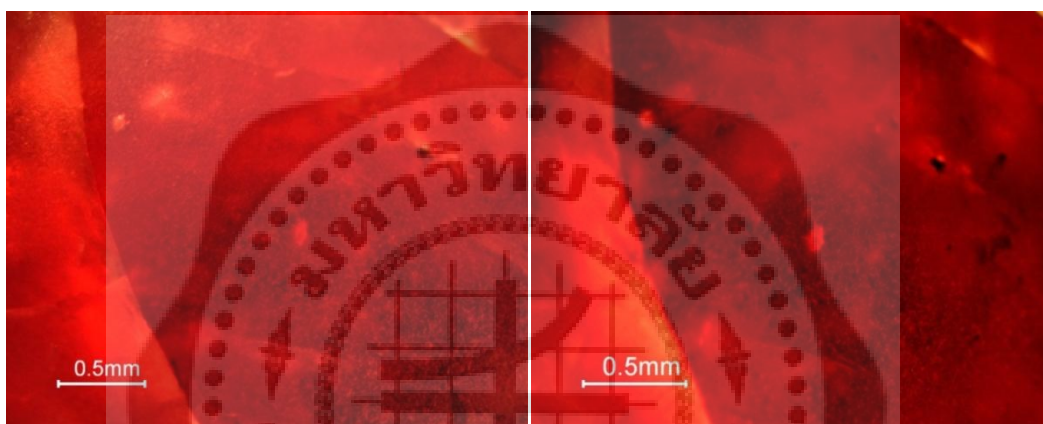


ภาพประกอบ 67 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM1

(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 6/3

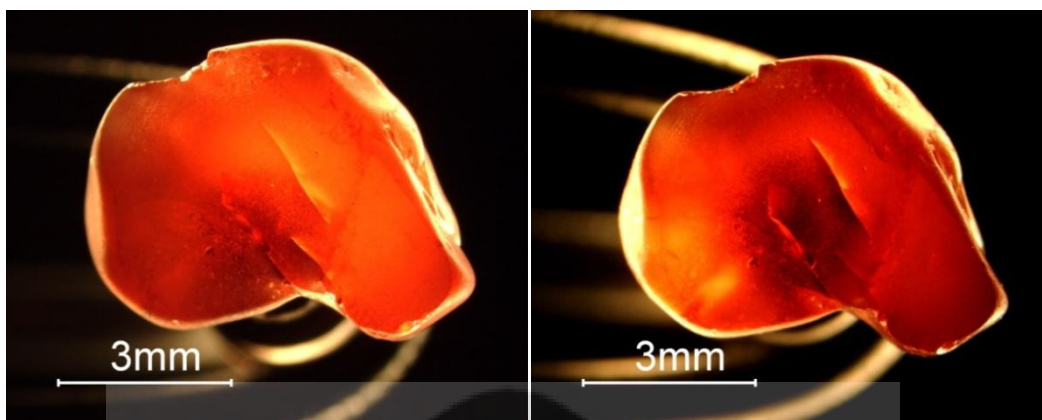
(ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 8/2

จากภาพประกอบ 67 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM1 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM1 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสี



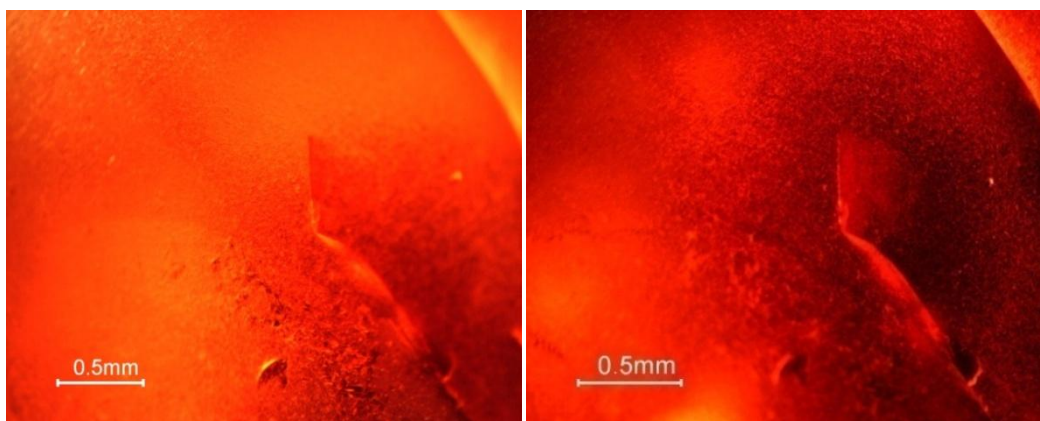
ภาพประกอบ 68 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM1  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 6/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 8/2

จากภาพประกอบ 68 (ก) และ (ข) ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM1 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM1 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสี นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าภาพ (ข) จะมีสีดำมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของพลอย ทำให้บริเวณพื้นจากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องตำหนิคล้ายฝุ่นและตำหนิกลุ่มหมอกลดลง จึงทำให้เห็นพื้นจากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



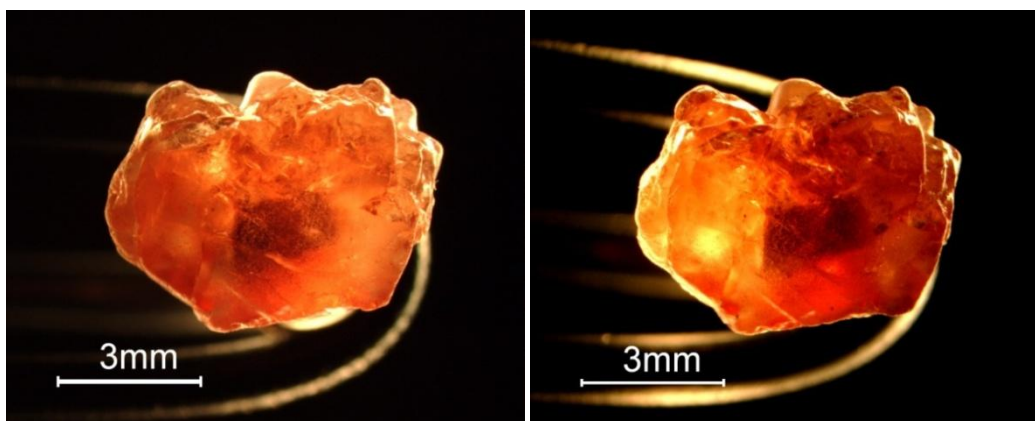
ภาพประกอบ 69 ผลของออกซิเจนไอออนนิมฟลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM2  
(ก) ก่อนไอออนนิมฟลานเตชันสีส้มแดง 4/3 (ข) หลังไอออนนิมฟลานเตชันสีส้มแดง 8/2

จากภาพประกอบ 69 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย และทั้งสองภาพมีลักษณะของแสงที่ต่างกัน เนื่องจากการจากวางตำแหน่งของพลอยที่แตกต่างกันเล็กน้อย จึงทำให้แสงที่ใช้ส่องพลอยมีตำแหน่งที่แตกต่างกันตามไปด้วย โดยภาพ (ก) แสงไฟที่ใช้จะส่องทางด้านขวาและตรงกลาง ส่วนภาพ (ข) แสงไฟที่ใช้จะส่องทางด้านซ้ายมากกว่า ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM2 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM2 หลังไอออนนิมฟลานเตชัน พลอยมีสีส้มแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสี



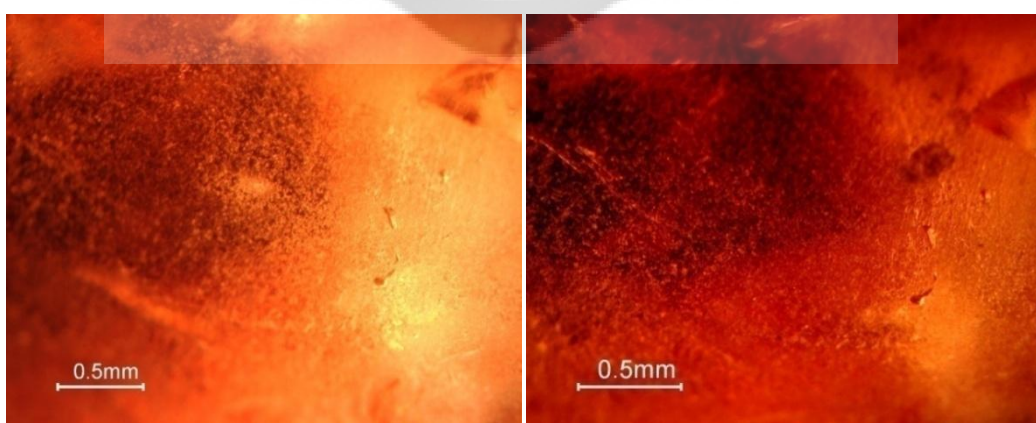
ภาพประกอบ 70 ผลของออกซิเจนไอออนนิมฟลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM2  
 (ก) ก่อนไอออนนิมฟลานเตชันสีส้มแดง 4/3      (ข) หลังไอออนนิมฟลานเตชันสีส้มแดง 8/2

จากภาพประกอบ 70 (ก) และ (ข) ภาพ (ก) เป็นภาพฟลอยสปีเนล รหัส SM2 ฟลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของฟลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพฟลอยสปีเนล รหัส SM2 หลังไอออนนิมฟลานเตชัน ฟลอยมีสีส้มแดง มีความมืดหรือความสว่างของฟลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าฟลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสี นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าภาพ (ข) จะมีสีดำมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของฟลอย ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังฟลอยมืด ดังนั้นฟลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิคล้ายฝุ่นและตำหนิกลุ่มหมอกที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



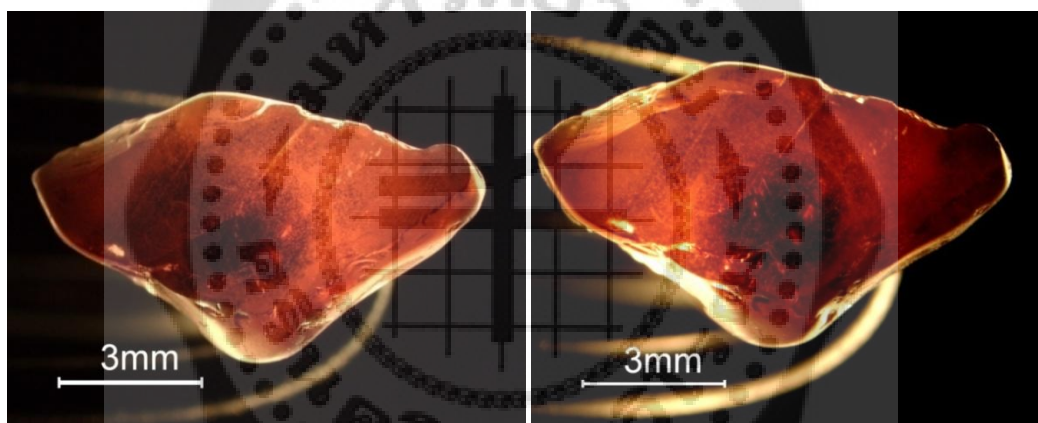
ภาพประกอบ 71 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 3/2 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มเหลือง 6/3

จากภาพประกอบ 71 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย จะเห็นลักษณะเป็นสี่ดำบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM3 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 3 (light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM3 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มเหลือง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น



ภาพประกอบ 72 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 3/2 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มเหลือง 6/3

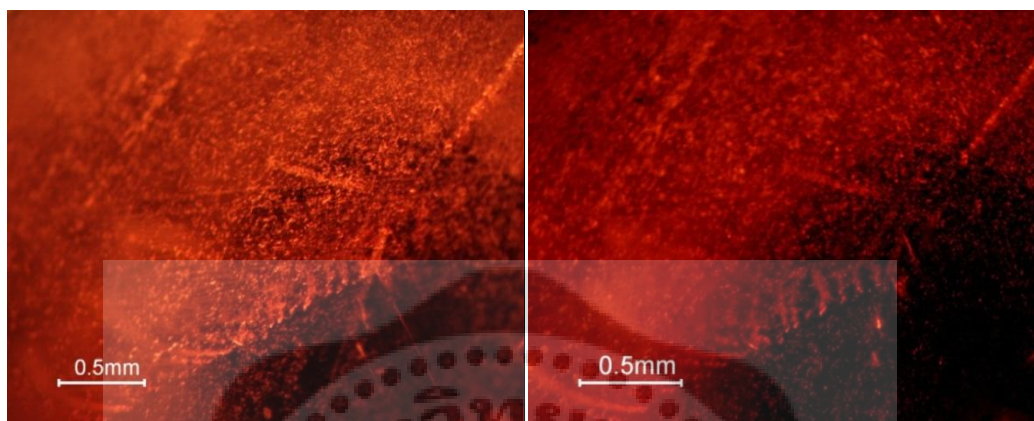
จากภาพประกอบ 72 (ก) และ (ข) ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM3 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 3 (light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM3 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มเหลือง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่า ภาพ (ข) จะมีสีดำนมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของพลอย ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิคล้ายฝุ่นที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพประกอบ 73 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM5  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 4/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้ม 8/2

จากภาพประกอบ 73 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย จะเห็นลักษณะเป็นสีดำบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ และทั้งสองภาพมีลักษณะของแสงที่ต่างกัน เนื่องจากการจากวางตำแหน่งของพลอยที่แตกต่างกัน จึงทำให้แสงที่ใช้ส่องพลอยมีตำแหน่งที่แตกต่างกันตามไปด้วย โดยภาพ (ก) แสงไฟที่ใช้จะส่องมาทางด้านขวามากกว่า ส่วนภาพ (ข) แสงไฟที่ใช้จะส่องมาทางด้านซ้ายมากกว่า ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM5 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพ

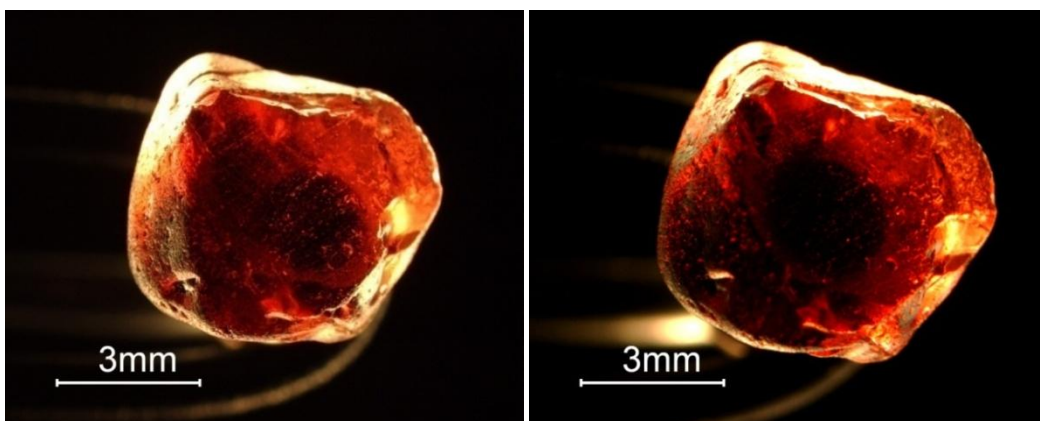
พลอยสปิเนล รหัส SM5 หลังไอออนนิมพลาเนเตชัน พลอยมีสีส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น



ภาพประกอบ 74 ผลของออกซิเจนไอออนนิมพลาเนเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM5  
(ก) ก่อนไอออนนิมพลาเนเตชันสีส้มแดง 4/3 (ข) หลังไอออนนิมพลาเนเตชันสีส้ม 8/2

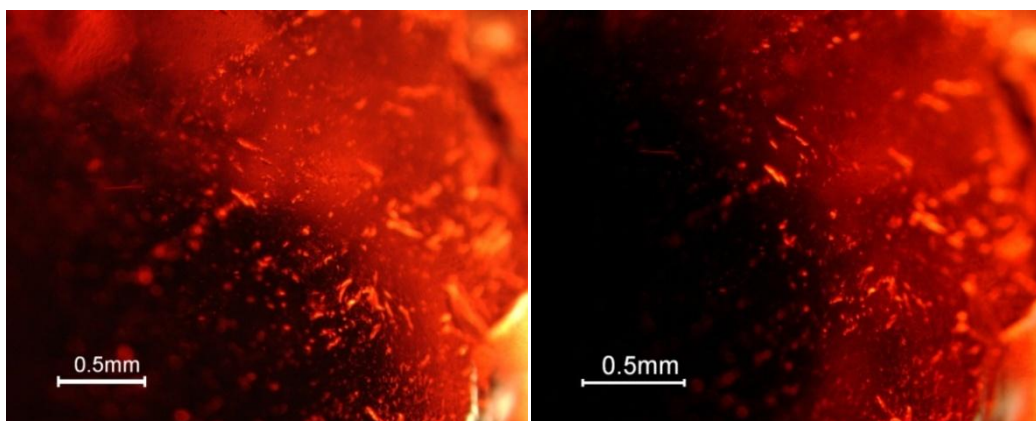
จากภาพประกอบ 74 (ก) และ (ข) ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM5 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนนิมพลาเนเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส SM5 หลังไอออนนิมพลาเนเตชัน พลอยมีสีส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าภาพ (ข) จะมีสีดำมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของพลอย ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิคล้ายฝุ่นที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย





ภาพประกอบ 75 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM16  
 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 4/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้ม 8/2

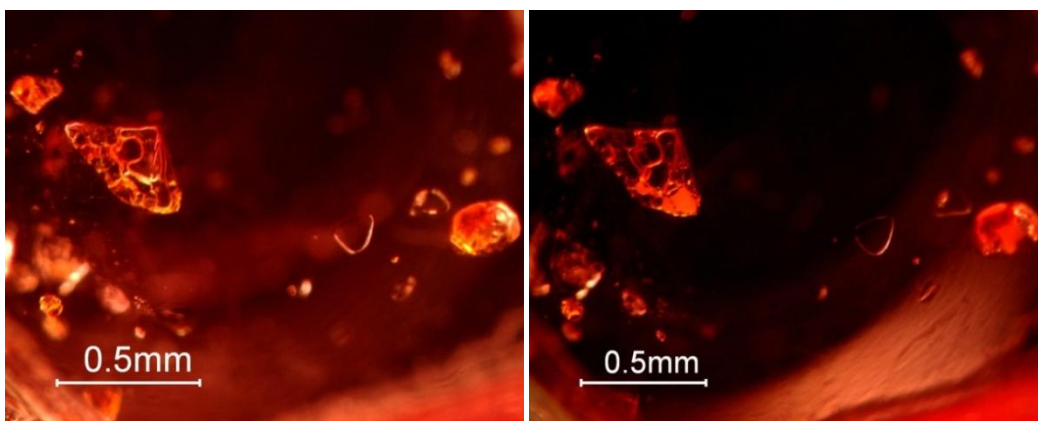
จากภาพประกอบ 75 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสี่ด้าบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM16 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM16 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น



ภาพประกอบ 76 ผลของออกซิเจนไอออนนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM16  
(ก) ก่อนไอออนนอิมพลานเตชันสีส้มแดง 4/3 (ข) หลังไอออนนอิมพลานเตชันสีส้ม 8/2

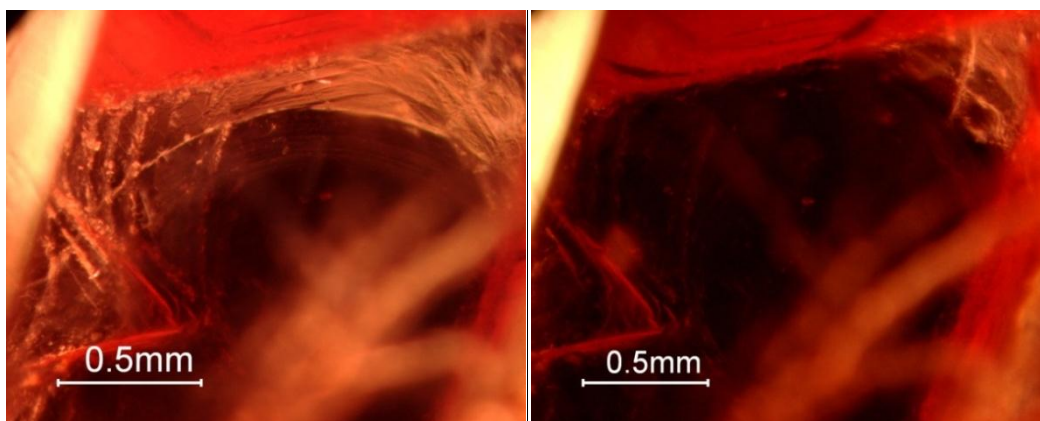
จากภาพประกอบ 76 (ก) และ (ข) ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM16 พลอยมีสีส้มแดงก่อนไอออนนอิมพลานเตชัน จะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 4 (medium light) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส SM16 หลังไอออนนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 2 (slightly grayish) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งความอึมตัวของสีมากขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า ภาพ (ข) จะมีสีดำมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของพลอย ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิคล้ายฝุ่นและตำหนิผลึกแร่ที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

การใช้เทคนิคไอออนนอิมพลานเตชันกับสปีเนลคุณภาพต่ำกลุ่มสีส้มแดง โดยใช้ไอออนและอนุภาคพลังงานสูงภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน พบว่าสามารถลดปริมาณ ตำหนิจำพวก minute particle และ liquid inclusion ลงได้ ทำให้พลอยดูสดใสแวววาวขึ้น สามารถเพิ่มความสะอาดให้กับพลอยได้ ดังภาพประกอบ 77-91



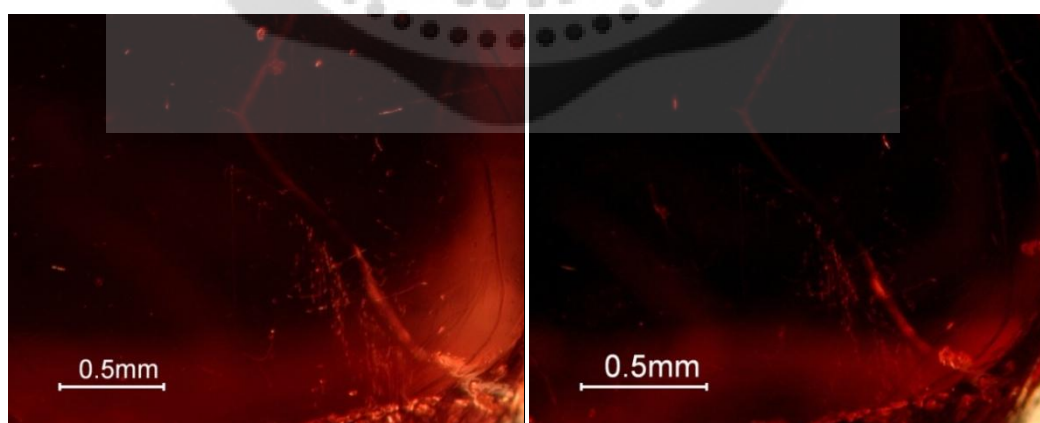
ภาพประกอบ 77 ผลของออกซิเจนไอออนนิมฟลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส pkR1  
(ก) ก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน (ข) หลังไอออนนิมฟลานเตชันต่ำหึลดลง

จากภาพประกอบ 77 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส pkR1 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนนิมฟลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่เล็กๆ และพวกตำหนิคล้ายฝุ่นได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ โดยที่พลอยไม่แตก หรือมีรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น ทำให้พลอยมีความสะอาด และเนื้อพลอยมีความใสมากขึ้น นอกจากนี้จะสังเกตเห็นว่าภาพ (ข) จะมีสีดำมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ซึ่งมีลักษณะของไฟส่องทางด้านข้างและด้านล่างของพลอย ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากตำหนิคล้ายฝุ่นและตำหนิผลึกแร่เล็กๆ ที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



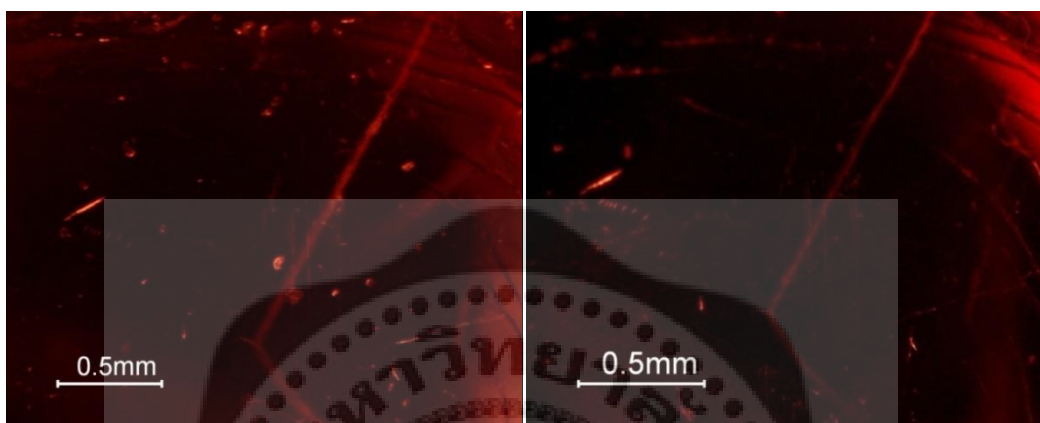
ภาพประกอบ 78 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส pkR2  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนักลดลง

จากภาพประกอบ 78 (ก) และ (ข) เป็นภาพฟลูออเรสเซนซ์สปีเนล รหัส pkR2 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนักผลึกแร่เล็กๆ หรือพวกตำหนักคล้ายฝุ่น และตำหนักแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนักภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



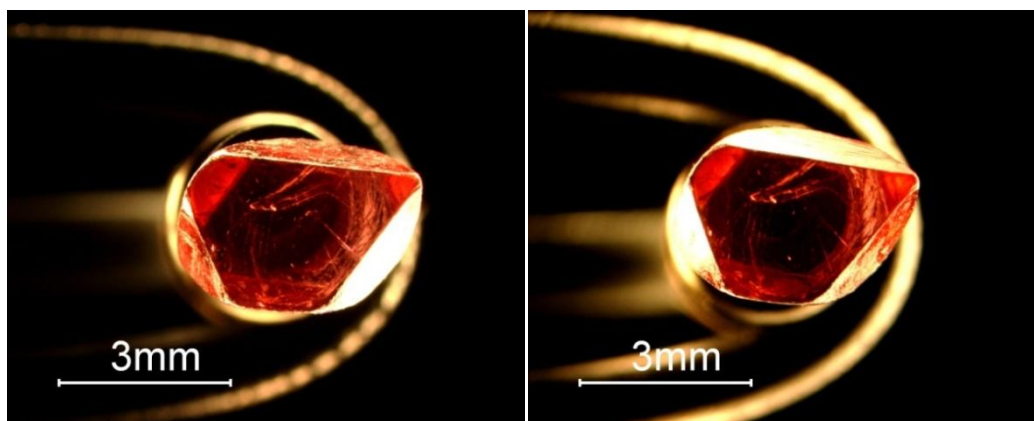
ภาพประกอบ 79 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส pR4  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนักลดลง

จากภาพประกอบ 79 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส pR4 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าพวกตำหนิผลึกแร่และตำหนิแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น



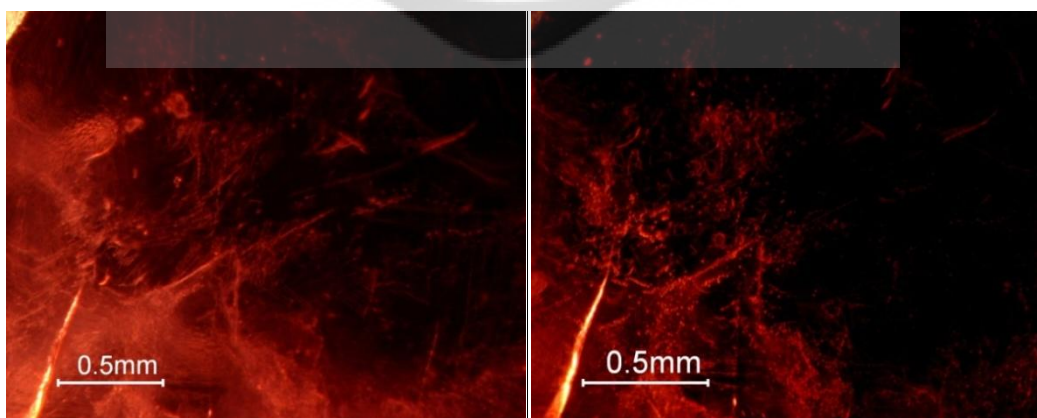
ภาพประกอบ 80 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส pR4  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 80 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส pR4 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าพวกตำหนิผลึกแร่และตำหนิแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น



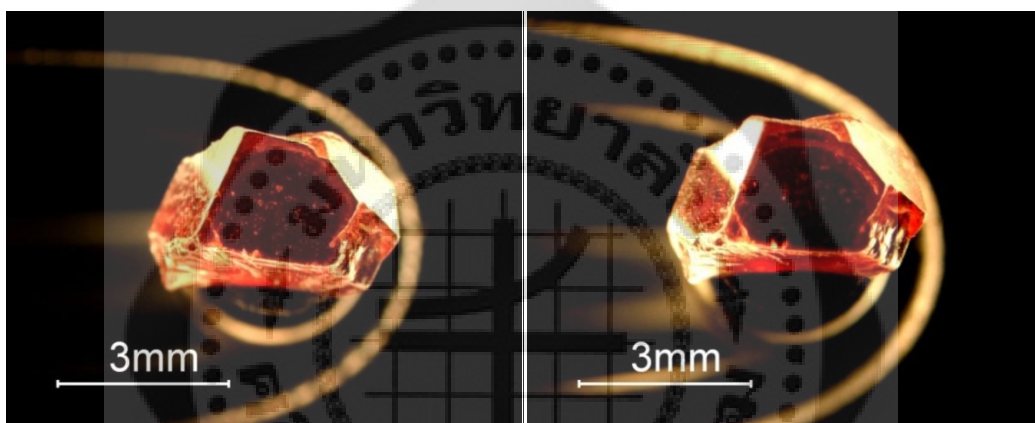
ภาพประกอบ 81 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลาเนชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส pR5  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลาเนชัน (ข) หลังไอออนอิมพลาเนชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 81 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสี่ด้าบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส pR5 ก่อนไอออนอิมพลาเนชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลาเนชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่และตำหนิแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีด้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



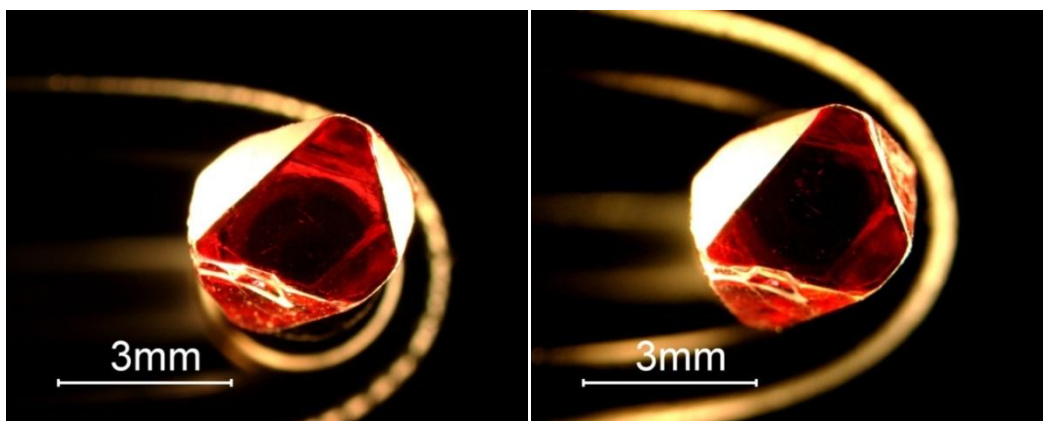
ภาพประกอบ 82 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลาเนชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส pR7  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลาเนชัน (ข) หลังไอออนอิมพลาเนชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 82 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส pR7 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่และตำหนิแบบกลุ่มหมอกได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



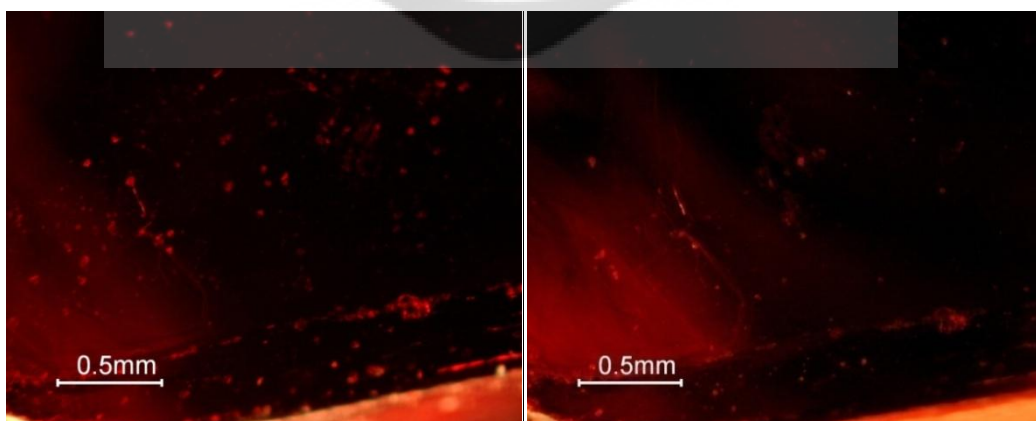
ภาพประกอบ 83 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส R2 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 83 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสีดำบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R2 ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพประกอบ 84 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

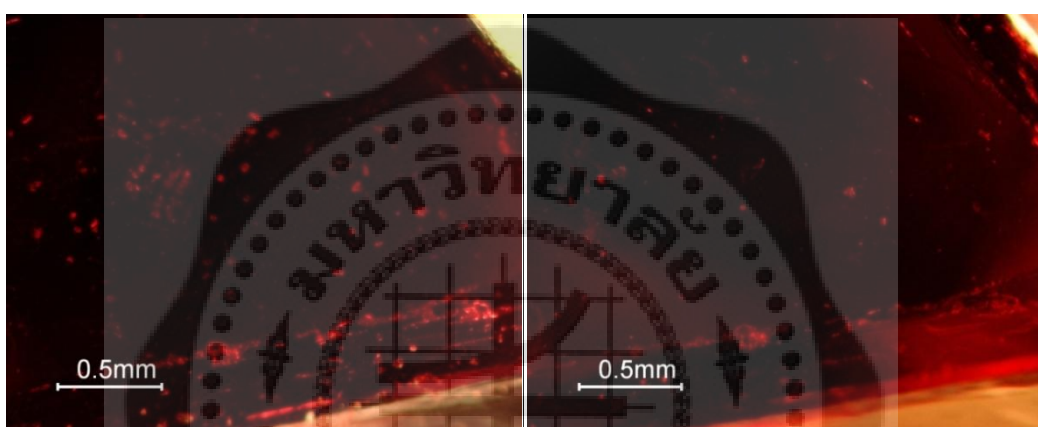
จากภาพประกอบ 84 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสีดำบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส pR7 ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิเล็ก ๆ ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้า ๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพประกอบ 85 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

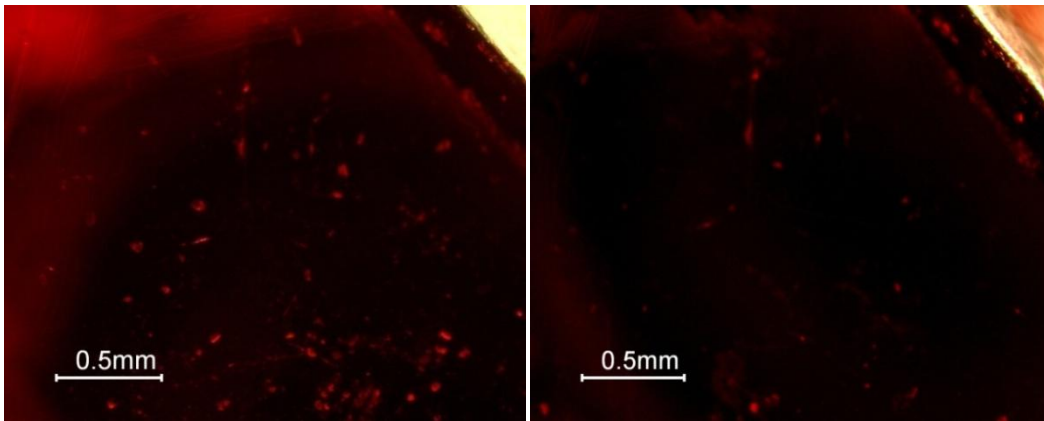


จากภาพประกอบ 85 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R3 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าพวกตำหนิผลึกแร่ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



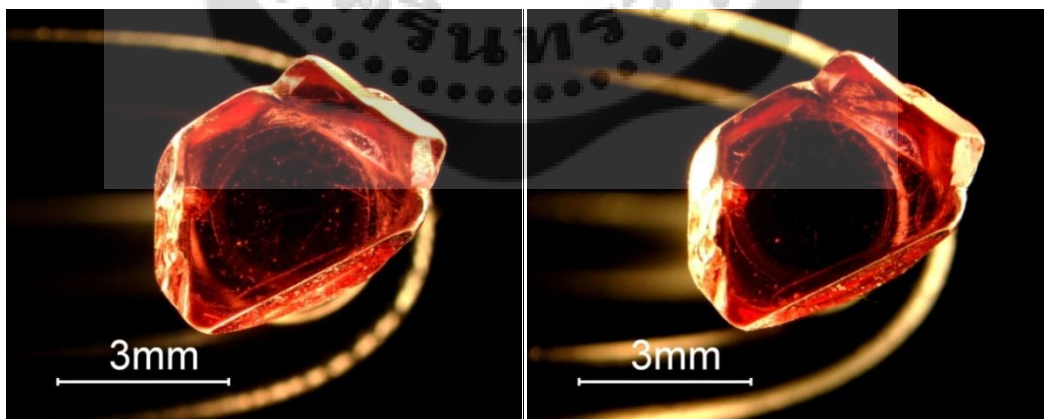
ภาพประกอบ 86 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแดง รหัส R3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 86 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R3 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



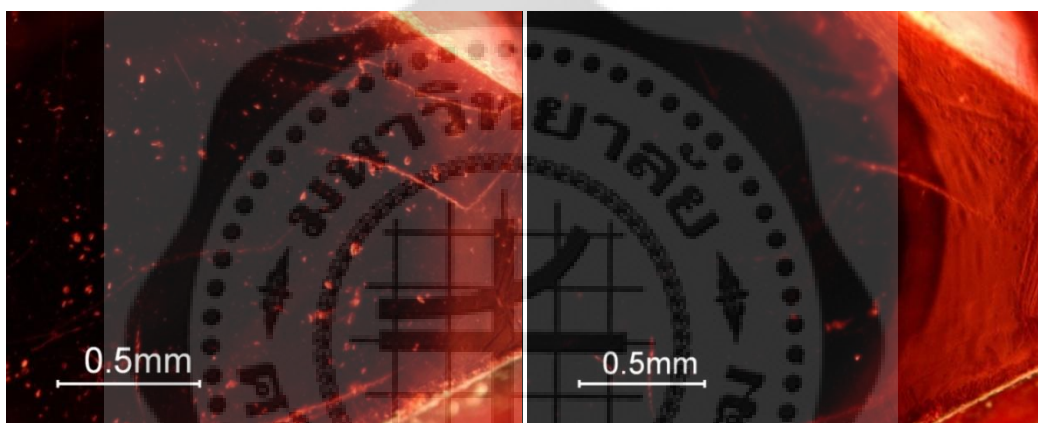
ภาพประกอบ 87 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R3  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนักลดลง

จากภาพประกอบ 87 (ก) และ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส R3 ภาพ (ก) เป็นภาพก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนักผลึกแร่เล็กๆ ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนักภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



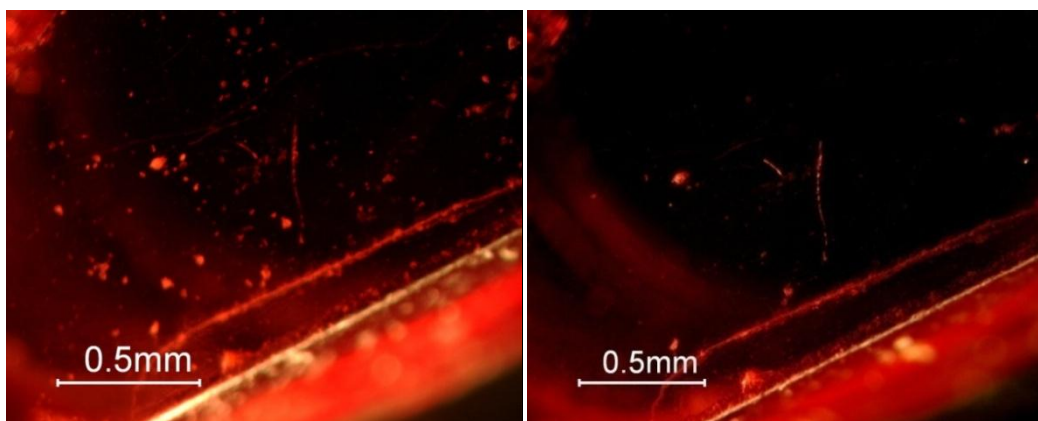
ภาพประกอบ 88 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R6  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนักลดลง

จากภาพประกอบ 88 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสี่ด้าบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R6 ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิฝักแร่เล็ก ๆ และตำหนิแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้า ๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีด้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



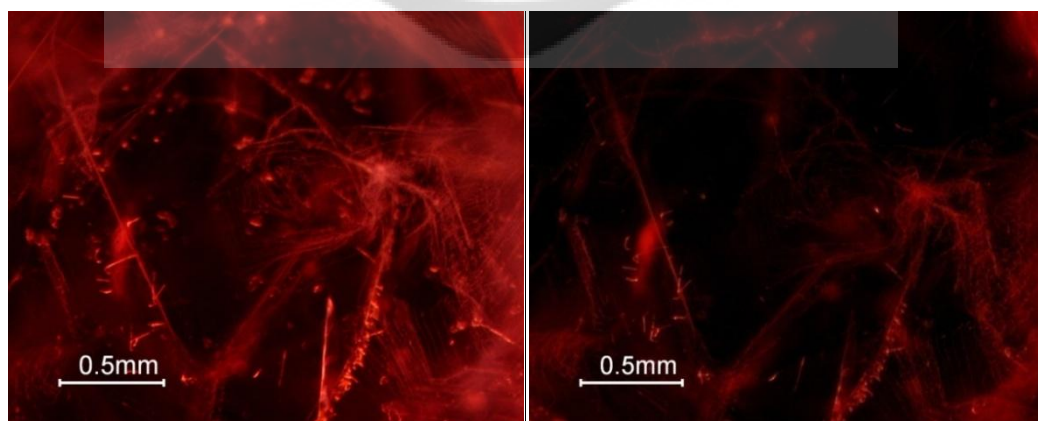
ภาพประกอบ 89 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีด้า รหัส R6 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันตำหนิลดลง

จากภาพประกอบ 89 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสี่ด้าบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R6 ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิฝักแร่เล็ก ๆ และตำหนิแบบเส้นเข็มได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้า ๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีด้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพประกอบ 90 ผลของออกซิเจนไอออนนิมฟลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R6  
(ก) ก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน (ข) หลังไอออนนิมฟลานเตชันตำหนักลดลง

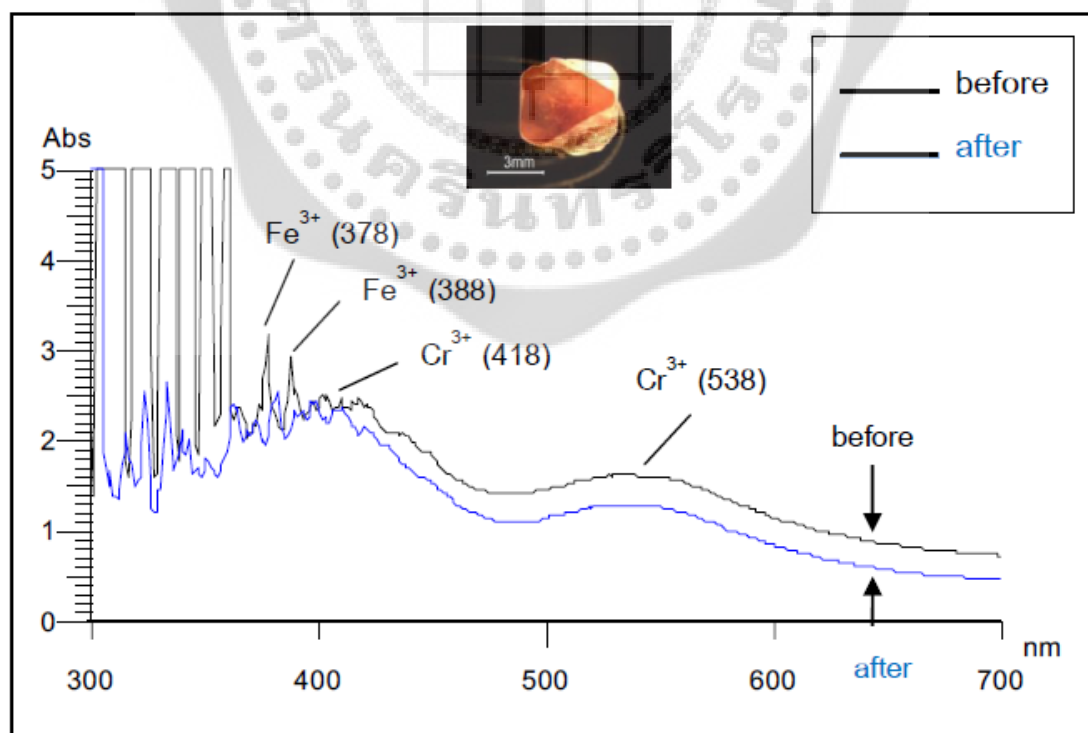
จากภาพประกอบ 90 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับผลอย อยู่ทางด้านล่างของผลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสีดำบริเวณตรงกลางของผลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพผลอยสปีเนล รหัส R6 ก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนนิมฟลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนักผลึกแร่เล็กๆ ได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้ผลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังผลอยมืด ดังนั้นผลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนักภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพประกอบ 91 ผลของออกซิเจนไอออนนิมฟลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแดง รหัส R7  
(ก) ก่อนไอออนนิมฟลานเตชัน (ข) หลังไอออนนิมฟลานเตชันตำหนักลดลง

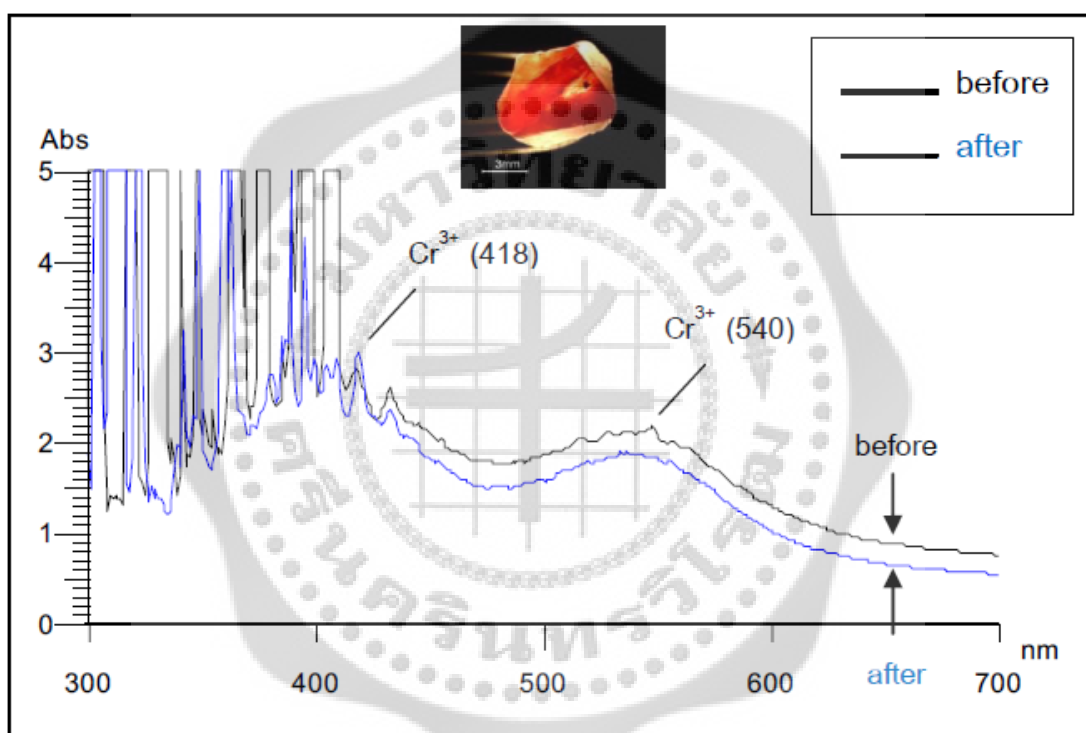
จากภาพประกอบ 91 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยจะเห็นลักษณะเป็นสี่ดำบริเวณตรงกลางของพลอยทั้งสองภาพ ภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส R7 ก่อนไอออนอิมพลานเตชัน ส่วนภาพ (ข) เป็นภาพหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะสังเกตเห็นว่าตำหนิผลึกแร่เล็กๆ ตำหนิแบบเส้นเข็ม และตำหนิแบบกลุ่มหมอกได้ลดจำนวนลง เนื่องจากถูกกระตุ้นให้ละลายออกไปผ่านทางช่องว่างในโครงสร้างผลึกอย่างช้าๆ ทำให้พลอยมีความสะอาด และมีความใสมากขึ้น เนื่องจากการใช้แสงแบบ darkfield illumination ในการถ่ายภาพ ทำให้บริเวณพื้นฉากหลังพลอยมืด ดังนั้นพลอยที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากตำหนิภายในที่ลดลง จึงทำให้เห็นพื้นฉากหลังที่เป็นสีดำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ผลการวิเคราะห์ UV-Visible พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างสปิเนล กลุ่มสีส้มแดงก่อนและหลังอิมพลานเตชัน โดยทั่วไป ยังแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนของ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 305-330, 371-378 และ 380-381 nm แสดงการดูดกลืนของ  $\text{Cr}^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 391-393, 413-418 และ 538-540 nm ซึ่งมีความสอดคล้องกับการเกิดสีในสปิเนล ผลการทดลองแสดงดังในภาพประกอบ 92-94



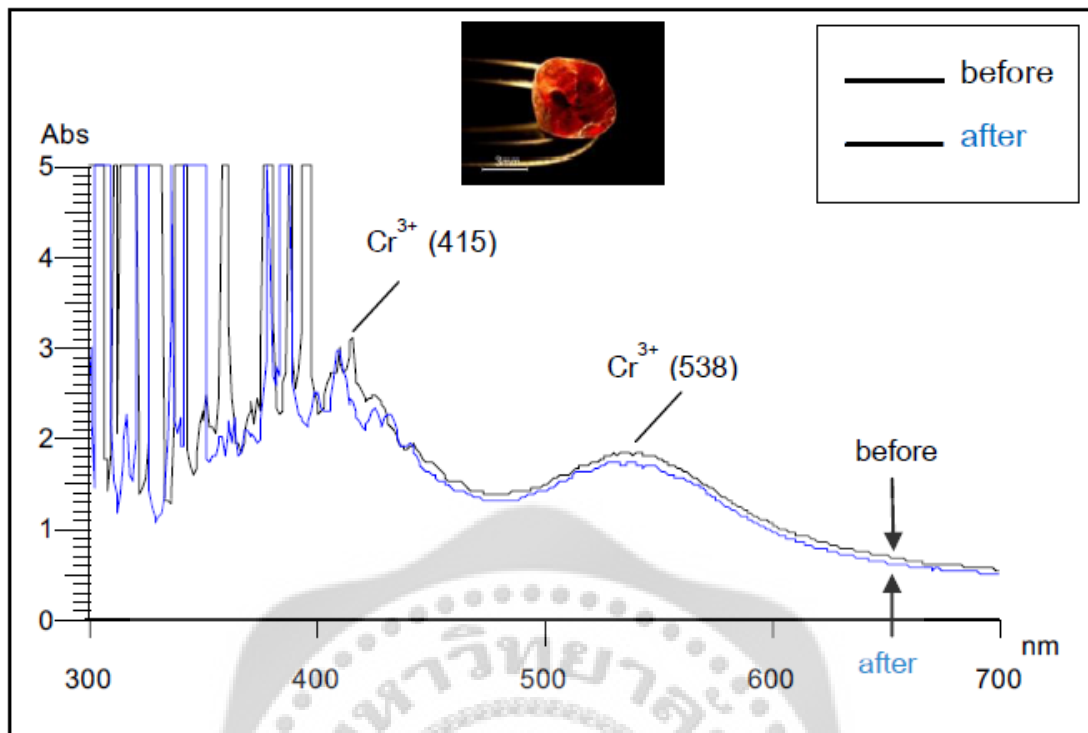
ภาพประกอบ 92 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปิเนลสีส้มแดง รหัส SM 12

จากภาพประกอบ 92 จะสังเกตเห็นว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของโครเมียมและเหล็กอยู่ในตำแหน่งเดิมทั้งก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน โดยแสดงการดูดกลืนของโครเมียมที่ตำแหน่ง 418 และ 538 nm และแสดงการดูดกลืนของเหล็กที่ตำแหน่ง 378 และ 388 nm แต่พีคของการดูดกลืนหลังจากไอออนอิมพลานเตชันจะมีการดูดกลืนที่น้อยกว่า แสดงว่าหลังจากที่ไอออนอิมพลานเตชันแล้วทำให้พอลอยมีความสะอาด มีความใสเพิ่มมากขึ้นหรือพอลอยมีความสว่างมากขึ้น ทำให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น จึงทำให้มีการดูดกลืนที่น้อยลง



ภาพประกอบ 93 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 22

จากภาพประกอบ 93 จะสังเกตเห็นว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของโครเมียมอยู่ในตำแหน่งเดิมทั้งก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน โดยแสดงการดูดกลืนของโครเมียมที่ตำแหน่ง 418 และ 540 nm แต่พีคของการดูดกลืนหลังจากไอออนอิมพลานเตชันจะมีการดูดกลืนที่น้อยกว่า แสดงว่าหลังจากที่ไอออนอิมพลานเตชันแล้วทำให้พอลอยมีความสะอาด มีความใสมากขึ้น ทำให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น จึงมีการดูดกลืนที่น้อยลง



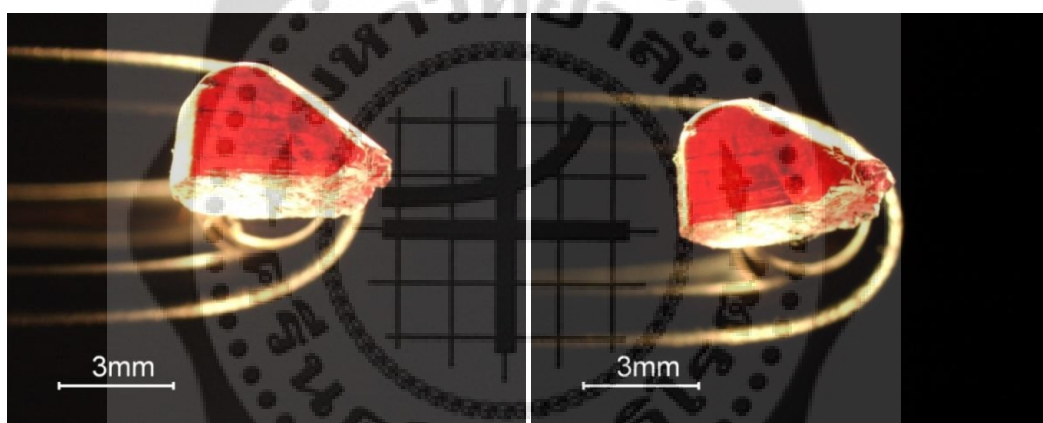
ภาพประกอบ 94 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส SM 34

จากภาพประกอบ 94 จะสังเกตเห็นว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของโครเมียมอยู่ในตำแหน่งเดิม ทั้งก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน โดยแสดงการดูดกลืนของโครเมียมที่ตำแหน่ง 415 และ 538 nm แต่พีคของการดูดกลืนหลังจากไอออนอิมพลานเตชันจะมีการดูดกลืนที่น้อยกว่า แสดงว่าหลังจากที่ไอออนอิมพลานเตชันแล้วทำให้พลอยมีความสะอาด มีความใสเพิ่มมากขึ้น ทำให้แสงส่องผ่านได้มากขึ้น จึงทำให้มีการดูดกลืนที่น้อยลง

การใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันกับสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี สามารถลดสีรองลงได้ เนื่องจากความมืดลดลง มีความสว่างเพิ่มขึ้น และความอิมพัทของสีพลอยหลังไอออนอิมพลานเตชันมีมากขึ้น ดังภาพประกอบ 95-105

ตาราง 8 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดง

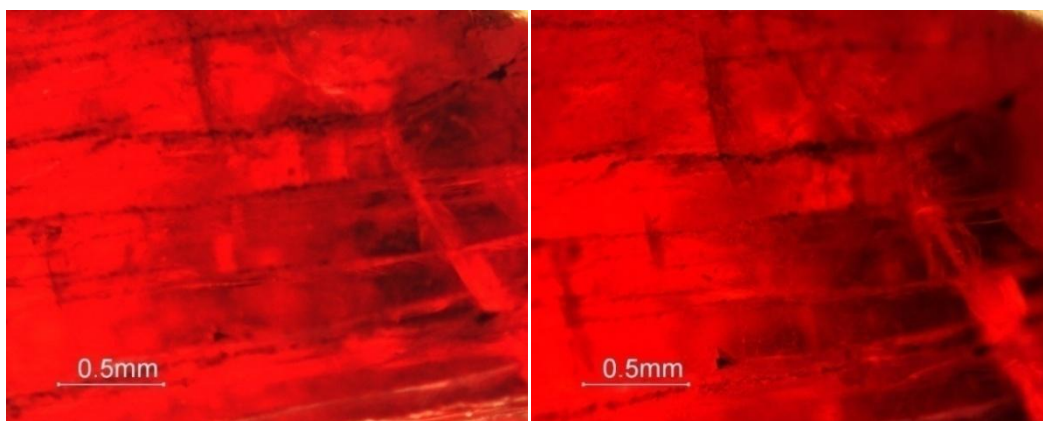
รหัสตัวอย่าง	ระยะเวลา (นาทีก)	โดส (ไอออน/ซม <sup>2</sup> )	สีก่อนอิมพลานเตชัน	สีหลังอิมพลานเตชัน
S08	60	$3.7 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	แดงแกมส้ม 7/4
S11	60	$3.7 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	แดงแกมส้ม 7/4
S13	60	$3.5 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	ส้มแดง 6/4
S16	60	$3.5 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	แดงแกมส้ม 7/4
S17	120	$5.5 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	แดงแกมส้ม 7/4
S20	150	$6.7 \times 10^{17}$	ส้มแกมแดง 8/3	แดงแกมส้ม 7/4



ภาพประกอบ 95 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S08  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีแดงแกมส้ม 7/4

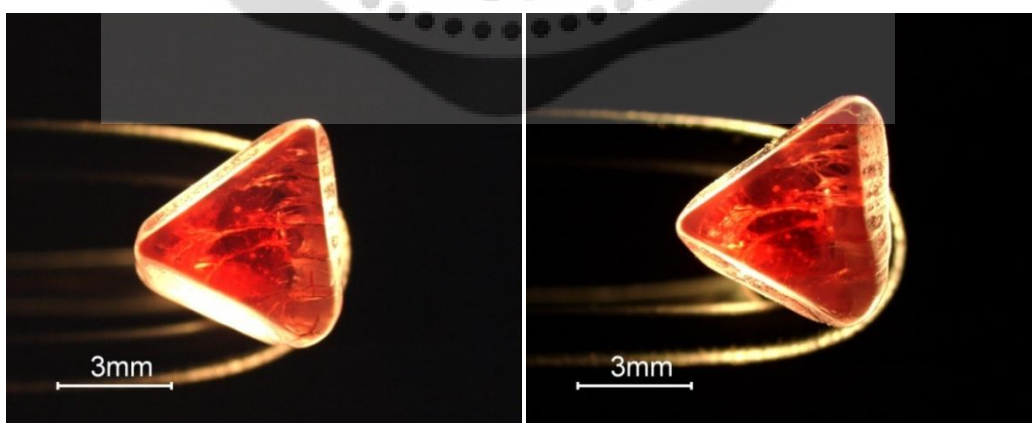
จากภาพประกอบ 95 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S08 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S08 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีแดงแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น





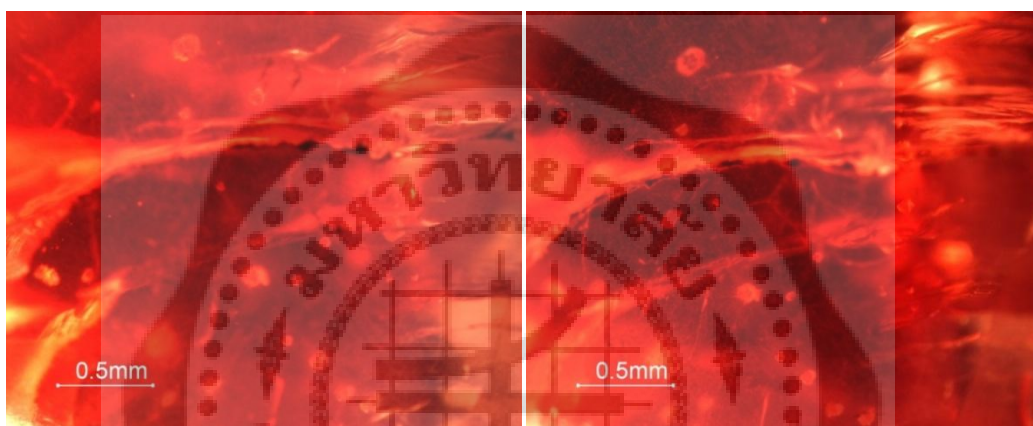
ภาพประกอบ 96 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S08 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมส้ม 7/4

จากภาพประกอบ 96 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S08 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S08 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



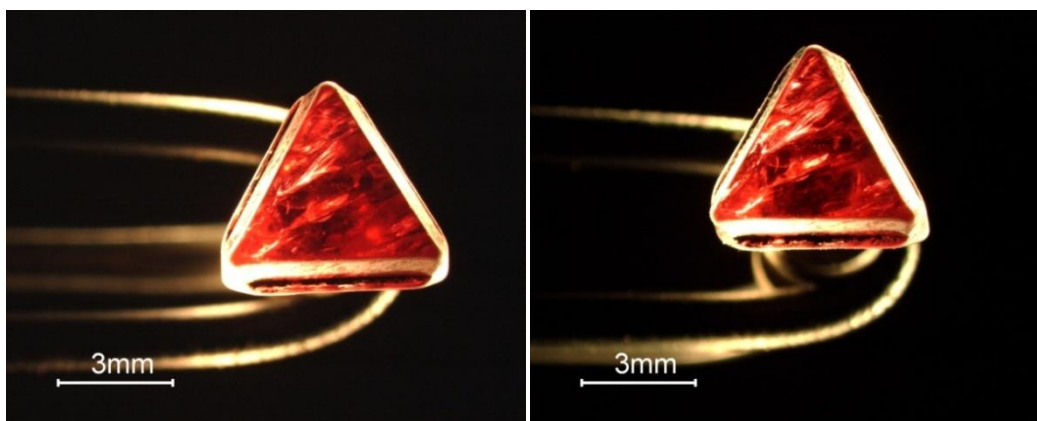
ภาพประกอบ 97 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S11 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมส้ม 7/4

จากภาพประกอบ 97 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S11 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S11 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีแดงแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



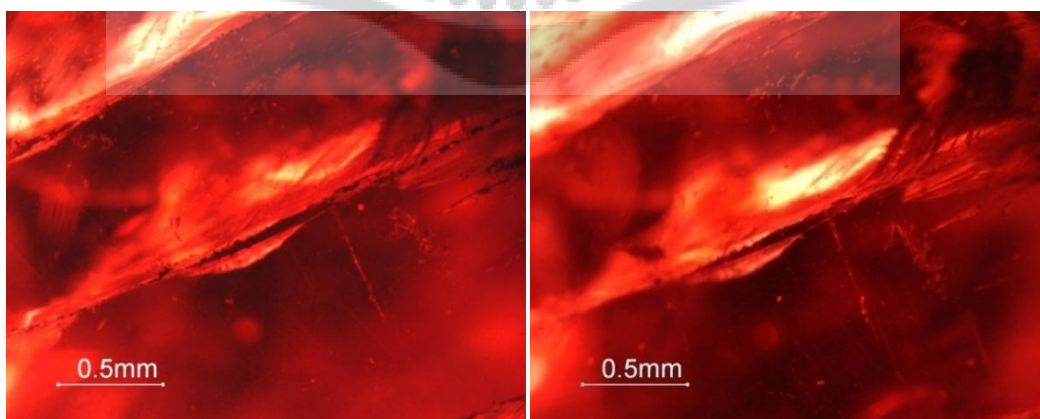
ภาพประกอบ 98 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแกมแดง รหัส S11 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีแดงแกมส้ม 7/4

จากภาพประกอบ 98 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S11 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S11 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีแดงแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



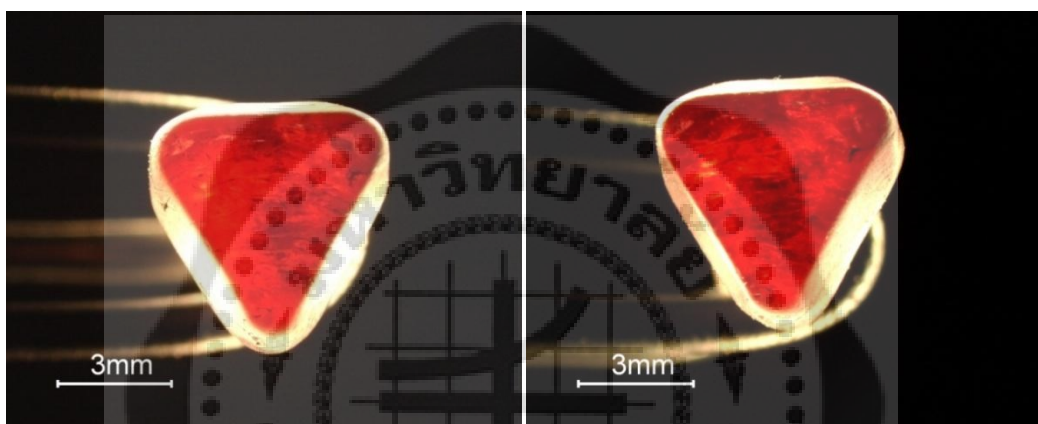
ภาพประกอบ 99 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S13  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 6/4

จากภาพประกอบ 99 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S13 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S13 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึมตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสี และความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึมตัวของสีมากขึ้น



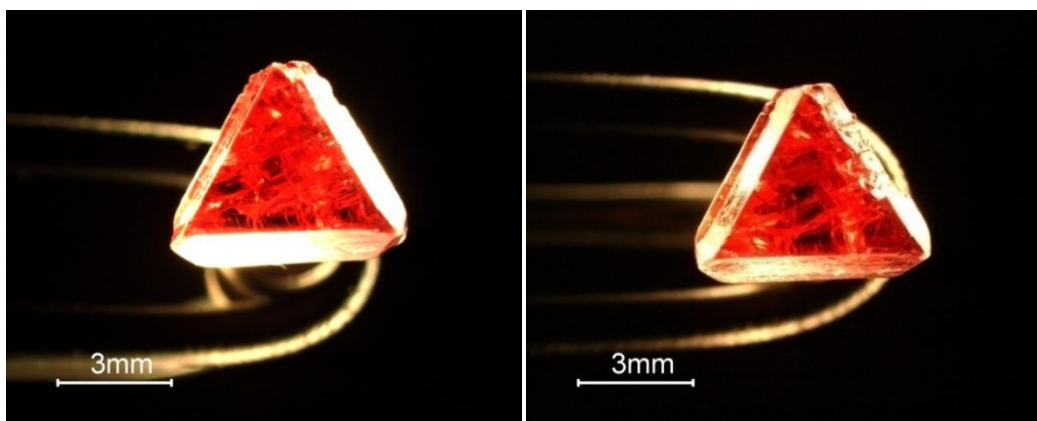
ภาพประกอบ 100 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S13  
(ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 6/4

จากภาพประกอบ 100 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S13 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S13 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 6 (medium dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสี และความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



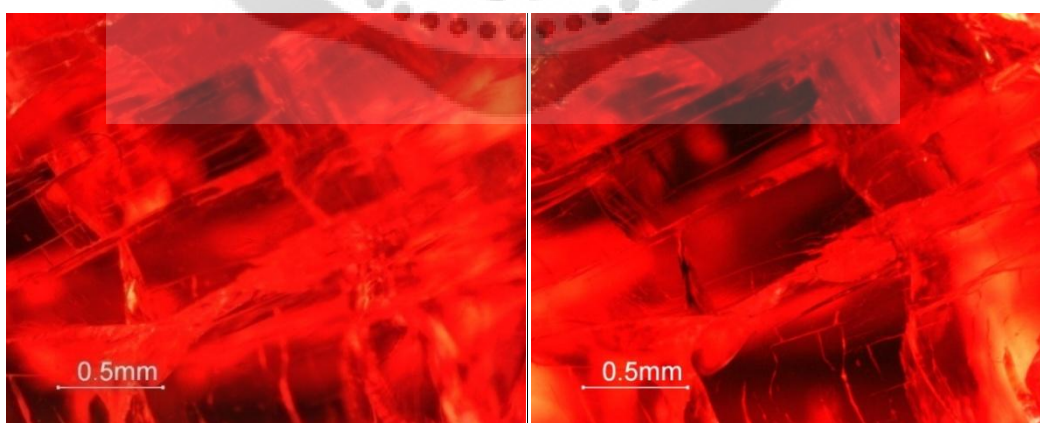
ภาพประกอบ 101 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแกมแดง รหัส S16 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมส้ม 7/4

จากภาพประกอบ 101 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S16 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S16 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสี และความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



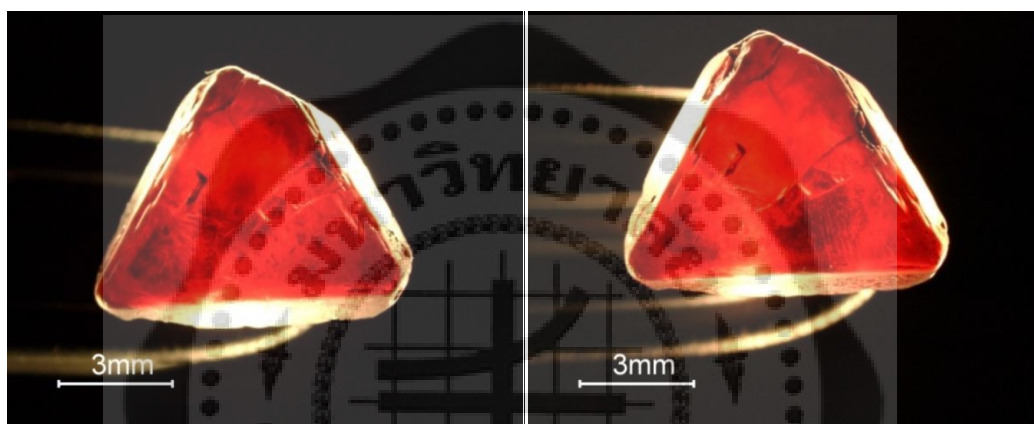
ภาพประกอบ 102 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S17 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 7/4

จากภาพประกอบ 102 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S17 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S17 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



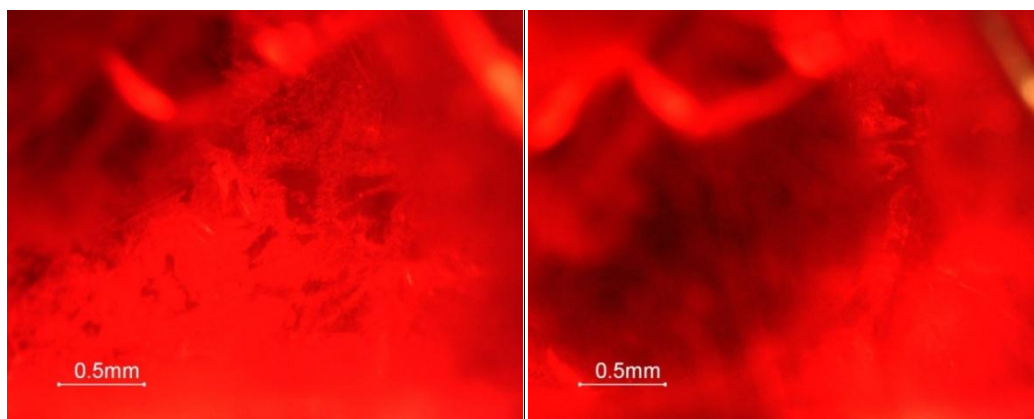
ภาพประกอบ 103 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S17 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 7/4

จากภาพประกอบ 103 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S17 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S17 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีแดงแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



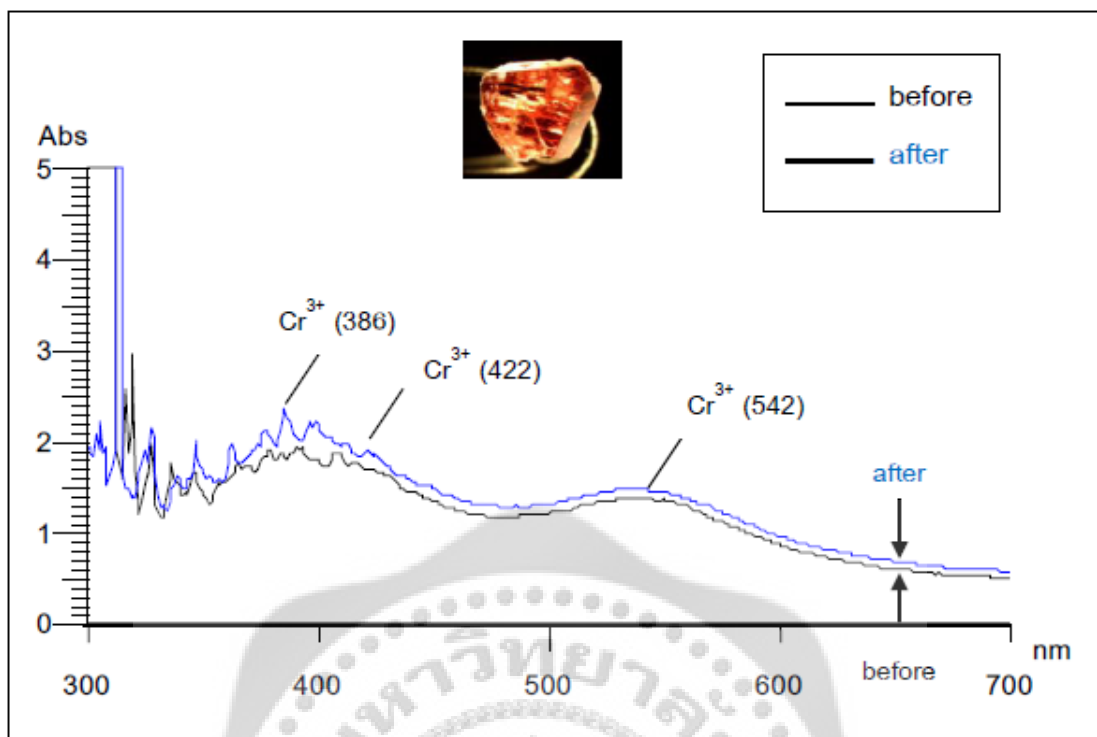
ภาพประกอบ 104 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปิเนลสีส้มแกมแดง รหัส S20 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีแดงแกมส้ม 7/4

จากภาพประกอบ 104 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S20 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปิเนล รหัส S20 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีแดงแกมส้ม มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



ภาพประกอบ 105 ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชันต่อสปีเนลสีส้มแกมแดง รหัส S20 (ก) ก่อนไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 8/3 (ข) หลังไอออนอิมพลานเตชันสีส้มแกมแดง 7/4

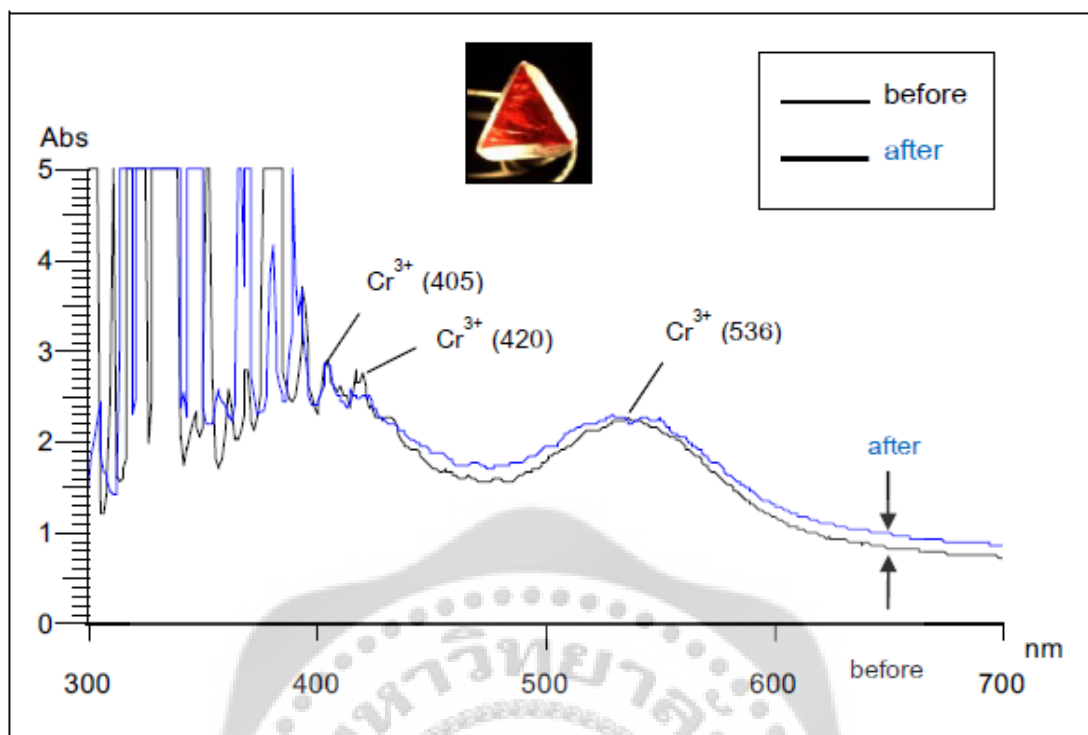
จากภาพประกอบ 105 (ก) และ (ข) จะสังเกตเห็นตัวที่ใช้ยึดจับพลอย อยู่ทางด้านล่างของพลอย โดยภาพ (ก) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S20 พลอยมีสีส้มแกมแดงก่อนไอออนอิมพลานเตชัน พลอยจะมีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 8 (very dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 3 (very slightly grayish) ภาพ (ข) เป็นภาพพลอยสปีเนล รหัส S20 หลังไอออนอิมพลานเตชัน พลอยมีสีส้มแกมแดง มีความมืดหรือความสว่างของพลอยอยู่ในระดับที่ 7 (dark) และมีความอึดตัวของสีอยู่ในระดับ 4 (moderately strong) แสดงว่าพลอยมีการเปลี่ยนแปลงของสีและความมืดหรือความสว่าง รวมทั้งมีความอึดตัวของสีมากขึ้น



ภาพประกอบ 106 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส S10

จากภาพประกอบ 106 ผลการวิเคราะห์ UV-Visible พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนของโครเมียมอยู่ในตำแหน่งเดิมทั้งก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน โดยแสดงการดูดกลืนของโครเมียมที่ตำแหน่ง 386, 422 และ 542 nm แต่พีคของการดูดกลืนหลังจากไอออนอิมพลานเตชัน จะมีการดูดกลืนที่มากกว่า แสดงว่าหลังจากที่ไอออนอิมพลานเตชันแล้วทำให้พลอยมีสีที่เข้มขึ้น จึงทำให้มีการดูดกลืนที่มากขึ้น





ภาพประกอบ 107 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงช่วง UV-Vis ของสปีเนลสีส้มแดง รหัส S13

จากภาพประกอบ 107 ผลการวิเคราะห์ UV-Visible พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนของโครเมียมอยู่ในตำแหน่งเดิมทั้งก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน โดยแสดงการดูดกลืนของโครเมียมที่ตำแหน่ง 420 และ 536 nm แต่พีคของการดูดกลืนหลังจากไอออนอิมพลานเตชันจะมีการดูดกลืนที่มากกว่า แสดงว่าหลังจากที่ไอออนอิมพลานเตชันแล้วทำให้พลอยมีสีที่เข้มขึ้น จึงทำให้มีการดูดกลืนที่มากขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติและเพิ่มมูลค่าของพลอยสปิเนลธรรมชาติสีแดงอมน้ำตาลด้วยการใช้เทคนิคลำไอออน ขอบเขตของการวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติอัญมณี สี องค์ประกอบเคมี ลักษณะทางสเปกโทรสโกปี รูปแบบการเปล่งแสง และปรับปรุงคุณภาพของสปิเนลสีแดงอมน้ำตาล พลอยสปิเนลธรรมชาติสีแดงอมน้ำตาลที่นำมาศึกษาเป็นสปิเนลจากประเทศพม่า จำนวน 151 ตัวอย่าง ทั้งที่เป็นแบบเจียรระไนแล้ว และยังไม่ได้เจียรระไน จากการทดสอบสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี และลักษณะทาง สเปกโทรสโกปี สามารถสรุปได้ดังตาราง 9-11

ตาราง 9 แสดงผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพสปิเนลธรรมชาติ

Properties	Results
Refractive Index	1.705 - 1.725
Specific Gravity	3.50 - 4.06
Long Wave UV	Inert - Strong Red
Short Wave UV	Inert
Color	orangy red, red-orange, reddish orange
Tone	light- very dark
Saturate	slightly grayish - moderately strong
Inclusion	minute particle, crystal, cloud, healed fracture, needle-like inclusion

การวิเคราะห์สปีเนลสีแดงอมน้ำตาลโดยใช้เทคโนโลยีลำไอออน (Ion Beam Analysis) นั้นมีประโยชน์อย่างมากในการศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาค (Micro scale) ของสปีเนลทั้งในเรื่องของการประพฤติตัวของอะตอม และโมเลกุลที่เราไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า โดยสอดคล้องกับสิ่งที่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าในระดับมหภาค (Macro scale) ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของสปีเนลสีแดงอมน้ำตาลโดยใช้เทคนิค PIXE ทำให้ทราบปริมาณของธาตุองค์ประกอบที่มีความแตกต่างกันของสปีเนล ทำให้เห็นความแตกต่างของสปีเนลแต่ละกลุ่มสีได้ชัดเจนขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของธาตุองค์ประกอบ โดยเฉพาะปริมาณของธาตุโครเมียม และเหล็กนั้นมีผลต่อสีของ สปีเนลที่เรามองเห็นโดยตรง คือถ้ามีปริมาณธาตุโครเมียมสูงจะทำให้สปีเนล มีสีแดงมากตามปริมาณธาตุโครเมียม ส่วนธาตุเหล็กถือว่าเป็นธาตุที่ควบคุมโทนสีของสปีเนลหรือทำให้สปีเนลมีสีรอง โดยถ้ามีปริมาณมากจะทำให้ สปีเนลมีสีแดงโทนมืด เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะมองเห็นเป็นสีน้ำตาล แต่เมื่อนำไปประเมินคุณภาพสีของ GIA ซึ่งใช้พื้นฐานระบบสี Munsell จะพบว่า สามารถแบ่งสปีเนลสีแดงอมน้ำตาลออกเป็น 3 กลุ่มสีคือ สีแดงแกมส้ม ส้มแดง และส้มแกมแดง โดยสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงจะมีสีแดงสดน้อยกว่ากลุ่มสีแดงแกมส้ม และกลุ่มสีส้มแดง เนื่องจากสปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดง จะมีปริมาณของธาตุเหล็กมากกว่ากลุ่มสีแดงแกมส้ม และกลุ่มสีส้มแดง ซึ่งธาตุเหล็กนั้นทำให้เกิดสีน้ำตาลเป็นสีรองเจือปนกับสีแดง โดยสามารถหาปริมาณสัดส่วนธาตุเหล็กต่อโครเมียม ในกลุ่มสปีเนลสีส้มแกมแดงเป็น 0.058-3.6 กลุ่มสีส้มแดงเป็น 0.09-7.14 และกลุ่มสีแดงแกมส้มเป็น 0.23-16 โดยจะส่งผลให้สปีเนลกลุ่มสีส้มแกมแดงมีสีแดงสดน้อยกว่ากลุ่มสีส้มแดงและกลุ่มสีแดงแกมส้มตามลำดับผลการวิเคราะห์สามารถสรุปปริมาณธาตุที่สำคัญเหล่านี้เพื่อจ่ายต่อการพิจารณาดังตารางที่ 10

ตาราง 10 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่เป็นสาเหตุของการเกิดสีในสปีเนล

Color of samples	Cr (Wt %)	Fe (Wt %)	Rational Fe/Cr
Reddish orange	0.03-8.72	0.08-18.39	0.058-3.6
Red-orange	0.01-7.12	0.06-3.23	0.09-7.14
Orangy red	0.15-0.90	0.08-7.19	0.23-16

\* BDL. – below detection limit

กลไกการเกิดสีของ สปิเนลมาจากธาตุโครเมียม และธาตุเหล็ก สปิเนลมีสีแดงจากธาตุโครเมียม เนื่องจากการวัดการเปล่งแสงของทับทิมโดยเทคนิค IL พบว่ามีพีคของการเปล่งแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 650 – 720 nm (ตรงกับช่วงของแสงสีแดง) โดยรูปแบบการเปล่งแสงของสปิเนลสีแดงเกิดจากการมีโครเมียมปนอยู่ในโครงสร้างสปิเนล พีคของการเปล่งแสงนั้นเกิดจากธาตุโครเมียม แต่ระดับความเข้มของการเปล่งแสงนั้นพบว่าจะถูกควบคุมโดยปริมาณธาตุโครเมียมและธาตุเหล็ก โดยพิจารณาพร้อมกับการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบโดยเทคนิค PIXE ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ UV-Vis-NIR Spectroscopy พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่างสปิเนลจะมีความสัมพันธ์กับธาตุโครเมียมและเหล็ก สปิเนลกลุ่มสีแดงแกมส้ม ส้มแดง และ ส้มแกมแดง โดยทั่วไปแสดงสเปกตรัมที่มีลักษณะคล้ายกันดังแสดงในตารางที่ 11

ตาราง 11 แสดงผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนช่วง UV-Visible ของสปิเนล

Absorption spectrum	wavelength (nm)
Cr <sup>3+</sup>	391-393, 413-418, 538-540
Fe <sup>3+</sup>	305-330, 371-378, 380-381

ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นการศึกษาถึงการเพิ่มคุณภาพสปิเนลด้วยการใช้เทคนิคลำไอออน เพื่อที่จะให้สปิเนลที่ทดลองมีสีแดงให้ชัดเจนมากที่สุด เนื่องจากเป็นสีที่มีมูลค่ามากที่สุด ตัวอย่างจำนวน 61 ตัวอย่างถูกนำไปทดลองอิมพลานเตชันโดยใช้ออกซิเจนไอออน ผลของออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชัน พบว่า สปิเนลบางตัวอย่างมี การเปลี่ยนแปลงของสี ทำให้แสดงสีแดงชัดเจนขึ้น สามารถลดสีรองลงได้ สรุปดังตาราง 12 จากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ สปิเนลที่ผ่านการอิมพลานเตชัน ดำหนิภายในที่คล้ายฝุ่น ดำหนิกลุ่มหมอก และพวก liquid inclusions ได้ลดจำนวนลง โดยที่พลอยไม่มีรอยแตกร้าวเพิ่มขึ้น

ตาราง 12 สรุปจำนวนตัวอย่างสปีเนลที่แสดงสีแดงชัดเจนขึ้นภายหลังไอออนอิมพลานเตชัน

โดส (ไอออน/ซม <sup>2</sup> )	ระยะเวลา		
	30 นาที	60 นาที	120 นาที
$2.0 \times 10^{17} - 4.0 \times 10^{17}$ (18 ตัวอย่าง)	ไม่เปลี่ยน (5 ตัวอย่าง)	เปลี่ยนสี 10 ตัวอย่าง (13 ตัวอย่าง)	-
$4.1 \times 10^{17} - 6.0 \times 10^{17}$ (28 ตัวอย่าง)	-	เปลี่ยนสี 15 ตัวอย่าง (25 ตัวอย่าง)	เปลี่ยนสีทั้งหมด (3 ตัวอย่าง)
$6.1 \times 10^{17} - 8.0 \times 10^{17}$ (6 ตัวอย่าง)	-	เปลี่ยนสีทั้งหมด (6 ตัวอย่าง)	เปลี่ยนสี (1 ตัวอย่าง)
$1.0 \times 10^{18}$ (8 ตัวอย่าง)	-	เปลี่ยนสีทั้งหมด (8 ตัวอย่าง)	-

จากผลการเปลี่ยนสีของสปีเนลดังตารางข้างต้น ความเป็นไปได้ หากนำมาคิดเปรียบเทียบโอกาสความเป็นไปได้ที่สีแดงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนพลอยที่ อิมพลานเตชันในสภาวะนั้น สรุปได้ดังนี้

- โดส  $2 \times 10^{17} - 4 \times 10^{17}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> มีโอกาสที่สีแดงขึ้นที่ระยะเวลา 60 นาที (77%)
- โดส  $4.1 \times 10^{17} - 6 \times 10^{17}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> มีโอกาสที่สีแดงขึ้นที่ระยะเวลา 60 นาที (60%) และ 120 นาที (100%)
- โดส  $6.1 \times 10^{17} - 8 \times 10^{17}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> มีโอกาสที่สีแดงขึ้นที่ระยะเวลา 60 นาที (100%)
- โดส  $1 \times 10^{18}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> มีโอกาสที่สีแดงขึ้นที่ระยะเวลา 60 นาที (100%)

ผลจากการศึกษานี้ได้ข้อสรุปว่า การอิมพลานเตชัน โดยใช้ออกซิเจนไอออน โดยใช้โดส  $2 \times 10^{17} - 1 \times 10^{18}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> ที่ระยะเวลา 60 นาที มีโอกาสที่สปีเนลจะแสดงสีแดงชัดเจนขึ้น โดยใช้โดส  $6.1 \times 10^{17} - 8 \times 10^{17}$  ไอออน/ซม<sup>2</sup> เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มคุณภาพสปีเนลคุณภาพต่ำในโทนสีแดงอมน้ำตาลให้มีสีแดงสดขึ้น และมีเนื้อสีขึ้น ส่วนสภาวะที่เริ่มทำให้ตำหนิ ภายในที่คล้ายฝุ่น ตำหนิกลุ่มหมอก และพวก liquid inclusions ลดจำนวนลง คือ ใช้โดส  $2 \times 10^{17} - 4 \times 10^{17}$

ไอออน/ซม<sup>2</sup> ที่ระยะเวลา 60 นาที ผลการวิเคราะห์ UV-Visible พบว่าสเปกตรัมของตัวอย่าง สปิเนลก่อนและหลังอิมพลานเตชัน โดยทั่วไปยังแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนของ  $Fe^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 305-330, 371-378 และ 380-381 nm และแสดงการดูดกลืนของ  $Cr^{3+}$  ที่ตำแหน่ง 391-393, 413-418 และ 538-540 nm สเปกตรัมการดูดกลืนของสปิเนลหลังอิมพลานเตชัน ส่วนใหญ่จะแสดงความเข้มของการดูดกลืนลดลง เนื่องจากไอออนอิมพลานเตชันทำให้ตำหนิในเนื้อพอลอยลดลง พอลอยจึงมีความใสมากขึ้น





บรรณานุกรม

## บรรณานุกรม

- กุลนารี วงศ์ราช. (2550). การวิเคราะห์เขม่าลูกกระสุนปืนด้วยเทคนิค PIXE. วท.บ. (ฟิสิกส์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ถ่ายเอกสาร.
- กันต์พงษ์ ทองแถม. (2552). ผลของการเผาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของ  $MgAl_2O_4$  สปิเนล. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยรามคำแหง. ถ่ายเอกสาร.
- บุญทวี ศรีประเสริฐ; และคณะ. (2551). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยเทคนิคการตรวจสอบอัญมณีที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคใหม่. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- ราชบัณฑิตยสถาน. (2548). พจนานุกรมแร่และอัญมณี ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพฯ: อรุณการพิมพ์.
- สุเมธ ชัยชนะ. (2547). การศึกษาระบบเครื่องเร่งอนุภาค Tandetron เพื่อผลิตลำไอออน  $He^{++}$  พลังงาน 2.13 MeV สำหรับการทดลอง RBS. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิสิกส์). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ถ่ายเอกสาร.
- สมศร สิงขรัตน์; และ ชีรศักดิ์ คำวรรณ. (2010). คู่มือแนะนำเทคนิค RBS, RBS/channeling, PIXE และ IL. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Barley, M.E; Pickard, A.L.; Zaw, K; Rak, P; & Doyle, G. (2003). Jurassic to Miocene magmatism and metamorphism in the Mogok metamorphic belt and the India-Eurasia collision in Myanmar. *Tectonics*. 22: 1-14.
- Bertrand, G; Rangin, C; Maluski, H; Bellon, H; & GIAC Scientific Party. (2001). Diachronous cooling along the Mogok Metamorphic Belt (Shan scarp, Myanmar): the trace of the northward migration of the Indian syntaxis. *Journal of Asian Earth Sciences*. 19: 694-659.
- Bunnag, N; & Thanasuthipitak, P. (2003). Mogok Spinel : Optical (UV-VIS-NIR) absorption Spectroscopic Study. *Chiang Mai Journal Sciences*. 30(2): 60-79.
- Chopelas, A; & Hofmeister, A. M. (1991). Vibrational spectroscopy of aluminate spinels



- at 1 atm and of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  to over 200 kbar. *Phys. Chem. Mineral.* 18: 279-293.
- Cimnakpan, S. (2010). *research report on the heat treatment of spinels*. Chiang Mai: Chiang Mai University.
- Cohen, D.D. (1991). Particle Induced X-ray Emission. *ANSTO Australia*.
- Deer, W.A; Howie, R.A; & Zussman, J. (1966). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. John Wiley and Sons. New York. 528.
- Garnier, V; Maluski, H; Giuliani, G; Ohnenstetter, D; & Schwarz, D. (2006). Ar-Ar and U-Pb ages of marble-hosted ruby deposits from Central and South-east Asia. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 43: 509-532.
- Govil, I.M. (2001). Proton Induced X-ray Emission – A Tool for Non-destructive Trace Element Analysis. *Current Science*. 80: 1542-1549.
- Harlow, G.E; Pamukcu, A; Saw Nauhg, U; & Thu, U.K. (2006). Mineral assemblages and the origin of ruby in the Mogok Stone Tract, Myanmar. *GIA Gemological Research Conference*.
- Johansson, T.B; Axelsson, K.R; & Johansson, S.A.E. (1970). X-ray Analysis: Elemental Trace Analysis at the 10-12 g Level. *Nucl. Instr. and Meth.* 84: 141-143.
- Mitchell, A.H.G; Htay, M.T; Htun, K.M; Win, M.N; Oo, T; & Hlaing, T. (2007). Rock relationships in the Mogok metamorphic belt, Tatkon to Mandalay, Central Myanmar. *Journal of Asian Earth Sciences*. 19: 891-910.
- Nassau K. (1978). The origins of color in minerals. *The American Mineralogist*. 63: 219-229.
- Nassau K. (2001). *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*. 2nd Edition. John Wiley & Sons. New York.
- Peretti, A; & Gunther, D. (2003). Spinel from Namya, Contribution to gemology. *Gemresearch Swisslab*. 2: 15-18p.
- Saeseaw, S; Wang, W; & Scarratt, K. (2009a). *Distinguishing heated spinels from unheated natural spinels and from synthetic spinels: A short review of on-going*

research. Retrieved November 20, 2011 from [http://www.gia.edu/research/Heated\\_spinel\\_Identification\\_at\\_April\\_02\\_2009.pdf](http://www.gia.edu/research/Heated_spinel_Identification_at_April_02_2009.pdf)

Saeseaw, S; Wang, W; & Scarratt, K. (2009b). *Distinguishing heated spinels from unheated natural spinels and from synthetic spinels: A short review of on-going research*. Retrieved November 20, 2011 from [http://www.gia.edu/research/Heated\\_spinel\\_Identification\\_at\\_May\\_25\\_2009.pdf](http://www.gia.edu/research/Heated_spinel_Identification_at_May_25_2009.pdf)

Smith, C.P; Beesley, C.R; Darenius, E.Q; & Mayerson, W.M. (2008). A closer look at Vietnamese spinel. *In Color*. 31-34.

Smith, C.P. (2012). Spinel and its Treatments: A Current Status Report. *InColor*. Spring: 50-54.

Swiss Gemmological Institute. (2010). *Spinel: A Gemstone on the Rise*. Retrieved November 20, 2011 from [http://www.ssef.ch/fileadmin/Documents/PDF/650\\_Presentations/HK2010arch\\_Spinel.pdf](http://www.ssef.ch/fileadmin/Documents/PDF/650_Presentations/HK2010arch_Spinel.pdf)

Technical guides. (2012). *Ion Implantation Processes in Semiconductor Manufacturing*. Retrieved October 18, 2012 from <http://www.leb.e-technik.uni-erlangen.de/lehre/java/boron.html>

Themelis, T. (2008). Gem & mines of Mogok. *A & T Publication*. 352.

The Gem and Jewelry Institute of Thailand. (2012). *อุตสาหกรรมพลอยสี*. Retrieved November 20, 2011 from <http://gemandjewelrydb.git.or.th/GemProject/Gemfiles/non-member/CS-Version-IX.pdf>

Yang, C; Larsson, N.P.O; Swietlicki, E; Malmqvist, K.G; Jamieson, D.N; & Ryan, C.G. (1993). Imaging with Ionoluminescence (IL) in a Nuclear Microprobe. *Nucl. Instr. and Meth.* B77: 188-194.

Yui, T.F; Zaw, K; & Wu, C.M. (2008). A preliminary stable isotope study on Mogok Ruby, Myanmar. *Ore Geology Reviews*. 34: 192-199.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงองค์ประกอบเคมีในสีเปลกลุ่มสีส้มแดง (Red-Orange : RO)



elements (Wt%) No.	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
SM 1	19.18	77.09	0.06	0.05	0.51	1.37	BDL.	0.80	BDL.	0.02	0.91	0.02	100
SM 2	17.84	69.97	0.04	0.06	1.21	2.84	0.21	7.03	BDL.	0.59	0.17	0.04	100
SM 3	18.87	79.29	0.10	0.13	0.80	0.10	BDL.	0.52	0.02	0.03	0.14	BDL.	100
SM 4	20.97	76.84	0.05	0.10	1.13	0.40	BDL.	0.37	BDL.	0.04	0.09	0.02	100
SM 5	19.38	77.86	0.04	0.03	0.70	0.62	BDL.	1.17	BDL.	0.02	0.15	0.04	100
SM 6	18.20	75.79	0.08	0.10	1.67	2.78	BDL.	0.33	BDL.	0.02	0.91	0.12	100
SM 7	15.77	54.97	0.06	0.06	0.58	7.53	0.58	18.39	0.14	1.49	0.43	BDL.	100
SM 8	18.36	76.65	0.17	0.06	3.05	0.30	BDL.	0.76	BDL.	0.06	0.60	BDL.	100
SM 9	19.35	77.09	0.04	0.18	2.55	0.16	BDL.	0.24	BDL.	0.01	0.31	0.07	100
SM 10	19.96	77.74	0.03	0.19	1.62	0.06	BDL.	0.30	0.02	0.01	0.07	BDL.	100
SM 11	20.05	77.87	0.04	0.18	1.33	0.08	BDL.	0.34	BDL.	0.03	0.07	BDL.	99.99
SM 12	19.30	79.22	0.06	0.01	0.43	0.17	BDL.	0.51	BDL.	0.01	0.27	0.02	100
SM 13	19.50	77.66	0.04	0.10	1.26	0.85	BDL.	0.44	BDL.	BDL.	0.12	0.03	100
SM 14	17.31	78.54	0.07	0.26	0.80	1.76	BDL.	0.59	BDL.	0.02	0.66	BDL.	100
SM 15	19.76	78.66	0.04	0.21	0.94	BDL.	0.01	0.18	BDL.	0.02	0.15	0.03	100
SM 16	19.18	75.45	0.90	BDL.	1.88	1.23	0.07	1.06	BDL.	0.05	0.17	BDL.	99.99
SM 17	16.06	78.94	0.12	0.37	2.94	0.33	0.04	0.90	BDL.	0.05	0.24	BDL.	99.99
SM 18	18.52	76.86	0.12	0.27	2.73	0.60	BDL.	0.39	BDL.	0.03	0.38	0.11	100
SM 19	20.19	77.20	0.08	0.08	0.93	0.71	BDL.	0.35	BDL.	BDL.	0.39	0.07	100
SM 20	19.79	78.20	0.03	0.33	1.06	0.12	BDL.	0.29	BDL.	0.02	0.13	0.03	100
SM 21	18.95	78.40	0.05	0.19	1.25	0.17	BDL.	0.66	BDL.	0.02	0.27	0.05	100
SM 22	19.65	76.60	0.05	0.23	1.02	0.90	BDL.	0.57	BDL.	0.03	0.91	0.04	100
SM 23	17.72	76.96	0.17	0.15	0.91	0.52	0.04	0.94	BDL.	0.03	2.56	BDL.	100
SM 24	18.59	78.06	0.07	0.30	1.54	0.44	BDL.	0.60	BDL.	0.04	0.32	0.03	99.99
SM 25	16.66	76.29	0.11	0.08	2.97	1.21	BDL.	1.83	BDL.	0.07	0.77	BDL.	99.99
SM 26	18.29	77.49	0.10	0.15	1.44	0.91	BDL.	0.85	0.02	0.03	0.68	0.04	100
SM 27	17.58	78.87	0.07	0.11	0.72	0.76	BDL.	0.60	BDL.	0.03	1.21	0.05	100
SM 28	18.70	76.94	0.17	0.03	2.25	0.53	BDL.	1.09	BDL.	0.02	0.26	0.03	100
SM 29	19.16	74.90	0.13	0.07	3.50	0.43	0.06	1.10	BDL.	0.07	0.48	0.09	99.99
SM 30	20.24	77.52	0.43	0.02	0.73	0.50	BDL.	0.25	BDL.	BDL.	0.23	0.09	100
SM 31	18.57	77.79	0.15	0.02	0.64	0.40	0.01	0.91	BDL.	BDL.	1.52	BDL.	100
SM 32	19.50	78.48	0.22	0.23	1.07	0.06	BDL.	0.30	BDL.	0.01	0.13	BDL.	100
SM 33	19.10	78.39	0.09	0.03	2.02	0.05	0.02	0.09	BDL.	BDL.	0.14	0.07	100
SM 34	17.57	78.91	0.07	0.06	0.83	0.81	BDL.	0.82	BDL.	0.02	0.92	BDL.	100

ตาราง (ต่อ)

elements (Wt%) No.	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
SM 35	19.31	79.05	0.05	0.19	1.15	BDL.	BDL.	0.22	BDL.	BDL.	0.03	BDL.	100
SM 36	19.17	78.40	0.05	0.23	1.66	0.07	BDL.	0.21	BDL.	BDL.	0.21	BDL.	100
SM 38	18.99	78.04	0.22	0.01	1.61	0.20	BDL.	0.21	BDL.	0.03	0.67	0.02	100
SM 39	20.11	78.02	0.12	0.01	1.03	0.19	BDL.	0.38	BDL.	BDL.	0.11	0.03	100
SM 40	19.47	78.76	0.09	0.05	0.81	0.30	BDL.	0.08	BDL.	BDL.	0.37	0.07	100
SM 42	20.03	77.70	0.04	0.04	1.59	BDL.	BDL.	0.20	BDL.	BDL.	0.29	0.10	99.99
SM 44	19.37	77.19	0.08	0.11	0.91	1.07	BDL.	0.39	BDL.	0.03	0.81	0.03	99.99
SM 46	16.62	80.52	0.03	0.12	1.03	0.08	0.1	1.04	BDL.	0.02	0.49	0.02	100
SM 49	17.44	79.71	0.26	0.14	1.54	0.43	BDL.	0.31	BDL.	BDL.	0.14	0.04	100
SM 51	18.75	78.51	0.32	0.37	1.25	0.21	BDL.	0.34	BDL.	BDL.	0.25	BDL.	100
SM 52	19.26	77.92	0.12	0.03	1.51	0.31	BDL.	0.30	BDL.	0.02	0.51	0.02	100
SM 53	19.30	78.03	0.04	0.04	0.87	0.64	BDL.	0.10	BDL.	0.01	0.91	0.05	99.99
SM 55	22.02	75.87	0.04	0.06	1.57	0.05	BDL.	0.09	BDL.	BDL.	0.26	0.04	100
SM 56	19.27	78.58	0.04	0.05	0.95	0.15	BDL.	0.53	0.01	0.01	0.38	0.03	100
SM 57	19.26	76.88	0.03	0.07	1.41	0.72	BDL.	1.23	BDL.	0.03	0.33	0.04	100
SM 58	18.33	72.92	0.05	0.06	2.83	2.36	0.09	2.65	0.03	0.22	0.39	0.06	99.99
SM 59	19.28	73.73	0.04	0.02	1.62	1.52	0.09	2.98	0.03	0.22	0.40	0.05	99.98
SM 60	19.32	73.09	0.02	0.14	0.71	1.27	0.10	3.36	BDL.	0.29	0.10	0.02	98.42
SM 61	16.22	61.34	0.04	0.05	0.89	5.85	0.46	13.41	0.11	0.99	0.60	0.05	100
SM 62	19.34	72.46	0.03	0.09	2.04	1.58	0.13	3.86	BDL.	0.33	0.13	BDL.	99.99
SM 63	19.54	78.28	0.07	0.23	0.76	0.22	0.02	0.71	BDL.	0.03	0.12	0.03	100
SM 65	19.03	76.69	0.02	0.21	0.52	0.77	0.04	1.59	BDL.	0.09	0.07	0.02	99.05
SM 66	18.67	72.92	0.04	0.12	1.38	1.31	0.11	3.06	0.03	0.22	1.05	0.10	99.01
SM 67	19.42	78.23	0.02	0.03	0.77	0.16	BDL.	0.90	BDL.	0.04	0.41	0.03	100
SM 68	16.44	79.92	0.06	0.11	1.44	0.69	BDL.	0.64	BDL.	0.02	0.63	0.06	100.
SM 69	19.44	78.42	0.04	0.35	0.86	0.22	0.01	0.40	BDL.	0.03	0.21	0.03	100
SM 70	19.55	77.52	0.02	0.06	0.95	0.32	BDL.	0.93	BDL.	0.04	0.57	0.04	100
SM 71	20.31	78.10	0.02	0.21	1.03	0.03	BDL.	0.21	BDL.	0.02	0.08	BDL.	100
SM 72	18.85	78.77	0.05	0.12	0.95	0.27	BDL.	0.26	BDL.	0.01	0.32	BDL.	99.6
SM 73	20.61	76.57	0.06	0.12	1.26	0.13	0.03	0.69	BDL.	0.01	0.52	BDL.	100
SM 74	18.68	78.41	0.05	0.05	1.41	0.13	BDL.	0.96	BDL.	0.04	0.27	BDL.	100
SM 75	14.59	81.99	0.08	0.08	0.67	0.31	0.02	1.96	BDL.	0.02	0.27	BDL.	99.99
SM 76	18.71	79.53	0.04	0.07	0.94	0.25	BDL.	0.40	BDL.	BDL.	0.06	BDL.	100

ตาราง (ต่อ)

elements (Wt%) No.	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
SM 77	19.59	77.79	0.10	0.09	1.16	0.39	BDL.	0.76	BDL.	0.03	0.07	BDL.	99.98
SM 78	18.91	78.94	0.08	0.10	1.06	0.32	BDL.	0.49	BDL.	0.03	0.07	BDL.	100
SM 79	17.65	80.29	0.11	0.36	1.00	0.06	BDL.	0.39	BDL.	0.03	0.11	BDL.	100
SM 80	19.40	78.94	0.03	0.03	0.45	0.12	BDL.	0.67	BDL.	BDL.	0.36	BDL.	100
SM 81	20.00	78.81	0.03	0.21	0.62	0.05	BDL.	0.17	0.01	0.02	0.10	BDL.	100
SM 82	17.43	79.62	0.04	0.14	1.36	0.28	0.04	0.87	BDL.	0.09	0.14	BDL.	100
SM 83	19.62	77.69	0.02	0.07	1.67	0.39	BDL.	0.23	BDL.	0.01	0.31	BDL.	100
SM 84	18.87	78.92	0.05	0.16	1.17	0.27	BDL.	0.29	BDL.	0.03	0.24	BDL.	100
SM 85	18.69	77.74	0.09	0.13	1.42	0.57	BDL.	0.84	BDL.	0.05	0.46	BDL.	99.99
SM 86	20.75	77.34	0.07	0.23	1.02	0.17	0.01	0.37	0.02	0.02	BDL.	BDL.	100
SM 87	19.27	74.96	0.07	0.26	1.90	0.41	0.02	0.39	BDL.	0.01	0.11	BDL.	97.4
SM 88	18.69	76.47	0.03	0.09	1.94	1.05	0.01	0.16	BDL.	0.01	0.28	0.01	98.74
SM 89	18.26	77.00	0.05	0.08	2.35	0.13	BDL.	0.17	BDL.	0.01	0.81	0.01	98.87
SM 90	19.14	77.23	0.02	0.04	1.30	0.84	BDL.	0.08	BDL.	BDL.	0.31	0.02	98.98
SM 92	18.17	76.47	0.07	0.06	2.16	0.04	0.01	0.24	BDL.	0.01	0.26	BDL.	97.49
SM 93	19.31	77.08	0.03	0.19	1.11	0.17	BDL.	0.18	BDL.	0.03	0.08	BDL.	98.18
SM 94	18.19	76.91	0.03	0.06	1.32	0.44	BDL.	1.15	BDL.	0.03	0.65	0.04	98.82
S04	3.15	86.86	0.07	0.43	0.38	7.12	BDL.	0.75	BDL.	BDL.	1.05	BDL.	99.81
S05	1.37	83.84	0.05	0.20	1.00	6.34	BDL.	0.88	BDL.	BDL.	0.69	0.14	94.51
S07	1.86	91.14	0.04	0.28	0.66	0.73	BDL.	1.11	BDL.	0.04	1.53	0.08	97.47
S09	1.03	86.99	0.14	0.37	0.44	4.24	BDL.	0.67	BDL.	BDL.	1.59	BDL.	95.47
S11	1.71	85.24	0.12	0.54	0.38	4.07	BDL.	0.58	BDL.	BDL.	0.55	0.03	93.22
S14	0.22	89.47	0.03	0.23	1.51	3.35	BDL.	0.34	BDL.	0.04	2.94	0.03	98.16
S18	1.98	84.68	0.02	0.41	0.27	7.07	BDL.	0.64	BDL.	BDL.	0.52	0.03	95.62
dkR1	20.69	76.91	0.02	0.11	0.09	1.57	BDL.	0.42	BDL.	BDL.	0.19	BDL.	100
dkR2	16.45	76.42	0.16	0.07	0.35	1.29	BDL.	0.93	BDL.	0.01	0.47	BDL.	96.15
dkR3	18.21	76.43	0.04	0.13	0.75	2.77	BDL.	0.46	BDL.	BDL.	1.16	0.04	99.99
dkR4	18.94	73.39	0.17	0.05	0.30	2.21	BDL.	0.68	BDL.	0.01	0.64	0.06	96.45
dkR5	18.89	78.42	0.05	0.14	0.68	1.00	BDL.	0.22	BDL.	BDL.	0.56	BDL.	99.96
pkR1	19.15	79.15	0.04	0.26	0.02	1.10	BDL.	0.16	BDL.	BDL.	0.08	BDL.	99.96
pkR2	18.41	74.57	0.17	0.07	0.20	0.82	BDL.	0.44	BDL.	BDL.	0.88	0.04	95.6
pkR3	19.64	77.66	0.02	0.07	0.37	0.85	BDL.	0.42	BDL.	BDL.	0.92	0.04	99.99
pkR4	19.34	77.68	0.01	0.18	0.17	1.05	BDL.	1.26	BDL.	BDL.	0.30	BDL.	99.99

ตาราง (ต่อ)

elements (Wt%) No.	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
pkR5	20.28	78.54	0.02	0.06	0.15	0.59	BDL.	0.18	BDL.	BDL.	0.17	BDL.	99.99
pR1	18.74	73.45	0.22	0.14	0.28	1.17	BDL.	0.72	BDL.	0.01	0.87	BDL.	95.6
pR2	17.27	74.63	0.18	0.06	0.21	1.26	BDL.	0.75	BDL.	BDL.	1.16	BDL.	95.52
pR3	18.11	79.04	0.04	0.18	0.34	1.18	BDL.	0.50	BDL.	0.02	0.54	BDL.	99.95
pR4	19.63	77.44	BDL.	0.14	0.43	1.18	BDL.	0.55	BDL.	BDL.	0.65	BDL.	100.02
pR5	17.92	73.60	0.03	0.04	0.47	1.88	BDL.	3.23	BDL.	BDL.	2.81	0.04	100.02
pR6	18.78	77.71	0.04	0.19	0.44	1.57	BDL.	0.50	BDL.	BDL.	0.74	0.05	100
pR7	18.01	78.28	0.06	0.03	0.27	1.71	BDL.	0.50	BDL.	BDL.	1.11	0.03	100
R1	19.03	76.06	0.16	0.30	0.48	3.38	BDL.	0.37	BDL.	BDL.	0.16	BDL.	99.94
R2	20.25	75.89	0.05	0.40	0.31	0.58	BDL.	0.25	BDL.	BDL.	0.37	BDL.	98.10
R3	17.60	76.79	BDL.	0.05	0.48	3.28	BDL.	0.58	BDL.	BDL.	1.18	0.03	99.99
R4	18.49	77.55	BDL.	0.13	0.37	1.88	BDL.	0.95	BDL.	BDL.	0.60	0.03	100
R5	19.02	76.90	0.03	0.01	0.18	2.91	BDL.	0.40	BDL.	BDL.	0.55	BDL.	100
R6	17.98	78.04	0.04	0.13	0.50	1.26	BDL.	1.07	BDL.	BDL.	0.96	0.03	100
R7	20.46	75.52	0.02	0.05	0.20	2.27	BDL.	0.56	BDL.	BDL.	0.91	BDL.	99.99

\* BDL. – below detection limit





ภาคผนวก ข

ตารางแสดงองค์ประกอบเคมีในสีเหลืองกลุ่มสีส้มแกมแดง (reddish Orange : rO)

elements (Wt%) sample	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
SM 41	20.88	77.53	0.06	0.03	1.19	BDL.	BDL.	0.06	BDL.	BDL.	0.09	0.04	99.88
SM 43	17.86	78.52	0.05	0.05	0.74	0.86	BDL.	0.51	BDL.	BDL.	1.39	0.03	100
SM 45	20.81	76.62	0.08	0.08	2.02	BDL.	BDL.	0.07	BDL.	BDL.	0.27	0.05	100
SM 47	19.58	77.18	0.14	0.18	1.59	0.89	BDL.	0.12	BDL.	0.01	0.29	0.03	100
SM 64	18.08	75.12	0.02	0.15	0.50	1.82	0.08	2.09	0.02	0.16	1.04	0.06	99.14
SM 91	19.02	76.79	0.02	0.01	1.67	0.01	BDL.	0.17	BDL.	0.01	0.17	BDL.	97.87
S01	1.94	88.53	0.08	0.35	0.38	4.57	BDL.	0.77	BDL.	0.01	0.99	0.05	97.67
S02	0.25	93.19	0.01	0.25	0.59	2.08	BDL.	0.12	BDL.	0.01	0.84	0.04	97.38
S03	2.92	85.42	0.17	0.32	0.40	2.41	BDL.	0.33	BDL.	BDL.	0.82	BDL.	92.79
S06	0.80	81.90	0.07	0.58	0.25	8.72	BDL.	0.21	BDL.	BDL.	1.04	0.04	93.61
S08	0.71	84.26	0.12	0.43	0.39	1.50	BDL.	0.74	BDL.	BDL.	1.88	0.02	90.05
S10	1.33	88.48	0.11	0.35	0.24	2.46	BDL.	1.01	BDL.	BDL.	0.94	0.05	94.97
S12	1.58	84.05	0.10	0.47	0.45	6.58	BDL.	0.87	BDL.	BDL.	1.28	0.02	95.4
S13	2.81	85.76	0.05	0.28	0.20	3.65	BDL.	0.54	BDL.	BDL.	1.10	0.03	94.42
S15	1.58	91.28	0.05	0.16	0.32	2.59	BDL.	0.62	BDL.	BDL.	1.29	BDL.	97.89
S16	2.98	89.96	0.03	0.27	0.23	2.49	BDL.	1.02	BDL.	BDL.	0.73	0.04	97.75
S17	1.01	90.28	0.12	0.31	0.46	1.94	BDL.	0.89	BDL.	0.03	0.68	0.03	95.75

\* BDL. – below detection limit



ภาคผนวก ค

ตารางแสดงองค์ประกอบเคมีในสปีเหล็กกลุ่มสีแดงแกมส้ม (orangy Red : oR)

elements (Wt%) No.	Major element		Trace element										Total
	Mg	Al	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	
SM 37	19.93	78.31	0.09	0.26	0.73	0.39	BDL.	0.09	BDL.	0.01	0.17	0.02	100
SM 48	18.98	77.27	0.14	0.44	1.86	0.90	BDL.	0.21	BDL.	0.04	0.12	0.03	99.99
SM 50	19.01	78.92	0.08	0.03	1.44	0.15	BDL.	0.08	BDL.	BDL.	0.28	BDL.	99.99
SM 54	15.55	74.23	0.05	0.03	0.54	0.45	0.03	7.19	BDL.	0.01	1.87	0.04	99.99
SN 1	20.40	75.60	0.01	0.03	0.32	0.38	BDL.	0.49	BDL.	BDL.	0.12	0.03	97.38
SN 2	20.61	74.40	0.05	0.03	0.24	0.08	BDL.	0.22	BDL.	0.01	0.42	0.03	96.09
SN 3	19.96	75.80	0.01	0.02	0.29	0.37	BDL.	0.23	BDL.	0.02	0.93	0.02	97.65
SN 4	19.48	74.28	0.01	0.04	0.28	0.8	BDL.	0.45	BDL.	0.02	0.96	0.05	96.37
SN 5	20.98	75.67	BDL.	0.14	0.27	0.42	BDL.	0.39	BDL.	BDL.	0.40	0.02	98.29
SN 6	20.06	77.05	BDL.	0.06	0.28	0.92	BDL.	0.36	BDL.	BDL.	0.48	0.03	99.24
SN 7	20.06	73.32	0.04	0.08	0.39	0.79	BDL.	0.50	BDL.	BDL.	0.80	0.05	96.03
SN 8	19.94	76.15	0.01	0.07	0.18	0.78	BDL.	0.66	BDL.	0.01	1.06	0.03	98.89
SN 9	20.63	75.62	BDL.	0.06	0.32	0.34	BDL.	0.29	BDL.	BDL.	0.48	0.04	97.78
SN 10	19.94	74.17	0.01	0.05	0.20	0.54	BDL.	0.41	BDL.	0.01	1.53	0.03	96.89
SN 11	19.45	75.29	0.01	0.13	0.39	1.48	BDL.	0.40	BDL.	BDL.	0.80	0.03	97.98
SN 12	19.71	75.89	0.02	0.09	0.39	1.11	BDL.	0.45	0.01	0.01	0.20	0.04	97.92
SN 13	19.24	75.96	0.01	0.06	0.35	0.41	BDL.	0.47	BDL.	BDL.	0.53	0.04	97.07
SN 14	21.03	76.06	0.01	0.02	0.43	0.40	BDL.	0.42	BDL.	0.01	0.21	0.04	98.63
SN 15	19.57	74.72	0.01	0.01	0.26	1.07	BDL.	0.63	BDL.	BDL.	1.24	0.02	97.53

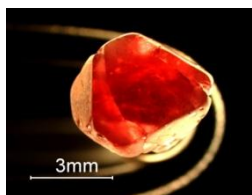
\* BDL. – below detection limit



ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาสมบัติทางอัญมณี และสเปกตรัมการดูดกลืน

Sample number : SM 1



Weight : 0.610 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.65

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

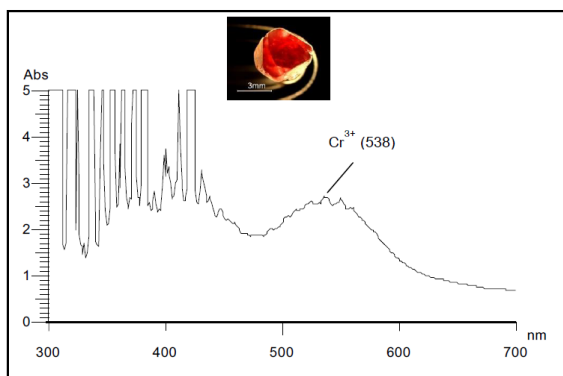
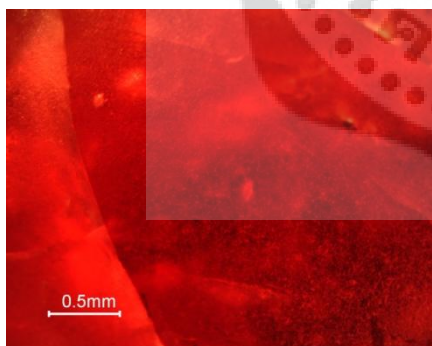
Color :

Hue : (RO) red-orange

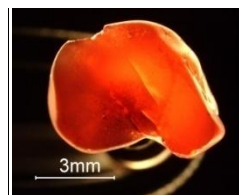
Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud



Sample number : SM 2



Weight : 0.836 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

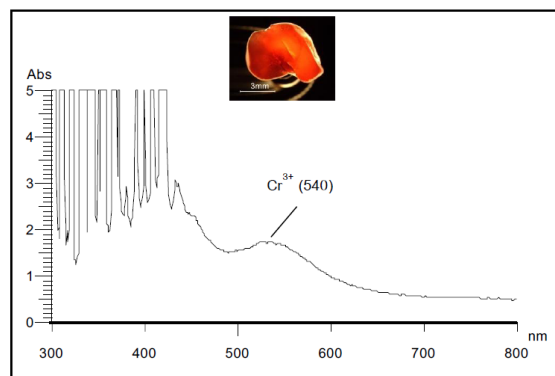
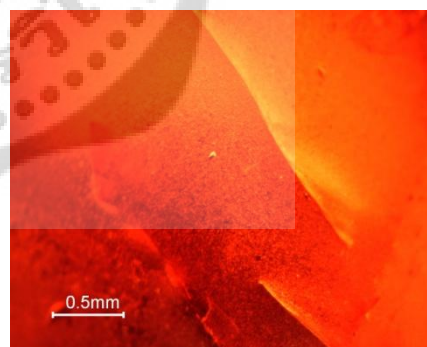
Color :

Hue : (RO) red-orange

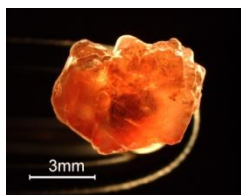
Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud



Sample number : SM 3



Weight : 0.911 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.54

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

Saturation : (2) slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud

Sample number : SM 4



Weight : 0.920 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.59

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

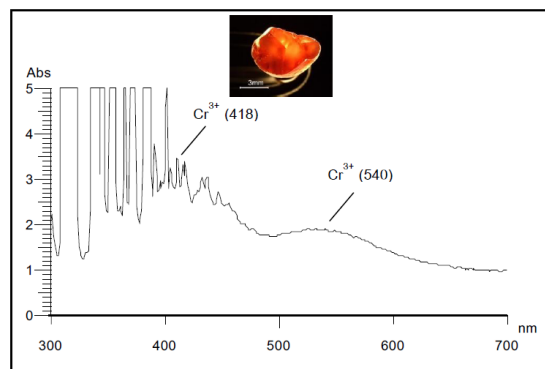
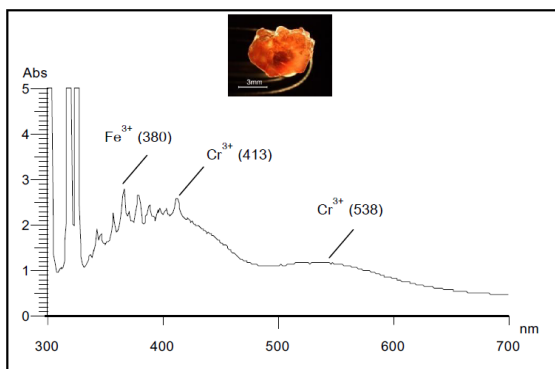
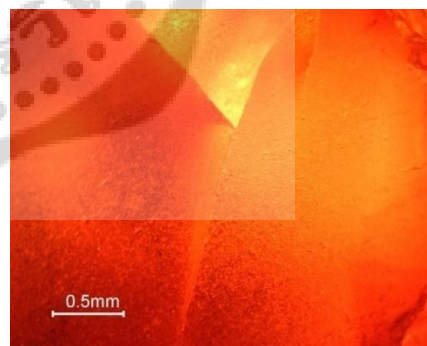
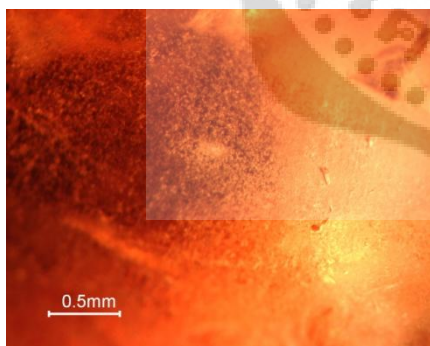
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

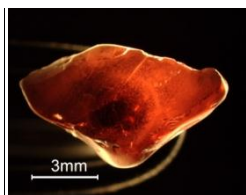
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud



Sample number : SM 5



Weight : 1.022 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.59

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

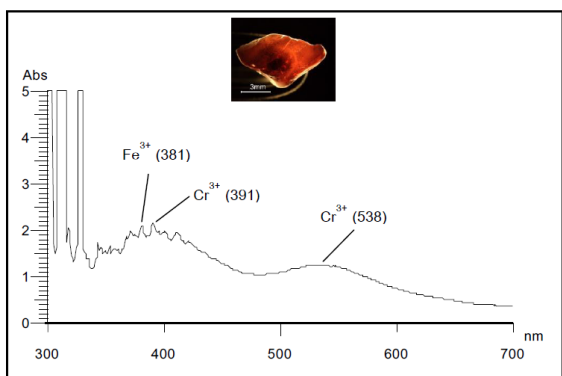
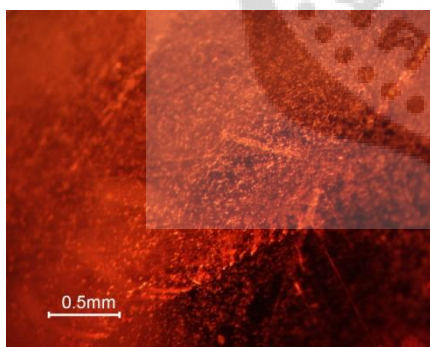
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

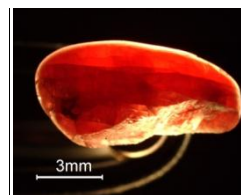
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud



Sample number : SM 6



Weight : 0.624 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

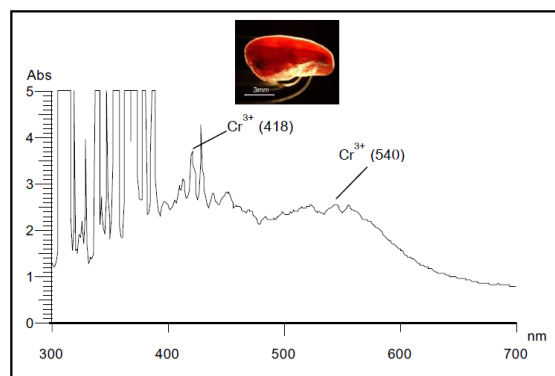
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

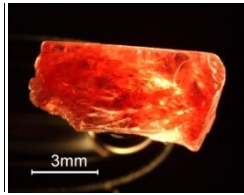
(brownish)

Inclusion : cloud, fracture





Sample number : SM 7



Weight : 0.941 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

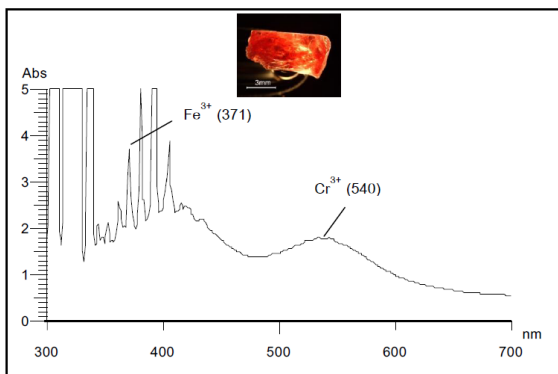
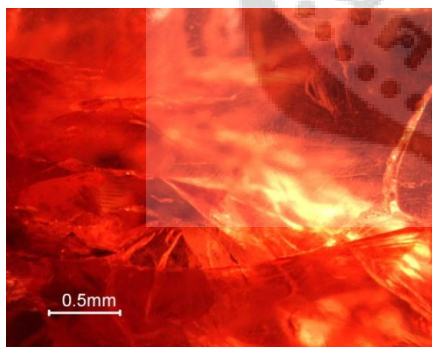
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

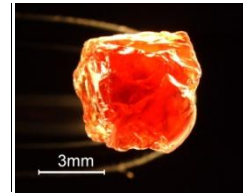
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 8



Weight : 0.886 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

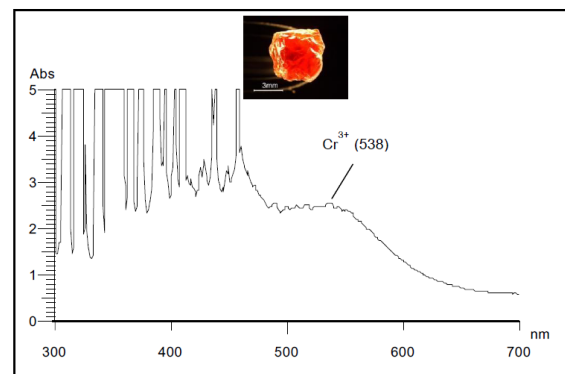
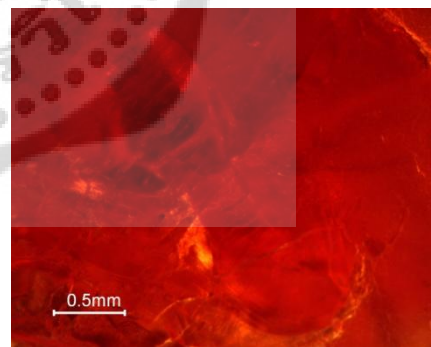
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 9



Weight : 1.039 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.53

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

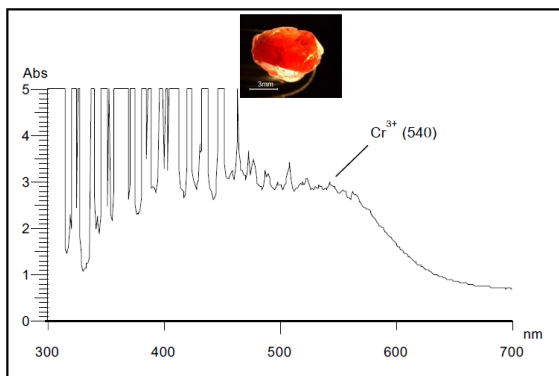
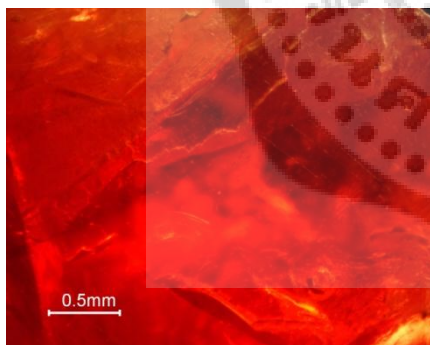
Color :

Hue : (RO) red-orange

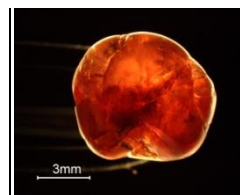
Tone : (5) Medium

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 10



Weight : 1.499 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

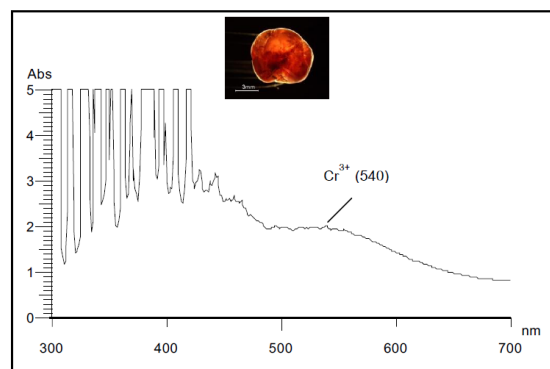
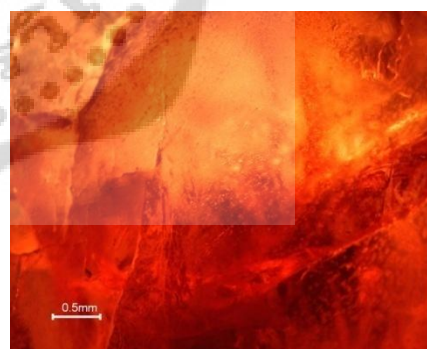
Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

Saturation : (2) slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute particle, cloud, fracture



Sample number : SM 11



Weight : 1.543 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.56

Fluorescence :

LWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

Hue : (RO) red-orange

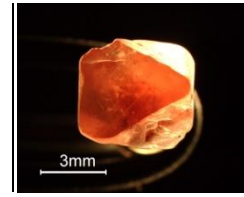
Tone : (3) Light

Saturation : (2) slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute particle, cloud, fracture

Sample number : SM 12



Weight : 1.086 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

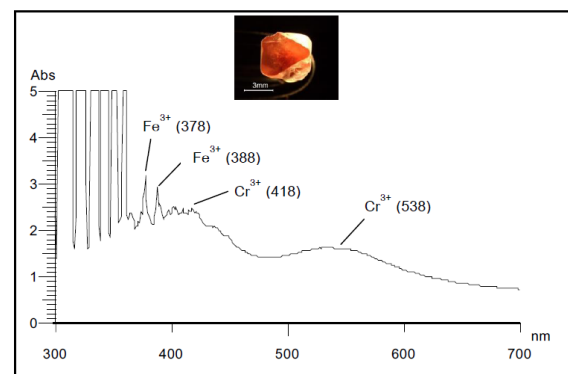
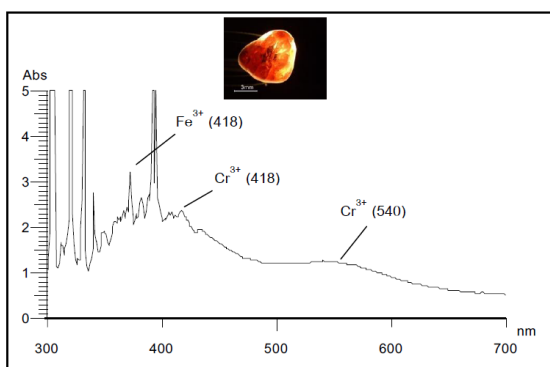
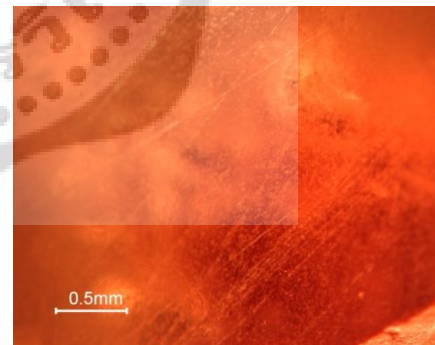
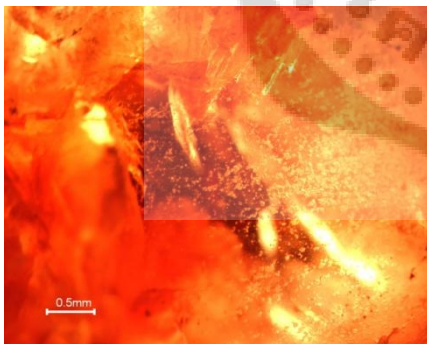
Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

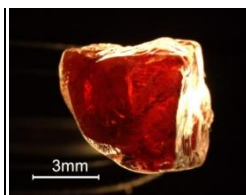
Saturation : (2) slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, needle-like inclusion



Sample number : SM 13



Weight : 2.013 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

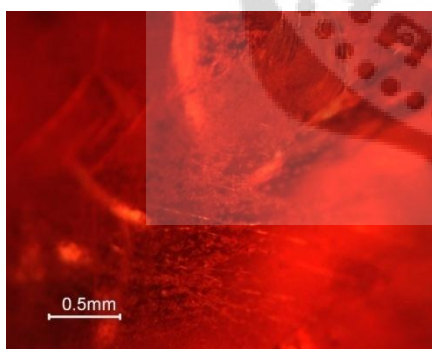
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute particle, cloud, fracture



Sample number : SM 14



Weight : 2.152 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

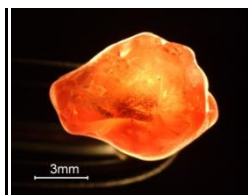
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute particle, cloud, fracture



Sample number : SM 15



Weight : 2.138 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

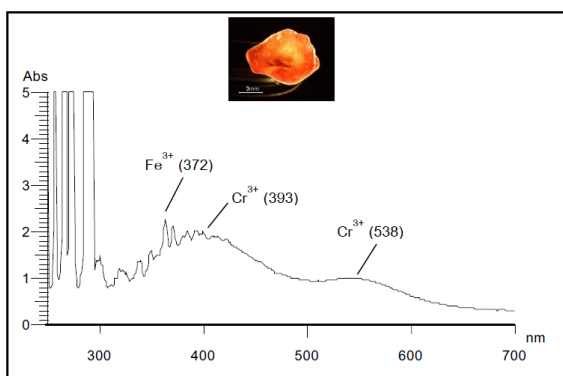
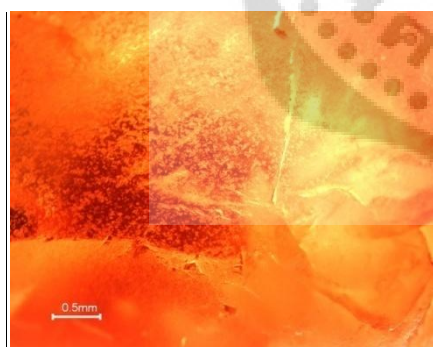
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Light

Saturation : (2) slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : minute exsolved particle, cloud



Sample number : SM 16



Weight : 0.911 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

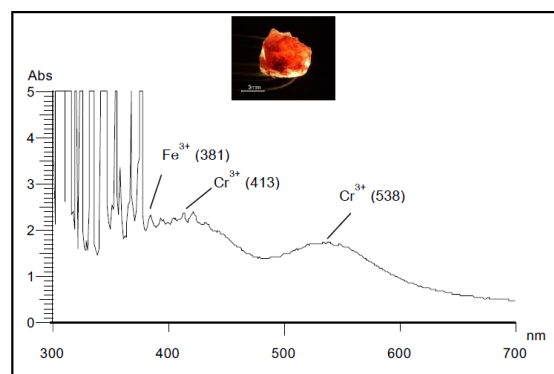
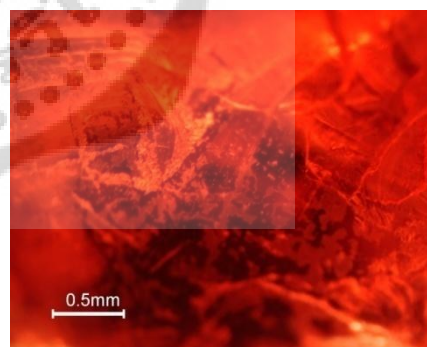
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : minute particle, cloud, fracture



Sample number : SM 17



Weight : 1.297 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.53

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

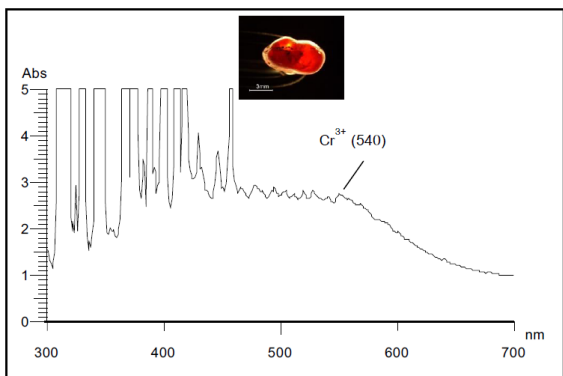
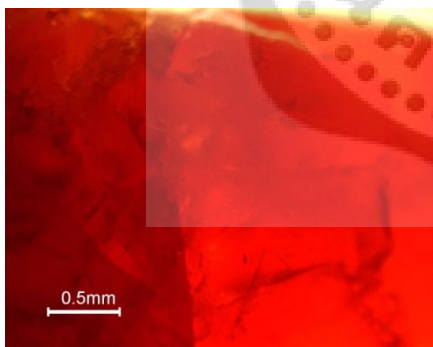
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, fracture



Sample number : SM 18



Weight : 1.527 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

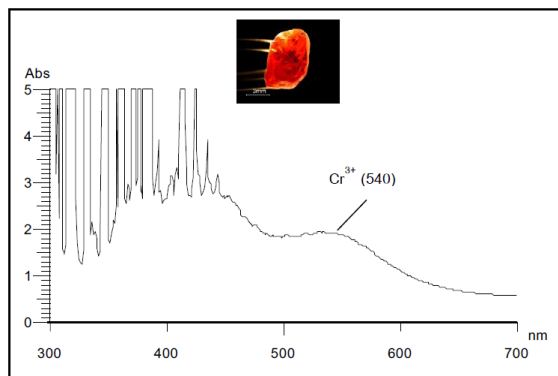
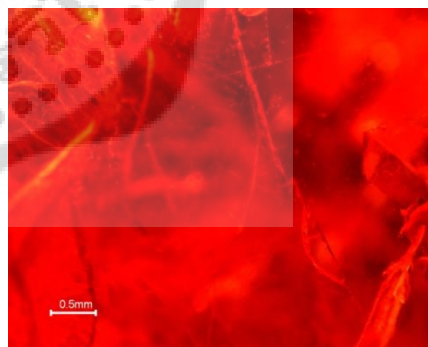
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

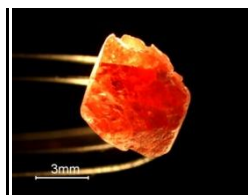
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : fracture, needle-like inclusion



Sample number : SM 19



Weight : 1.395 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

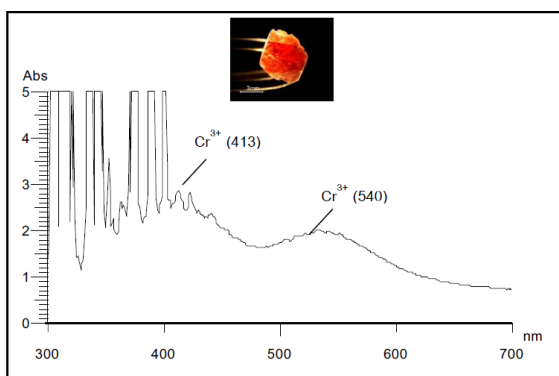
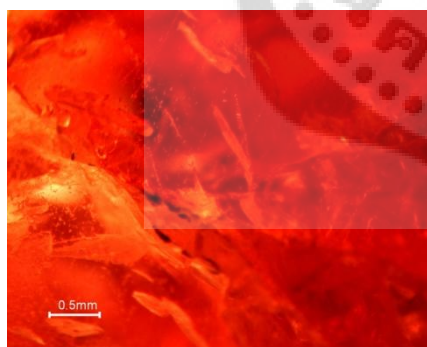
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : fracture, needle, crystal



Sample number : SM 20



Weight : 1.678 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

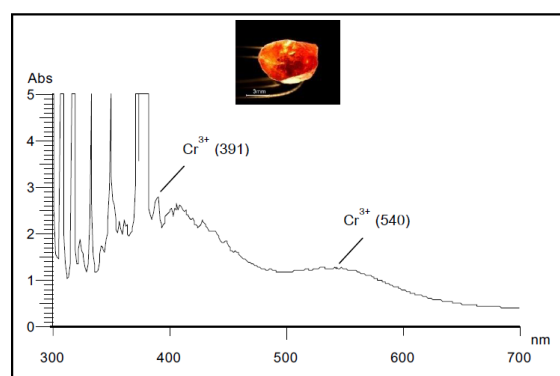
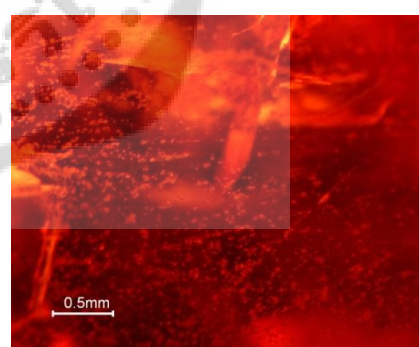
Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

Saturation : (2) slightly grayish

(brownish)

Inclusion : minute particle, needle, crystal



Sample number : SM 21



Weight : 2.225 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

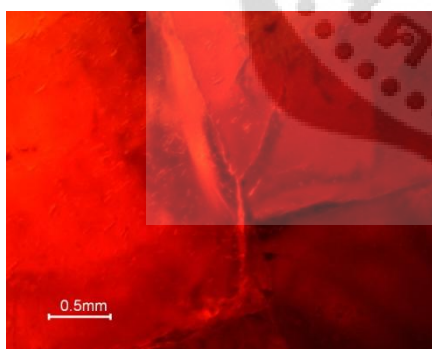
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : fracture, crystal, cloud



Sample number : SM 22



Weight : 2.433 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

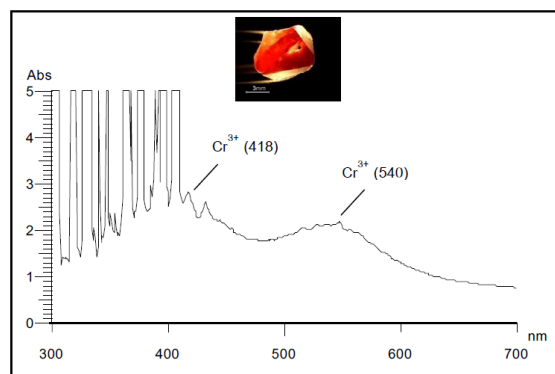
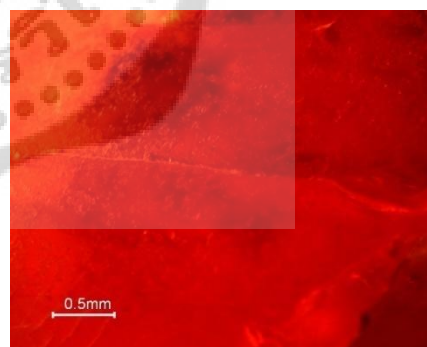
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : crystal, cloud, minute particle





Sample number : SM 23



Weight : 1.772 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

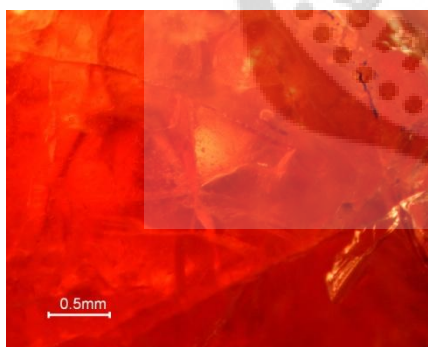
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, fracture



Sample number : SM 24



Weight : 3.962 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

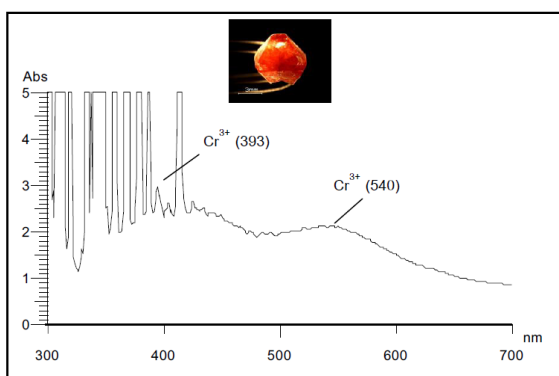
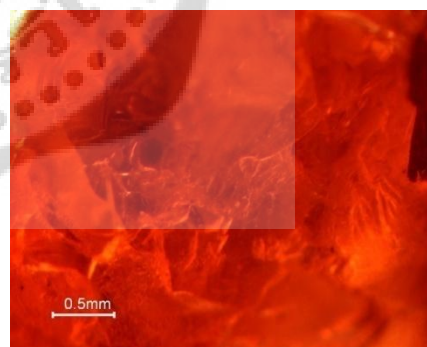
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

Saturation : (2) slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, fracture



Sample number : SM 25



Weight : 1.635 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

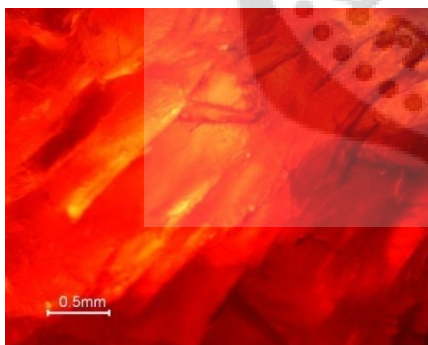
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

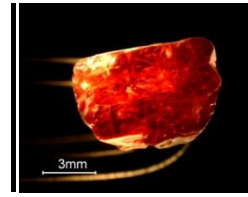
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, fracture



Sample number : SM 26



Weight : 1.843 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

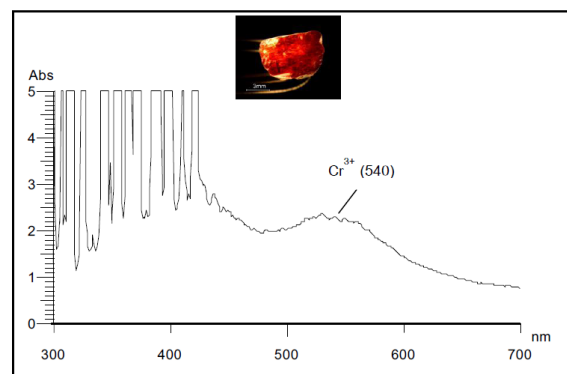
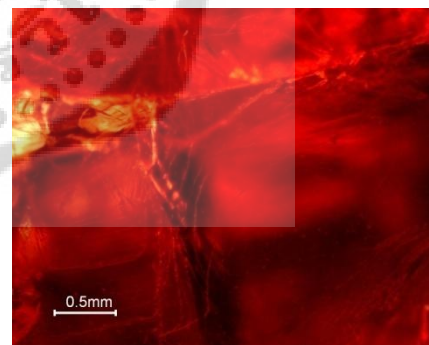
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, fracture



Sample number : SM 27



Weight : 1.757 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

Hue : (RO) red-orange

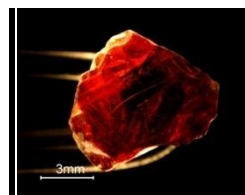
Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, fracture

Sample number : SM 28



Weight : 1.682 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

Color :

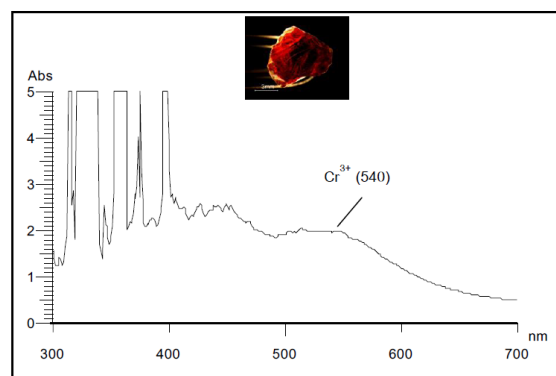
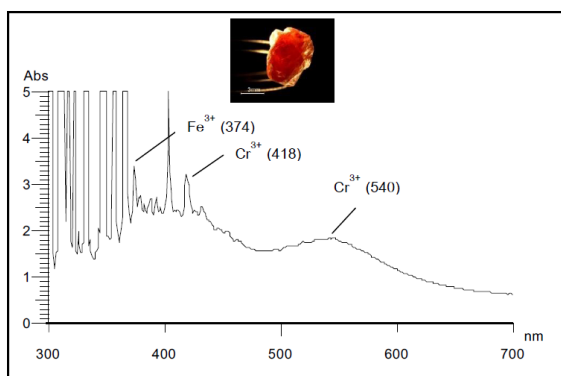
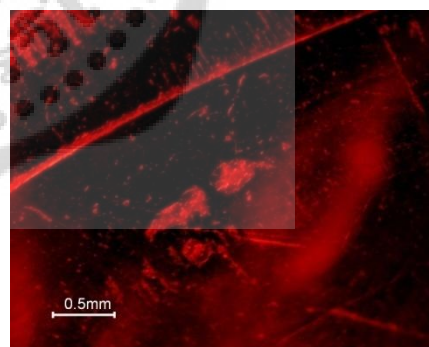
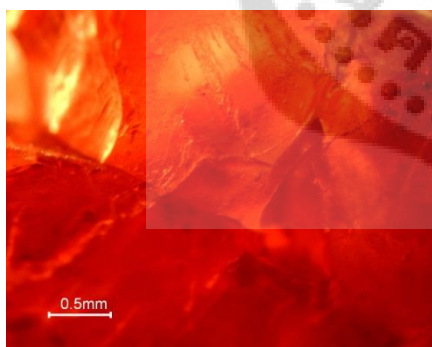
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

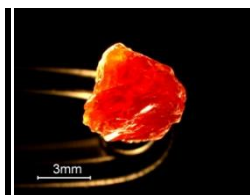
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : cloud, minute particle, crystal



Sample number : SM 29



Weight : 0.706 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

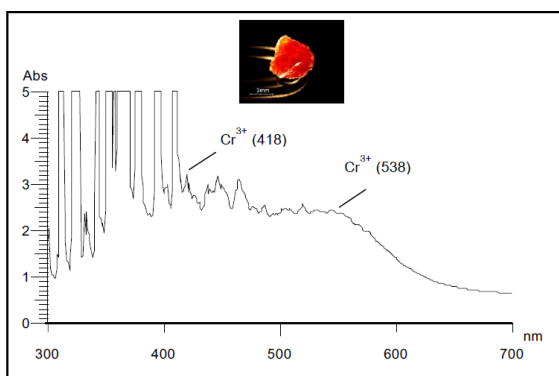
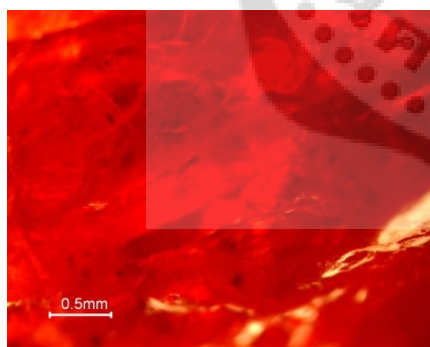
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 30



Weight : 0.942 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.51

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

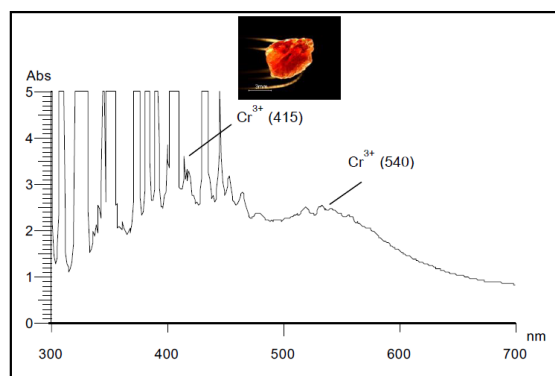
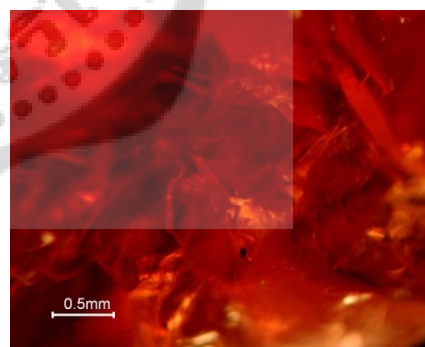
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

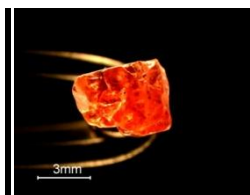
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 31



Weight : 0.934 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

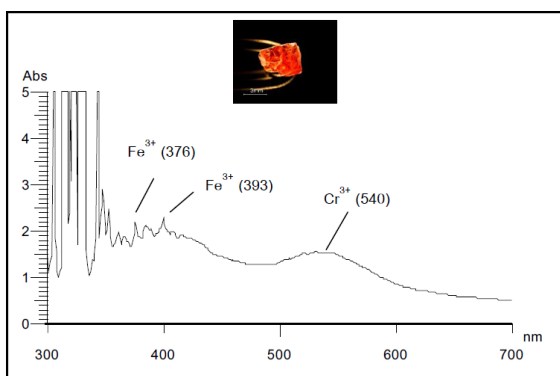
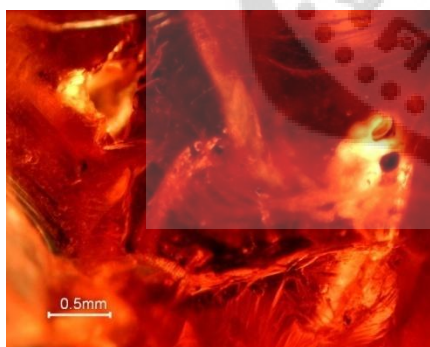
Color :

Hue : (RO) red-orange

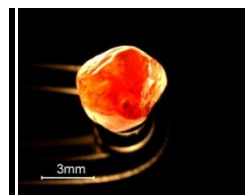
Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : healed fracture, minute particle



Sample number : SM 32



Weight : 0.711 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

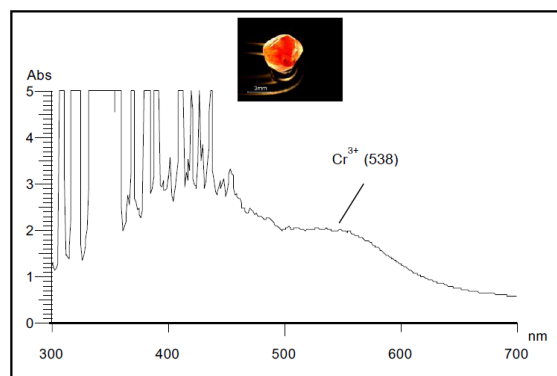
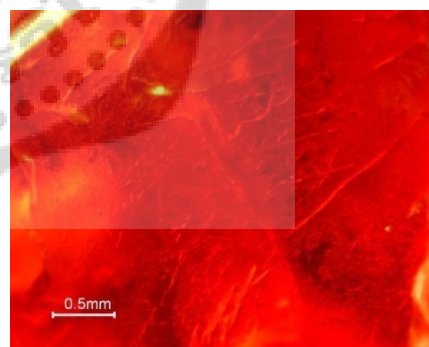
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : fracture, minute particle, cloud



Sample number : SM 33



Weight : 0.471 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.51

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

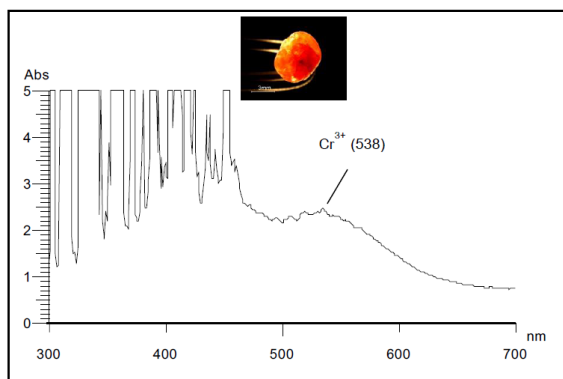
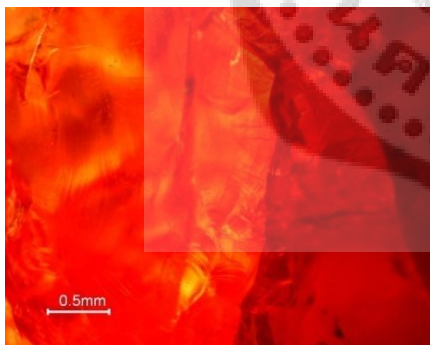
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : healed fracture



Sample number : SM 34



Weight : 0.814 ct

Refractive Index : -

Specific Gravity : 3.60

Fluorescence :

LWUV : Weak red

SWUV : Inert

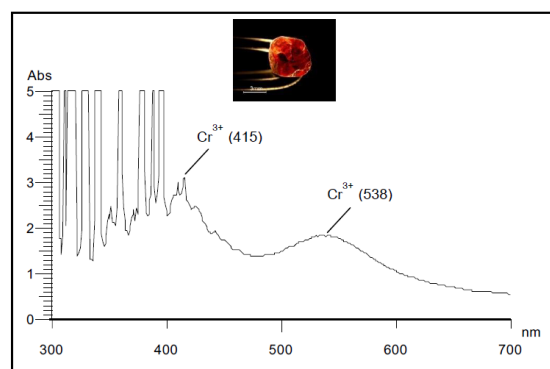
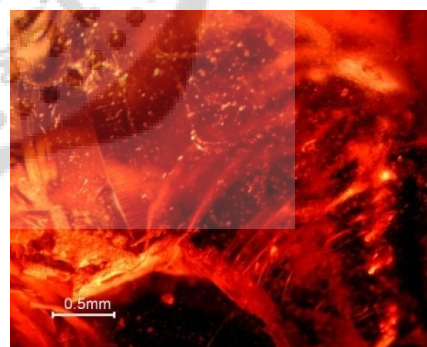
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : fracture, cloud, minute particle



Sample number : dkR 1



Weight : 0.206 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.68

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

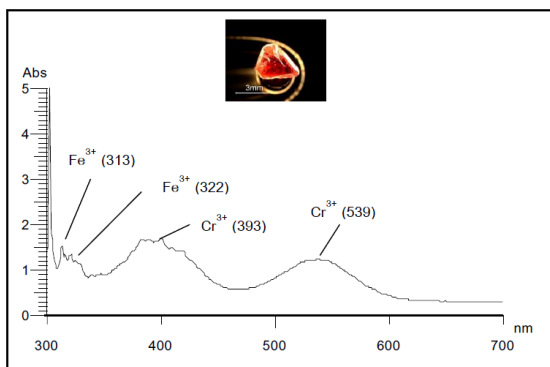
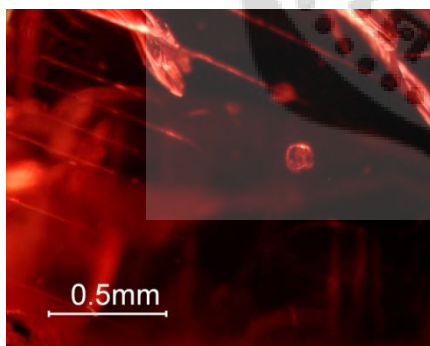
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture, crystal



Sample number : dkR 2



Weight : 0.347 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

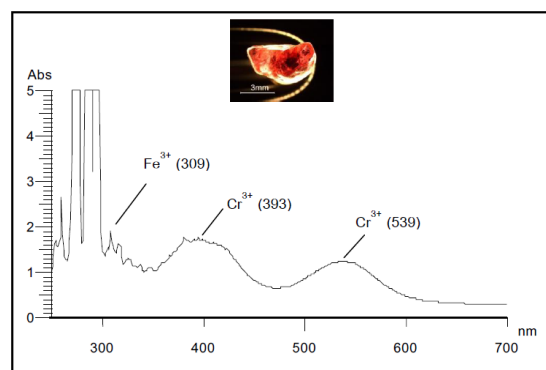
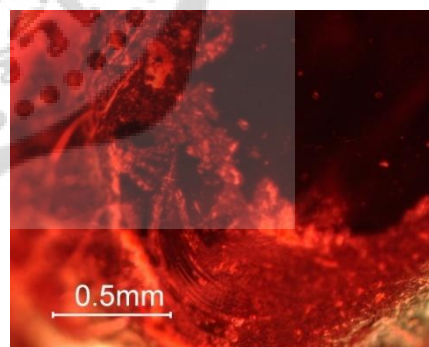
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

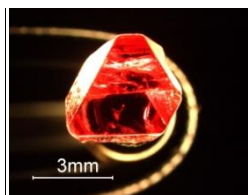
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : healed fracture, crystal, cloud



Sample number : dkR 3



Weight : 0.379 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

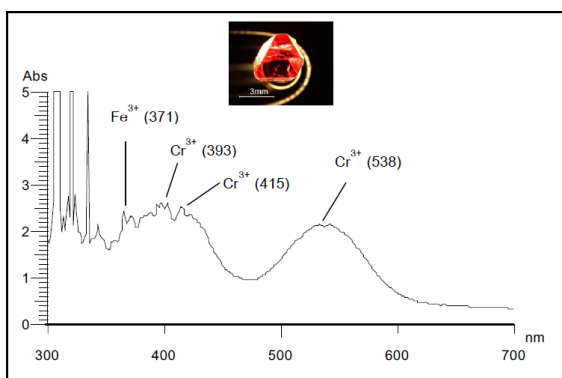
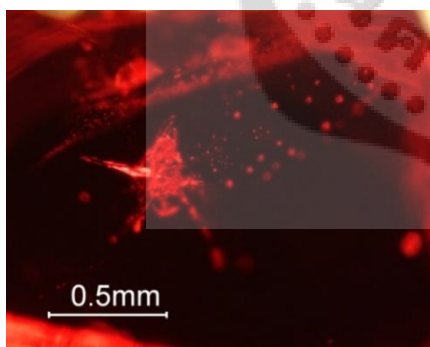
Color :

Hue : (RO) red-orange

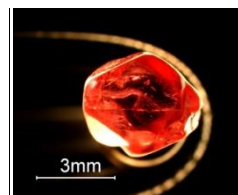
Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : crystal, cloud



Sample number : dkR 4



Weight : 0.337 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.62

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

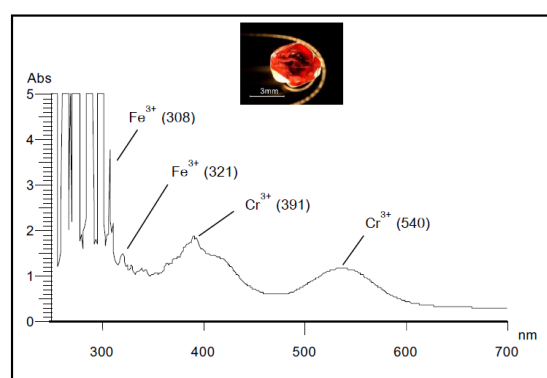
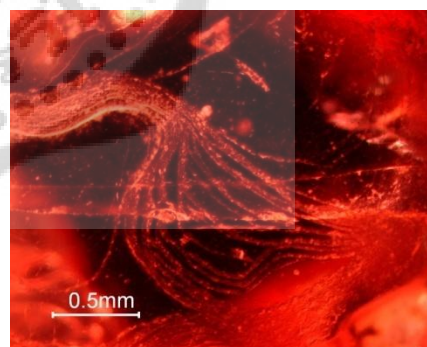
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : crystal, cloud, minute particle





Sample number : dkR 5



Weight : 0.650 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.57

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

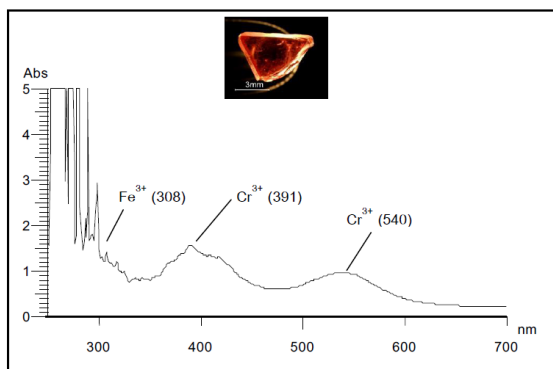
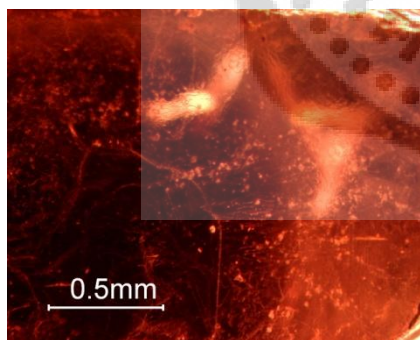
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

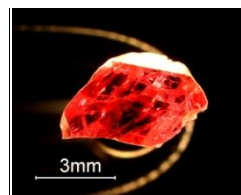
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : crystal, cloud, minute particle



Sample number : dkR 6



Weight : 0.404 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

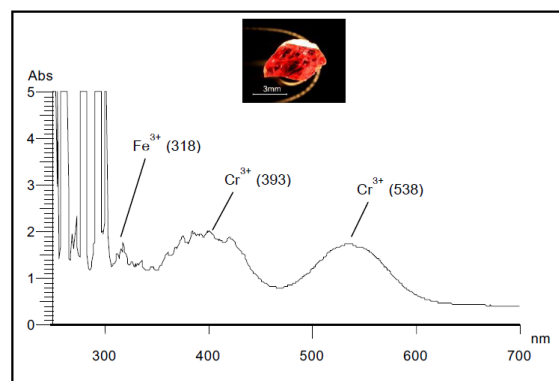
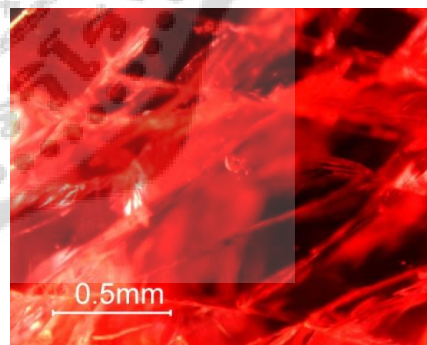
Color :

Hue : (RO) red-orange

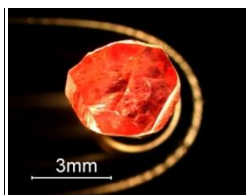
Tone : (7) Dark

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : crystal, healed fracture



Sample number : dkR 7



Weight : 0.302 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.60

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

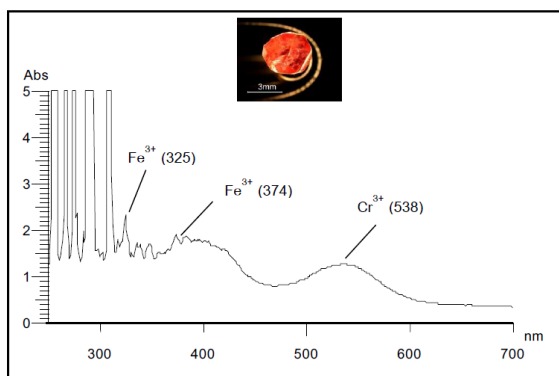
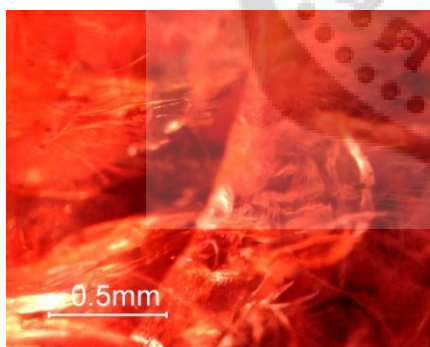
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

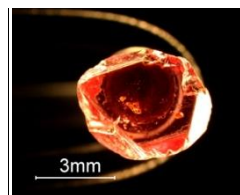
Saturation : (3) very slightly grayish

(brownish)

Inclusion : crystal, healed fracture



Sample number : pkR 1



Weight : 0.521 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.50

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

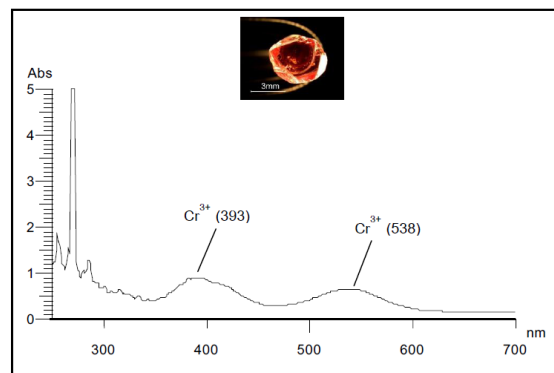
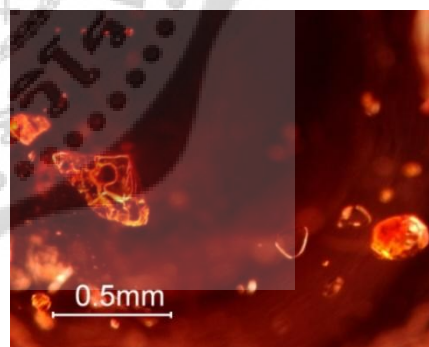
Color :

Hue : (RO) red-orange

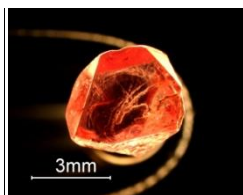
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal



Sample number : pkR 2



Weight : 0.428 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.60

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

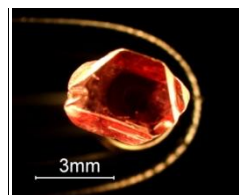
Hue : (RO) red-orange

Tone : (3) Light

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle

Sample number : pkR 3



Weight : 0.330 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.55

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

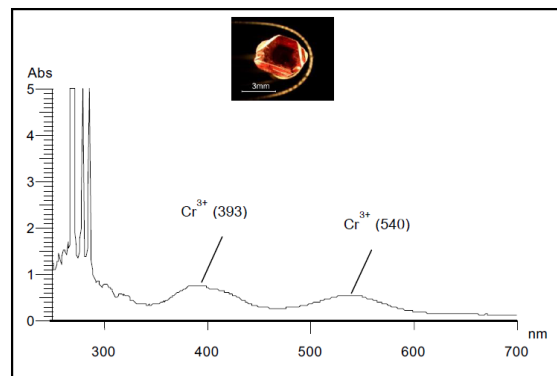
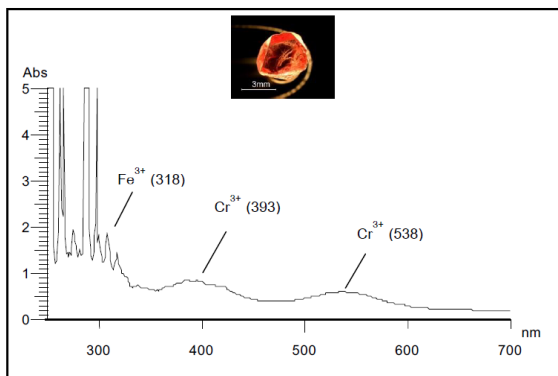
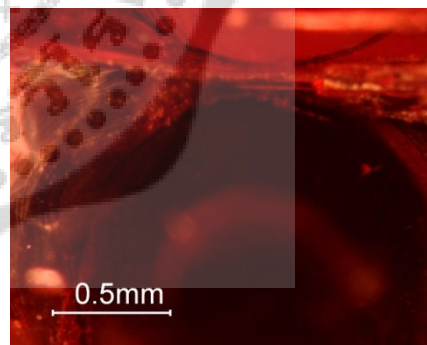
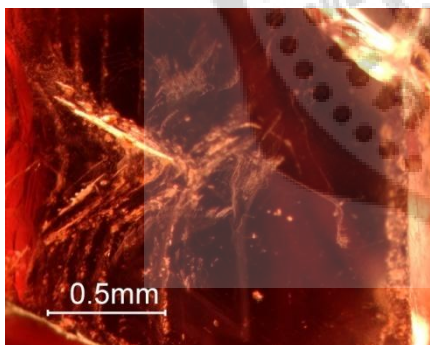
Color :

Hue : (RO) red-orange

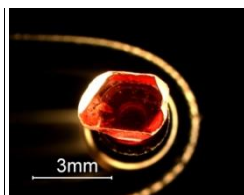
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : pkR 4



Weight : 0.134 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.62

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

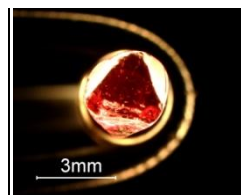
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle

Sample number : pkR 5



Weight : 0.269 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.64

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

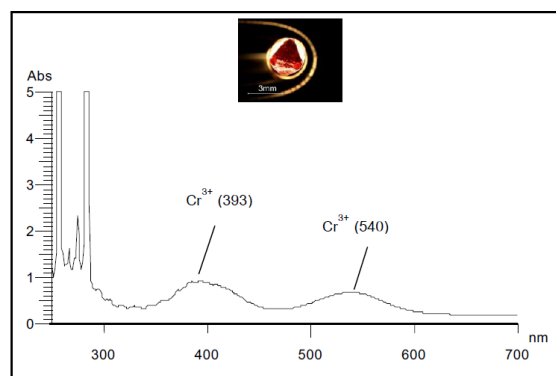
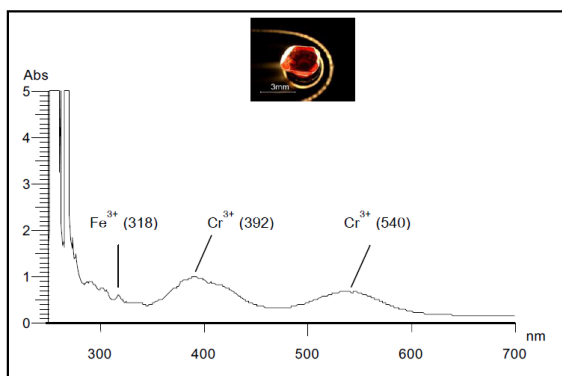
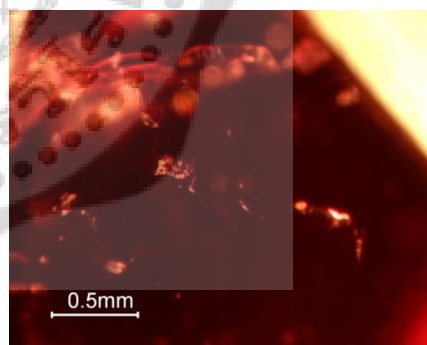
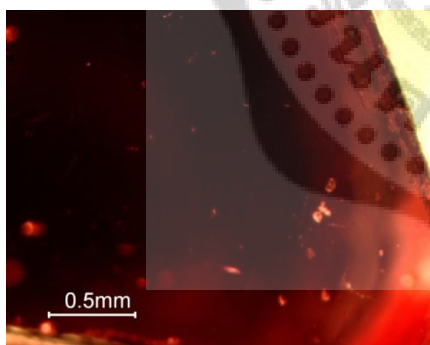
Color :

Hue : (RO) red-orange

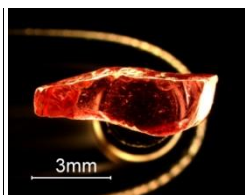
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : pR 1



Weight : 0.381 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.59

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle

Sample number : pR 2



Weight : 0.278 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

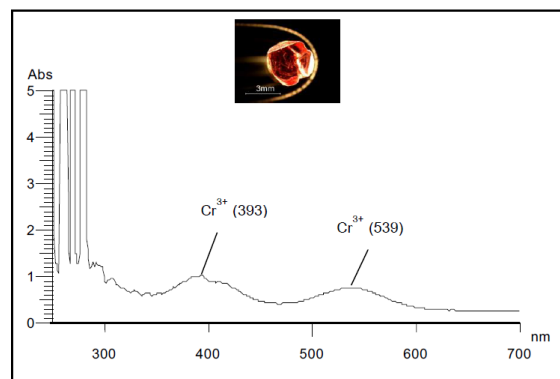
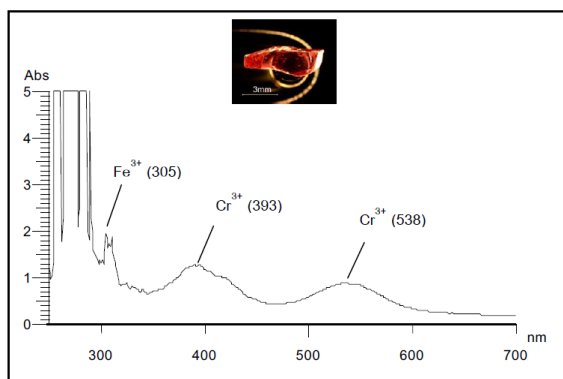
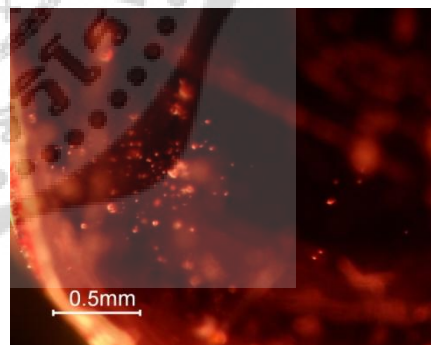
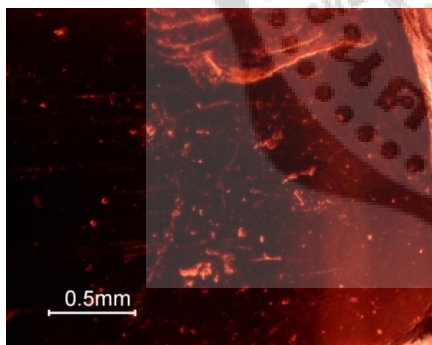
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

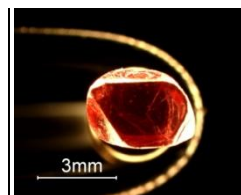
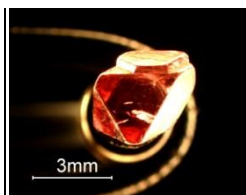
Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : pR 3

Sample number : pR 4



Weight : 0.306 ct

Weight : 0.269 ct

Refractive Index : 1.710

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.50

Specific Gravity : 3.64

Fluorescence :

Fluorescence :

LWUV : Strong red

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

SWUV : Inert

Color :

Color :

Hue : (RO) red-orange

Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

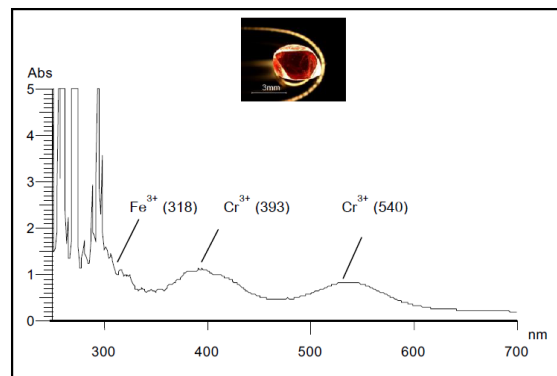
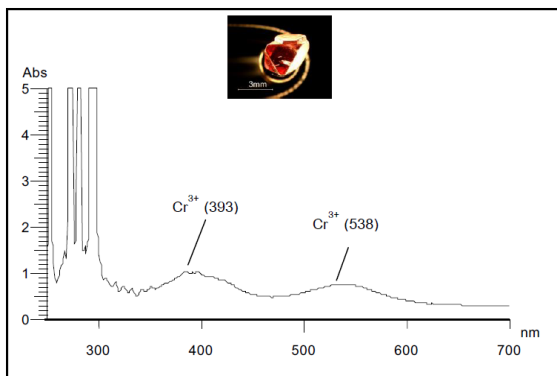
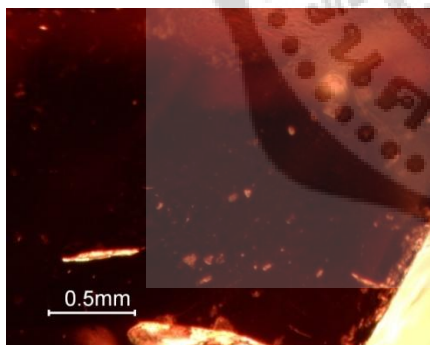
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

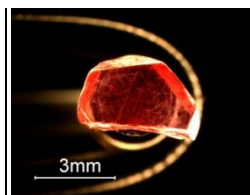
Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : pR 5



Weight : 0.197 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

Color :

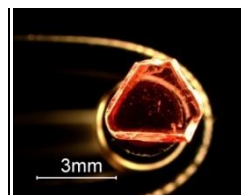
Hue : (RO) red-orange

Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal, needle-like inclusion

Sample number : pR 6



Weight : 0.178 ct

Refractive Index : 1.720

Specific Gravity : 3.71

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

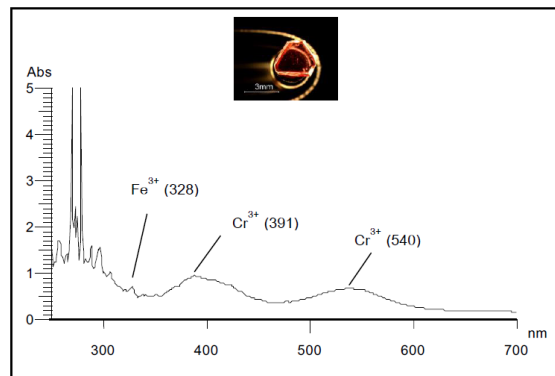
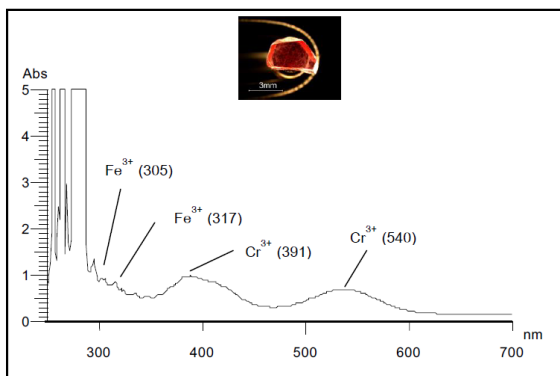
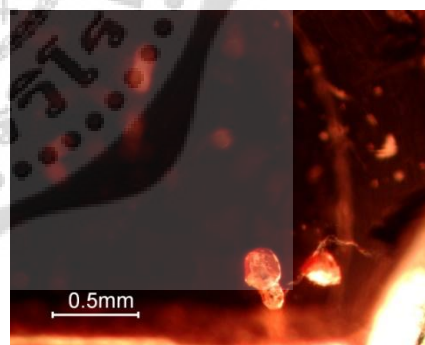
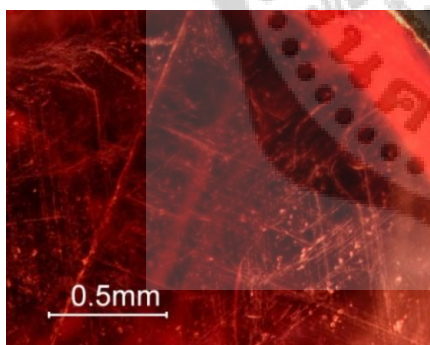
Color :

Hue : (RO) red-orange

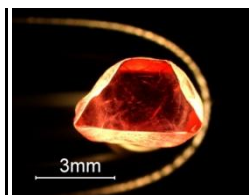
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : crystal



Sample number : pR 7



Weight : 0.277 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.64

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

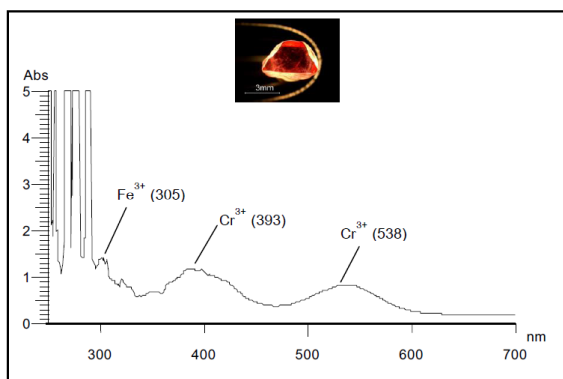
Color :

Hue : (RO) red-orange

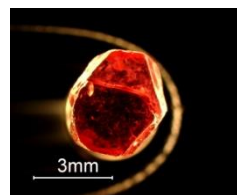
Tone : (4) Medium light

Saturation : (5) strong

Inclusion : cloud, needle-like inclusion



Sample number : R 1



Weight : 0.229 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.58

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

Color :

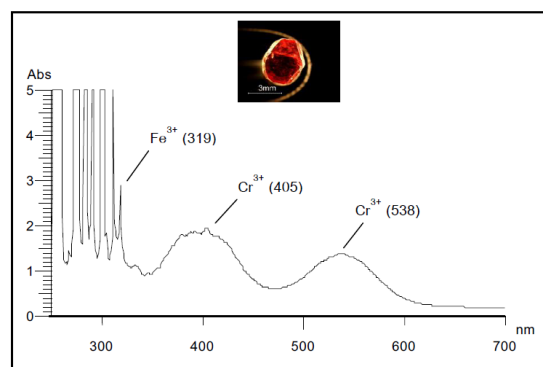
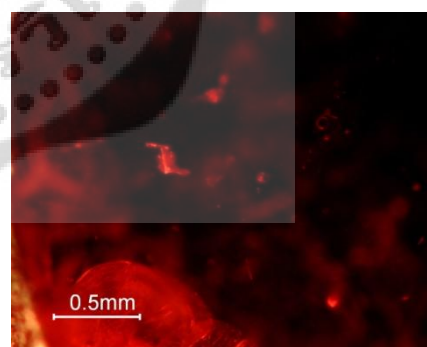
Hue : (RO) red-orange

Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish

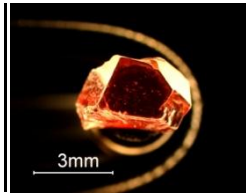
(brownish)

Inclusion : cloud, crystal, fracture





Sample number : R 2



Weight : 0.332 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

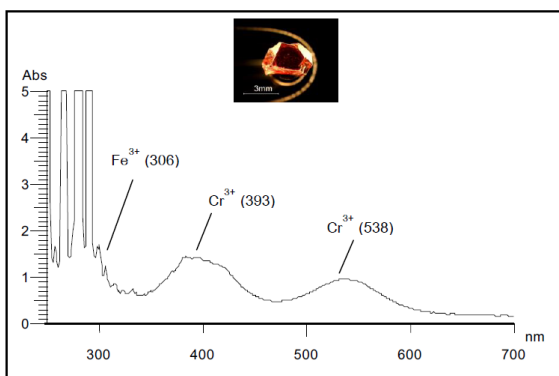
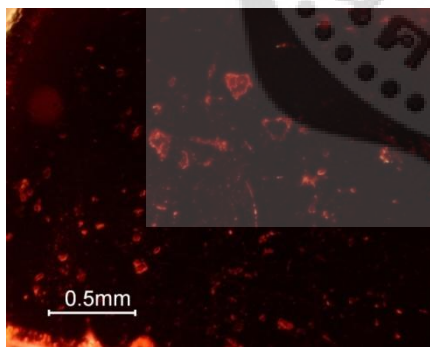
Color :

Hue : (RO) red-orange

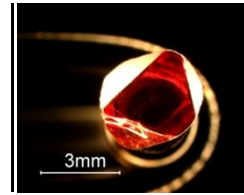
Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : R 3



Weight : 0.378 ct

Refractive Index : 1.715

Specific Gravity : 3.63

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

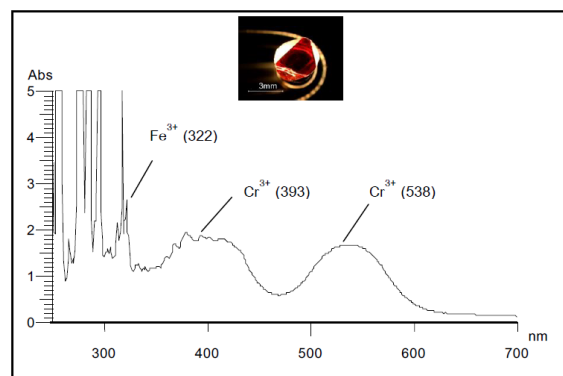
Color :

Hue : (RO) red-orange

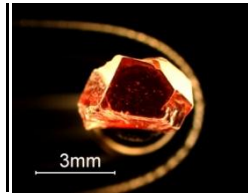
Tone : (7) Dark

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : R 4



Weight : 0.219 ct

Refractive Index : 1.705

Specific Gravity : 3.59

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

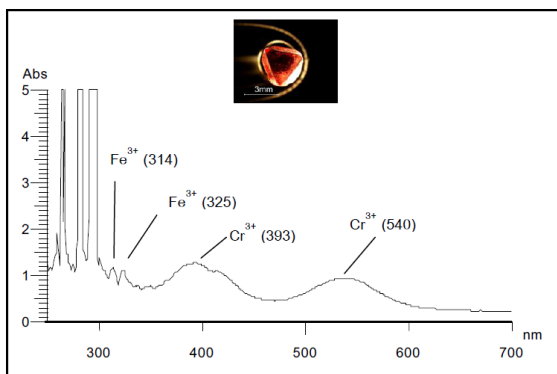
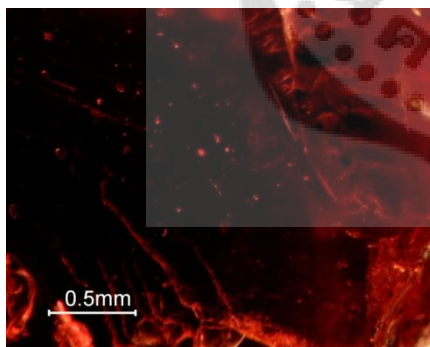
Color :

Hue : (RO) red-orange

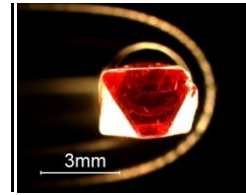
Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : crystal, healed fracture



Sample number : R 5



Weight : 0.310 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.65

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

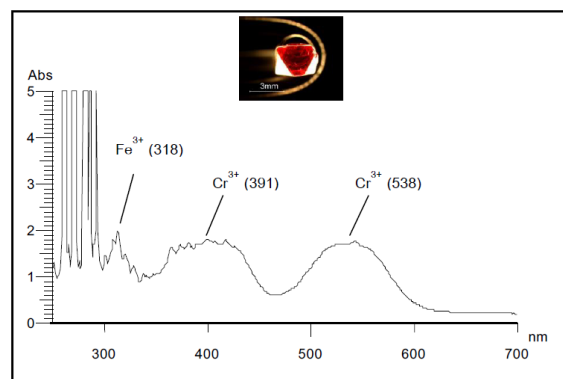
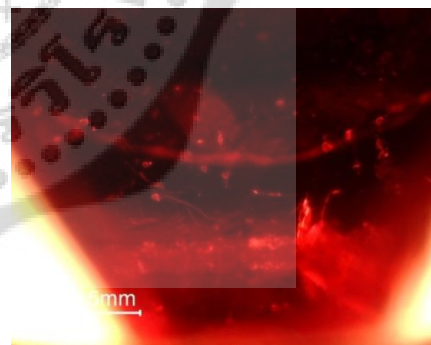
Color :

Hue : (RO) red-orange

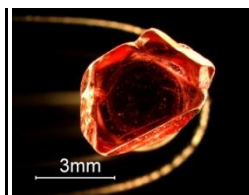
Tone : (7) Dark

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle



Sample number : R 6



Weight : 0.419 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.61

Fluorescence :

LWUV : Moderate red

SWUV : Inert

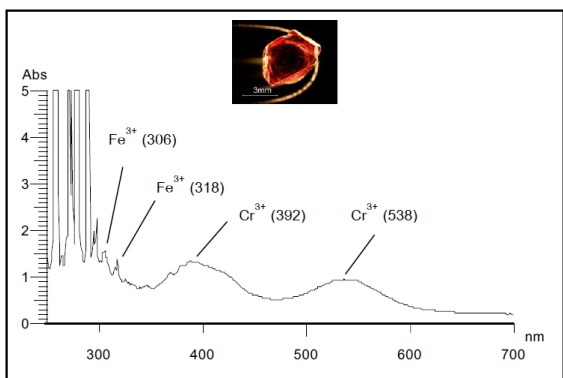
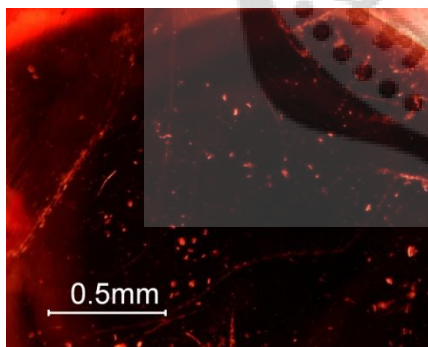
Color :

Hue : (RO) red-orange

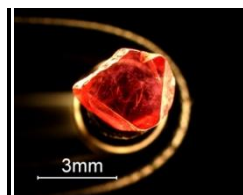
Tone : (6) Medium dark

Saturation : (3) very slightly grayish  
(brownish)

Inclusion : crystal, needle-like inclusion



Sample number : R 7



Weight : 0.310 ct

Refractive Index : 1.710

Specific Gravity : 3.65

Fluorescence :

LWUV : Strong red

SWUV : Inert

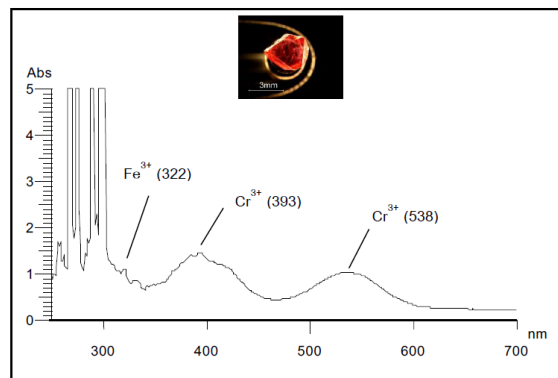
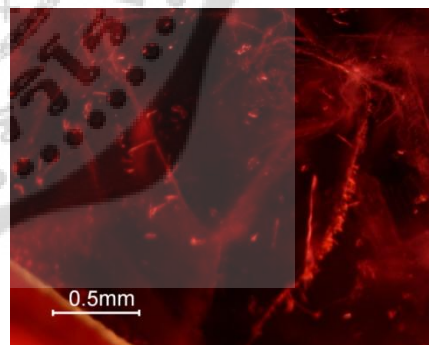
Color :

Hue : (RO) red-orange

Tone : (5) Medium

Saturation : (4) moderately strong

Inclusion : crystal, minute exsolved particle





ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล นางสาว นุชบากร ศรีสถาพร  
 วันเดือนปีเกิด วันที่ 8 ธันวาคม 2531  
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน 34/2 ซ.กรุงเทพฯ-นนทบุรี 44 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
 กรุงเทพมหานคร 10800

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาปีที่ 6

จาก โรงเรียนเฉลิมพระเกียรติสมเด็จพระศรีนครินทร์ กาญจนบุรี

พ.ศ. 2554 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาธรณีศาสตร์

จาก มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีภูมิณีและเครื่องประดับ

จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

