



การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีของอัญมณีตระกูลการ์เนต



โดย  
นางสาวณิชา ตองอ่อน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีของอัญมณีตระกูลการ์เนต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY ON PHYSICAL, OPTICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF  
GARNET GROUP GEMSTONE




A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (PHYSICS)  
Department of PHYSICS  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีของอัญ  
มณีตระกูลการ์เนต  
โดย นางสาวณิชา ตองอ่อน  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติยาพร สิงห์สัมพันธ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย (ผู้รักษาการแทน)  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาธิต นิรติศัย)  
พิจารณาเห็นชอบโดย ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติยาพร สิงห์สัมพันธ์)  
ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี เอี่ยมพนากิจ)  
ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิยะพงษ์ อะสะนะนิจิ)



60306206 : พิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

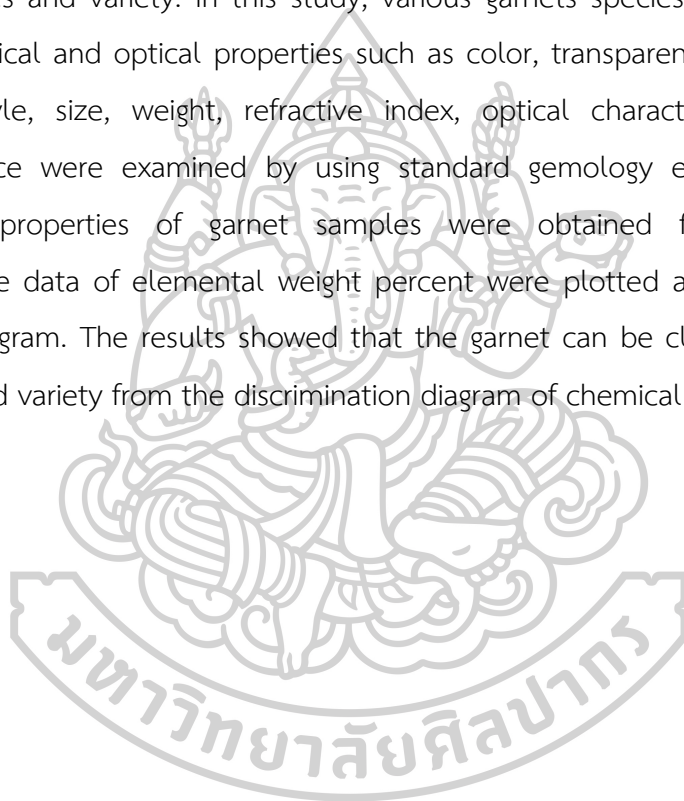
นางสาว ณิชชา ตองอ่อน: การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีของอัญมณีตระกูลการ์เนต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติยาพร สิงห์สัมพันธ์



60306206 : Major (PHYSICS)

MISS NICHIA TONGON : STUDY ON PHYSICAL, OPTICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF GARNET GROUP GEMSTONE THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR KITTIYAPORN SINGSUMPHAN, Ph.D.

This research aims to study the quantitative elemental analysis of the garnet group gemstones by using scanning electron microscope with energy dispersive spectroscopy (SEM/EDX). The elemental weight percent was used to classify garnets into species and variety. In this study, various garnets species of 25 samples were used. Physical and optical properties such as color, transparency, luster, shape and cutting style, size, weight, refractive index, optical character, absorbance, and fluorescence were examined by using standard gemology equipment. Then the chemical properties of garnet samples were obtained from SEM/EDX. The quantitative data of elemental weight percent were plotted as proportions on the ternary diagram. The results showed that the garnet can be classified into different species and variety from the discrimination diagram of chemical composition.



## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง “การศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีของอัญมณีตระกูล การ์เนต (Study on Physical, Optical and Chemical Properties Of Garnet Group Gemstone)” สามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จและลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากรับการอนุเคราะห์และการสนับสนุนเป็นอย่างดี จากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.กิตติยาพร สิงห์สัมพันธ์ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาในการทำงานวิจัย รวมถึง อุปถัมภ์ในการตรวจสอบในครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้อนุญาตในการใช้เครื่องมือตรวจสอบ รวมถึงสถานที่ในการตรวจสอบ เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์อย่างสำหรับผู้ที่มีความสนใจ เกี่ยวข้องกับเนื้องานวิจัยนี้ต่อไป

นางสาว ณิชา ตองอ่อน



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
1.4ขอบเขตของการวิจัย .....	3
1.5นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
1.6กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
บทที่ 2 .....	5
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1อัญมณี.....	5
2.2การจำแนกอัญมณี .....	6
2.3คาร์เนต .....	7
2.4เครื่องมือมาตรฐานในการตรวจวิเคราะห์อัญมณี .....	11
2.4.1 อุปกรณ์ทดสอบความแข็ง .....	11



2.4.2 รีเฟรกโตมิเตอร์ .....	12
2.4.3 โพลาริสโคป.....	16
2.4.4 สเปกโตรสโคป .....	18
2.4.5 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี.....	20
2.5 เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์อัญมณี.....	22
2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน .....	22
2.5.2 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
บทที่ 3 .....	30
วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 ตัวอย่าง อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.2 วิธีการทดลอง .....	31
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากวิธีการทดลองในข้อ 5.....	32
บทที่ 4 .....	33
ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย .....	33
บทที่ 5 .....	74
อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	74
สรุปผล.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง .....	75
ประวัติผู้เขียน .....	78

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การจำแนกของอัญมณีทั้งหมดตามตระกูลต่าง ๆ ที่แบ่งตามหลักวิชาอัญมณี .....	6
ตารางที่ 2 ค่าความแข็งของลำดับชนิดแร่และอัญมณี .....	11
ตารางที่ 3 ค่าดัชนีหักเห (RI) ของอัญมณีต่าง ๆ .....	15
ตารางที่ 4 รูปแบบผลการตรวจสอบด้วยเครื่องโพลาไรสโคป .....	17
ตารางที่ 5 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Pyrope .....	34
ตารางที่ 6 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Almandine .....	35
ตารางที่ 7 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Spessatine .....	36
ตารางที่ 8 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Hessonite .....	37
ตารางที่ 9 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Tsavorite .....	38
ตารางที่ 10 ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างการ์เนต .....	39
ตารางที่ 11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างการ์เนต .....	40
ตารางที่ 12 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างไพโรป .....	45
ตารางที่ 13 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแอลมันดีน .....	45
ตารางที่ 14 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างสเปสซาร์ทีน .....	46
ตารางที่ 15 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเฮสไซไนต์ .....	46
ตารางที่ 16 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซาโวไรต์ .....	47
ตารางที่ 17 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไพโรปตัวที่ 1 (PY1) .....	49
ตารางที่ 18 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไพโรปตัวที่ 2 (PY2) .....	50
ตารางที่ 19 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไพโรปตัวที่ 3 (PY3) .....	51
ตารางที่ 20 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไพโรปตัวที่ 4 (PY4) .....	52



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	4
ภาพที่ 2 โครงสร้างผลึกระบบ Cubic ในตระกูลการ์เนต.....	7
ภาพที่ 3 การ์เนตหลากสีในตระกูลการ์เนต [6].....	7
ภาพที่ 4 แผนผังการจำแนกชนิดของการ์เนต.....	8
ภาพที่ 5 Pyrope.....	8
ภาพที่ 6 Almandine.....	9
ภาพที่ 7 Spessatine.....	9
ภาพที่ 8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) almandine garnet (Fe spectrum) และ (ข) spessatine garnet (Mn spectrum).....	9
ภาพที่ 9 (ก) Hessonite (ข) Tsavorite และ (ค) Demantoid.....	10
ภาพที่ 10 (ก) การหักเหของแสงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก (ข) การหักเหของแสงผ่านอัญมณี และ (ค) การเกิดการสะท้อนกลับหมดในอัญมณี [16].....	12
ภาพที่ 11 (ก) เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (ข) แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ [6, 16].....	13
สเกลที่ปรากฏจากการตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของอัญมณีแบ่งได้ 3 แบบ ดังภาพที่ 12 จากภาพที่ 13 (ก) มีขอบเงาเพียงขอบเดียว แสดงว่าเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยว (single refraction, SR) คือมีค่าดัชนีหักเหค่าเดียว หากมีขอบเงา 2 เส้นดังภาพที่ 14 (ข) แสดงว่าเป็นอัญมณีหักเหสองแนว (double refraction, DR) คือมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า ซึ่งค่าผลต่างระหว่างสองค่านี้เรียกว่า ค่าแสงหักเหสองแนว หรือไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) หากพบว่าสเกลมีดังภาพที่ 15 (ค) แสดงว่าอัญมณีนั้นมีค่าดัชนีหักเหสูงเกินค่าของสเกล ตารางที่ 3 แสดงค่าดัชนีหักเหของอัญมณีประเภทต่าง ๆ รวมถึงค่าไบรีฟริงเจนซ์สำหรับอัญมณีหักเหสองแนวด้วย.....	14
ภาพที่ 16 สเกลที่อ่านได้จากเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ของอัญมณีแบบ (ก) หักเหเดี่ยว (ข) หักเหสองแนว และ (ค) มีค่าดัชนีหักเหสูงเกินสเกล [12].....	14

ภาพที่ 17 เครื่องโพลาไรสโคป [18] .....	16
ภาพที่ 18 ภาพการแทรกสอดของอัญมณีหักเหสองแนวแบบ (ก) แขนงแสงเดี่ยว (ข) ตาวัว (Bull's-eye) ในควอตซ์ และ (ค) แขนงแสงคู่.....	17
ภาพที่ 19 (ก) สเปกโตรสโคป และ (ข) สเปกตรัมของแสงขาวจากสเปกโตรสโคปแบบเกรตติง [14].	18
ภาพที่ 20 การใช้สเปกโตรสโคปแบบ (ก) แสงสะท้อน และ (ข) แบบแสงส่งผ่าน .....	18
ภาพที่ 21 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอัญมณี [6] .....	19
ภาพที่ 22 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี [8] .....	20
ภาพที่ 23 การส่องแสงของกล้องจุลทรรศน์อัญมณีแบบ (ก) ไบรท์ฟิลด์ (ข) ดาร์กฟิลด์ และ (ค) ด้านบน.....	21
ภาพที่ 24 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM [21].....	22
ภาพที่ 25 หลักการทำงานของเครื่อง EDX [5] .....	23
ภาพที่ 26 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของ (ก) ทับทิม และ (ข) ไพรีนจากประเทศแหล่งกำเนิดต่าง ๆ.....	25
ภาพที่ 27 การพล็อตส่วนประกอบหลัก (Ca/Mg) ของการ์เนต.....	26
ภาพที่ 28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm ของตัวอย่างทัวร์มาลีนก่อนฉายรังสี (เส้นทึบ) หลังฉายรังสี (เส้นประ) และหลังการเผา (เส้นจุด) (ก) ตัวอย่างหมายเลข 3 (สีชมพูเข้ม) (ข) หมายเลข 12 (สีน้ำตาลเข้ม) (ค) หมายเลข 6 (ไม่มีสี) และ (ง) หมายเลข 9 (สีเขียว).....	27
ภาพที่ 29 (ก) แผนภาพไตรภาคขององค์ประกอบทางเคมีของการ์เนตจาก Arikamedy และ Garibpet (ข) ส่วนขยายรายละเอียดบริเวณสีเทา .....	28
ภาพที่ 30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของการ์เนตชนิด grossular แบบ color-change (เส้นสีน้ำเงินและดำ) การ์เนตชนิด tsavorite (สีเขียว) และการ์เนตชนิด pyrope-spessartite แบบ color-change (เส้นสีแดง) .....	29
ภาพที่ 31 การจัดเก็บอัญมณีที่ใช้ในการตรวจสอบ .....	33
ภาพที่ 32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Pyrope .....	41
ภาพที่ 33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Almandine .....	42
ภาพที่ 34 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Spessatien .....	42

ภาพที่ 35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Henssonite .....	43
ภาพที่ 36 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Tsavorite.....	43
ภาพที่ 37 ก แผนภาพไตรภาคขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างการ์เน็ต , ข แผนภาพไตรภาค ขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างไฟโรป แอลมันดีน และสเปสซาร์ทิน .....	48



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากอดีตจนถึงปัจจุบัน อัญมณี (gems) ถือว่ามีความสำคัญและอยู่กับมนุษย์อย่างเรา มาตลอด อัญมณีที่ถูกค้นพบนั้นมีมากมายหลากหลายตระกูล (group) ในแต่ละตระกูลก็จะถูกแยก ออกเป็นประเภท (species) จากประเภทแยกออกเป็นชนิด (variety) ซึ่งในแต่ละตระกูลจะมีลักษณะ ที่แตกต่างกันออกไป ในปัจจุบันอัญมณียังคงเป็นที่ต้องการและมีมูลค่าที่สูงขึ้น ตระกูลอัญมณีที่เป็นที่ นิยม ได้แก่ เพชร (diamond) คอร์รันดัม (corundum) เบริล (beryl) สปิเนล (spinel) การ์เนตหรือ โกเมน (garnet) และควอตซ์ (quartz) เป็นต้น อัญมณีธรรมชาติ (natural gemstone) ถูกขุดขึ้นไป จำหน่ายเป็นจำนวนมากจนทำให้อัญมณีเหล่านั้นมีจำนวนลดน้อยลง ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้มนุษย์ คิดค้นหาวิธีที่จะทำหรือสร้างอัญมณีขึ้นมาโดยเรียกอัญมณีที่มนุษย์สร้างขึ้นมาว่า อัญมณีสังเคราะห์ (synthetic gemstone) ซึ่งมีองค์ประกอบรวมถึงคุณสมบัติที่เหมือนหรือคล้ายกับของจริงตาม ธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีอัญมณีเลียนแบบ (simulant หรือ imitation) ซึ่งทำให้มีลักษณะภายนอก ดูเหมือนกับอัญมณีของจริงไม่ว่าอัญมณีนั้นจะเกิดจากการสังเคราะห์หรือธรรมชาติก็ตาม โดยอัญมณี เลียนแบบอาจเป็นอัญมณีเลียนแบบที่เป็นอัญมณีธรรมชาติ เช่น การเลียนแบบเพชรโดยใช้เพทาย (zircon) และอัญมณีเลียนแบบที่เป็นอัญมณีปลอม ซึ่งโดยส่วนมากมักเป็นกระจกสี (artificial glass หรือ paste)

สิ่งสำคัญที่จะแยกอัญมณีเหล่านั้นออกเป็นอัญมณีของจริงหรือของปลอมนั้นจึงต้องอาศัย คุณสมบัติต่าง ๆ รวมถึงลักษณะภายนอกและภายในของอัญมณี ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษา คุณสมบัติของอัญมณีเพื่อที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ และจำแนกอัญมณีได้ โดยสมบัติ ต่าง ๆ ของอัญมณีแบ่งเป็นสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางเคมี อันประกอบด้วยสี ความโปร่งใส ความเงาวาว รูปร่างและการเจียรไน ความแข็ง ขนาด น้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ ค่า ดรรชนีหักเห ภาพทางแสง การดูดกลืนแสง การเรืองแสง และองค์ประกอบทางเคมี

สินค้าอัญมณีและเครื่องประดับนั้นเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากเป็น ทั้งแหล่งอัญมณี และมีช่างเจียรไนที่มีฝีมือ โดยมูลค่าการส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับ ทั้งหมดระหว่างเดือนมกราคม-สิงหาคม 2562 เป็น 11,454.50 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ [1] ซึ่งเป็นเพชร

มูลค่า 1,028.48 ล้านบาทหรือสหรัฐอเมริกา และพลอย มูลค่า 932.48 ล้านบาทหรือสหรัฐอเมริกา ในตลาดอัญมณีของประเทศไทยแบ่งอัญมณีออกเป็นพลอยเนื้อแข็งและพลอยเนื้ออ่อน ทั้งนี้ในปี พ.ศ. 2562 มูลค่าการส่งออกพลอยเนื้อแข็งเจียรไนเป็น 886.73 ล้านบาทหรือสหรัฐอเมริกา และมูลค่าการส่งออกพลอยเนื้ออ่อนเจียรไนเป็น 392.28 ล้านบาทหรือสหรัฐอเมริกา สำหรับมูลค่าการส่งออกพลอยเนื้ออ่อนนั้นมีส่วนเพิ่มขึ้นทุกปี [20]

ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาอัญมณีตระกูลการ์เนตหรือโกเมน ซึ่งเป็นอัญมณีที่สามารถพบได้ในหลายจังหวัดของประเทศไทย เช่น จันทบุรี ตราด เชียงใหม่ เชียงราย เป็นต้น [2] การ์เนตจัดเป็นพลอยเนื้ออ่อน โดยเป็นหนึ่งในพลอยนพเก้าซึ่งเป็นอัญมณีมงคลตามความเชื่อของไทย ดังนั้นจึงเป็นอัญมณีที่นิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ อัญมณีตระกูลการ์เนตประกอบด้วยการ์เนตหลายชนิด ซึ่งมีทั้งสีแดงเข้ม แดงอมชมพู น้ำตาล ส้ม เหลือง และเขียว [3] ซึ่งสีแดงเป็นสีที่นิยมและพบเห็นได้บ่อยที่สุด นอกจากนี้การ์เนตบางเม็ดอาจมีสีแดงที่คล้ายทับทิม (ruby) มาก และถูกนำมาปลอมขายเป็นทับทิม [19] ดังนั้นการศึกษาคูสมบัติของการ์เนตชนิดต่าง ๆ ด้วยเครื่องมือมาตรฐานสำหรับตรวจสอบอัญมณี และการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงและองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงเพื่อนำมาซึ่งชุดข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติต่าง ๆ กับการจำแนกชนิดของการ์เนตจึงมีความน่าสนใจ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางแสงของการ์เนตด้วยเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบอัญมณี
2. ศึกษาสมบัติทางเคมีด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงเพื่อวิเคราะห์ชนิดของการ์เนต
3. ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีตามการจำแนกชนิดของการ์เนต

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานสำหรับจำแนกการ์เนตชนิดต่าง ๆ ที่จำหน่ายในท้องตลาด
2. ได้ข้อมูลการศึกษาเชิงลึกของสมบัติต่าง ๆ ของการ์เนตต่างชนิด
3. สามารถตีพิมพ์เผยแพร่ผลการวิจัยและนำไปใช้ในการตรวจวิเคราะห์อัญมณีตระกูลการ์เนตต่อไป





### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

สมบัติทางกายภาพ หมายถึง ขนาด น้ำหนัก สี อินคลูชันภายนอก และอินคลูชันภายใน

สมบัติทางแสง หมายถึง ค่าดัชนีหักเห ภาพทางแสง และสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

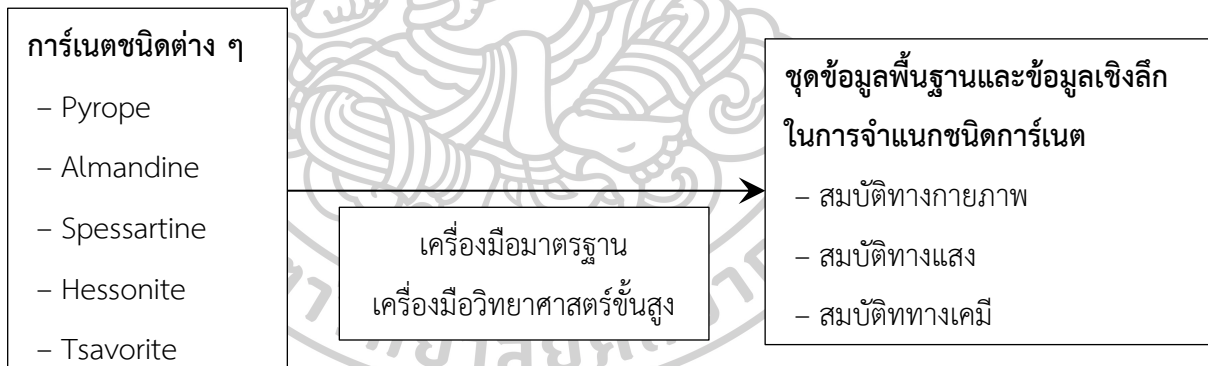
สมบัติทางเคมี หมายถึง องค์ประกอบทางเคมี

เครื่องมือมาตรฐาน หมายถึง รีแฟรกโตมิเตอร์ โพลาริสโคป สเปกโทรสโคป และกล้องจุลทรรศน์อัญมณี

เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง หมายถึง เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ด้วยลำแสงระดับไมโครเมตร และเทคนิคการดูดกลืนรังสีเอกซ์

### 1.6 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ข้อมูลพื้นฐานและข้อมูลเชิงลึกของการ์เน็ตประกอบด้วยคุณสมบัติ 3 ด้าน โดยสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางเคมีนั้นเกี่ยวข้องกับชนิดของการ์เน็ต ซึ่งจะทำให้สามารถจำแนกการ์เน็ตชนิดต่าง ๆ ออกจากกันได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สรุปได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของอัญมณีตระกูลการ์เนตด้วยเครื่องมือมาตรฐานและเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง ในบทนี้จึงกล่าวถึงความหมายของอัญมณี การจำแนกอัญมณี อัญมณีตระกูลการ์เนต ชนิดของการ์เนต หลักการทำงานของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในศึกษาเพื่อตรวจสอบ วิเคราะห์ และระบุชนิดของอัญมณี รวมทั้งบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อัญมณี

อัญมณี (gems) หมายถึงวัสดุที่พบเจอในธรรมชาติมีความสวยงาม มีสีล้วนหรือไม่มีสีก็ได้ อาจเป็นจำพวกแร่หรือหิน หรือเป็นวัสดุที่ได้จากสิ่งมีชีวิต โดยมีการนำมาเจียรระไน ชัด ตัด ตกแต่งให้มีความสวยงามมากขึ้น โดยนำเอาอัญมณีมาทำเป็นเครื่องประดับตกแต่ง เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับอัญมณี เช่น นำเพชรมาทำเป็นแหวน นำพลอยมาประดับเป็นสร้อยคอ เป็นต้น โดยอัญมณีมีคุณลักษณะดังนี้

1. ความสวยงาม (beauty) ถือเป็นคุณสมบัติสำคัญของอัญมณีที่จะต้อง มี และเป็นสิ่งที่ใช้ในการพิจารณาคุณค่า มูลค่าของอัญมณี ซึ่งประกอบด้วย การเจียรระไน สี ความโปร่งใส ความเงาวาว (luster) และปรากฏการณ์ทางแสง (optical effect)
2. ความคงทน (durability) เป็นคุณสมบัติที่ทำให้อัญมณีมีความทนทานต่อการใช้งาน ไม่เสื่อมสภาพ โดยจากความแข็ง (hardness) ซึ่งเป็นความสามารถของวัสดุที่ต้านรอยขีดข่วน (scratching) และรอยถลอก (cleavage)
3. ความหายาก (rarity) เป็นคุณสมบัติที่ไว้ใช้ในการพิจารณามูลค่า หากอัญมณีชนิดนั้นมีอยู่น้อย หรือสามารถค้นหาได้ยาก มูลค่าก็จะยิ่งสูง
4. ความพึงปรารถนา (desirability) เป็นคุณสมบัติที่ใช้บ่งบอกว่าอัญมณีชนิดใดบ้างที่คนนิยมใช้ หรือซื้อขายมากที่สุด

## 2.2 การจำแนกอัญมณี

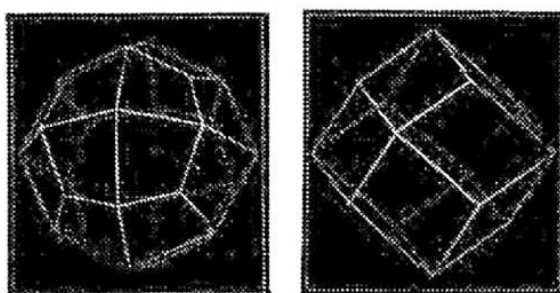
การจำแนกประเภทของอัญมณีนั้นสามารถจำแนกได้หลากหลายแบบ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการจำแนก โดยในงานวิจัยนี้นำเสนอการจำแนกตามหลักวิชาอัญมณี นั่นคือการพิจารณาจากส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งแบ่งออกเป็นอัญมณีอนินทรีย์ (inorganic) และอินทรีย์ (organic) โดยระบุเป็นจำพวกใหญ่เรียกว่าตระกูล (group) มีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การจำแนกของอัญมณีทั้งหมดตามตระกูลต่าง ๆ ที่แบ่งตามหลักวิชาอัญมณี

การจำแนกอัญมณี	
อัญมณีอนินทรีย์	อัญมณีอินทรีย์
เพชร (diamond)	มุก (pearl)
คอร์ันดัม (corundum)	อำพัน (amber)
เบริล (beryl)	ปะการัง (coral)
คริโซเบริล (chrysoberyl)	งาช้าง (ivory)
โอปอ (opal)	เปลือกหอย (shell)
หยก (jadeite)	กระดองเต่า (tortoise shell)
ซอยไซต์ (zoisite)	เจท (jet)
สปิเนล (spinel)	
ทัวร์มาลีน (tourmaline)	
โทแพซ (topaz)	
การ์เนต (garnet)	
เพอริโด (peridot)	
เซอร์คอน (zircon)	
เฟลสปาร์ (feldspar)	
ควอตซ์ (quartz)	
คาลซิโดนี (chalcedony)	
ลาพิสลาซูลี (lapis lazuli)	
มาลาไคท์ (malachite)	
เทอร์คอยซ์ (turquoise)	
ออบซิเดียน (obsidian)	

## 2.3 การ์เนต

ตระกูลการ์เนต (garnet group) ประกอบด้วยการ์เนตหลายประเภท (species) ซึ่งแสดงสมบัติทางกายภาพและรูปร่างผลึก (crystal form) คล้ายกัน แต่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน การ์เนตมีหลายสี ได้แก่ แดง ส้ม เหลือง เขียว ม่วง ชมพู น้ำตาล ดำ และไม่มีสี ดังตัวอย่างในภาพที่ 3 แต่ส่วนใหญ่มีสีแกมแดง (reddish) โดยมีทั้งโปร่งแสง โปร่งใส และทึบแสง โครงสร้างผลึกของการ์เนตอยู่ในระบบลูกบาศก์ (cubic system) ประเภทของการ์เนตนั้นมีมากกว่า 20 ประเภท แต่มีเพียงไม่กี่ประเภทเท่านั้นที่มีความสำคัญทางการค้าในรูปแบบของอัญมณี [10]



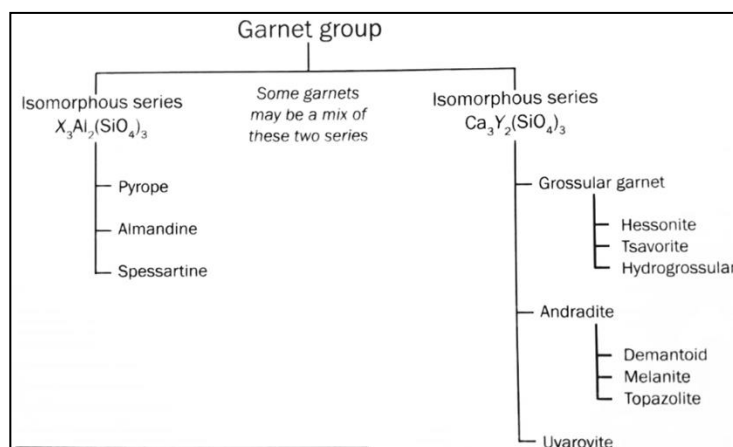
ภาพที่ 2 โครงสร้างผลึกระบบ Cubic ในตระกูลการ์เนต



ภาพที่ 3 การ์เนตหลากสีในตระกูลการ์เนต [6]

ตระกูลการ์เนตมีค่าดัชนีหักเหอยู่ระหว่าง 1.70 – 1.89 ซึ่งเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยวและมีลักษณะทางแสงเป็นแบบไอโซโทรปิก (isotropic) โดยตระกูลการ์เนตแบ่งออกเป็น 2 ชุด แสดงเป็นแผนผังได้ ภาพที่ 4 ซึ่งแต่ละชุดมีลักษณะเป็นแบบไอโซมอร์ฟัส (isomorphous series) กล่าวคือการ์เนตที่อยู่ในชุดเดียวกันจะมีสูตรทางเคมีคล้ายกัน

[6] โดยชุดแรกเป็น  $X_3Al_2(SiO_4)_3$  มีการ์เนต 3 ชนิด ได้แก่ pyrope, almandine และ spessartine และอีกชุดเป็น  $Ca_3Y_2(SiO_4)_3$  มีการ์เนต 6 ชนิด ได้แก่ hessonite, tsavorite, hydrogrossular, demantoid, melanite, topazolite และ uvarovite



ภาพที่ 4 แผนผังการจำแนกชนิดของการ์เนต

สูตรทางเคมีของการ์เนตแต่ละชนิด [8] ในชุด  $X_3Al_2(SiO_4)_3$  เช่น pyrope -  $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ , almandine -  $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$  และ spessartine -  $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$  ซึ่งจะสังเกตเห็นว่า X เป็นธาตุต่างชนิดกัน สำหรับสูตรเคมีของการ์เนตในชุด  $Ca_3Y_2(SiO_4)_3$  เช่น grossular -  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ , และ andradite -  $Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$  นอกจากนี้ยังมีการ์เนตบางชนิดที่เกิดจากการรวมกันของการ์เนตมากกว่า 1 ชนิด เช่น rhodolite มีสูตรทางเคมีเป็น  $(Mg, Fe)_3Al_2(SiO_4)_3$  ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นการผสมกันระหว่าง pyrope กับ almandine นั้นเอง

การ์เนตแต่ละชนิด จะมีสี ค่าดรรชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะ และสมบัติบางอย่างแตกต่างกันไป [6, 9] โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Pyrope มีสีแดงถึงแดงแกมม่วง ค่าดรรชนีหักเห 1.72 – 1.76 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.7 – 3.8 อินคลูชัน ได้แก่ ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals) แต่มักไม่ค่อยพบอินคลูชัน มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสงเหมือนกับ almandine



ภาพที่ 5 Pyrope

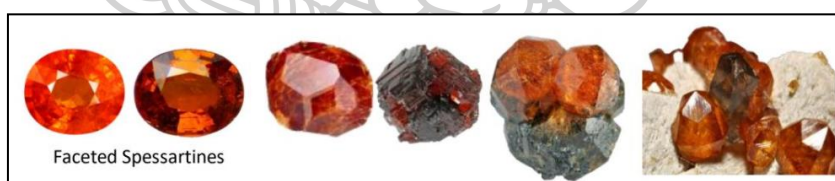
Rhodolite มีสีแดงแกมม่วงอ่อน ค่าดัชนีหักเห 1.75 – 1.78 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.8 - 3.95 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงแบบ almandine

Almandine มีสีแดงแกมน้ำตาลถึงแดงแกมม่วง ค่าดัชนีหักเห 1.76 – 1.81 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.8 – 4.2 เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องโพลาไรสโคป จะแสดงปรากฏการณ์ผิดปกติ (anomalous extinction effect) อินคลูชัน ได้แก่ ผลึกรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (irregular crystal inclusions) ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals) ของรูไทล์ (rutile) และรอย stress crack (zircon haloes) สเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังภาพที่ 8 (ก)

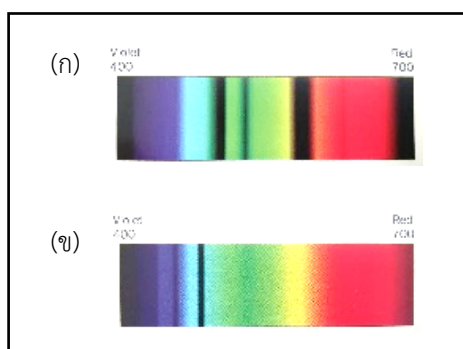


ภาพที่ 6 Almandine

Spessatine มีสีส้มแกมเหลือง และอาจมีสีแดงได้ ค่าดัชนีหักเห 1.79 – 1.82 และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 4.1 – 4.2 อินคลูชัน ได้แก่ wavy feathers และหยดของเหลว (liquid droplet) มีสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ดังภาพที่ 8(ข)



ภาพที่ 7 Spessatine



ภาพที่ 8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ (ก) almandine garnet (Fe spectrum) และ (ข) spessatine garnet (Mn spectrum)

Hessonite มีสีเหลืองแกมน้ำตาลจนถึงสีแดงแกมน้ำตาล และสีส้ม ค่าดัชนีหักเห 1.70 – 1.75 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.4 – 3.8 อินคลูชัน ได้แก่ granular appearance และ oily หรือ swirl internal effect

Tsavorite มีสีเขียวแกมน้ำเงินสว่างจนถึงสีเขียวแกมเหลือง ค่าดัชนีหักเห 1.73 – 1.75 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.4 – 3.8 อินคลูชัน ได้แก่ fibrous crystals และ feathers

Demantoid มีสีเขียวและสีเขียวเหลือง ค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.89 ค่าความถ่วงจำเพาะ 3.8 – 3.9 อินคลูชัน ได้แก่ radiating fibrous ที่มักเรียกว่า horsetail inclusions



ภาพที่ 9 (ก) Hessonite (ข) Tsavorite และ (ค) Demantoid





## 2.4 เครื่องมือมาตรฐานในการตรวจวิเคราะห์อัญมณี

### 2.4.1 อุปกรณ์ทดสอบความแข็ง

อุปกรณ์ทดสอบความแข็ง (hardness pencil) เป็นเครื่องมือทางอัญมณีที่นำมาใช้สำหรับการวัดความแข็งของอัญมณีแต่ละชนิด โดยแบ่งความแข็งตามสเกลโมห์ (Mohs's scale) ตั้งแต่ 1 จนถึง 10 ซึ่งอุปกรณ์ทดสอบความแข็งมีลักษณะคล้ายปากกาที่มีหัวเป็นชนิดแร่ ดังตารางที่ 2 ซึ่งวิธีการใช้งานคือใช้หัววัดขีดที่อัญมณีหรือแร่ที่ต้องการตรวจสอบความแข็ง โดยเริ่มจากความแข็งน้อยที่สุดก่อน หากอัญมณีไม่เป็นรอยแสดงว่ามีความแข็งมากกว่า จึงเปลี่ยนเป็นความแข็งที่มากขึ้น เมื่ออัญมณีเกิดรอยแสดงว่ามีความแข็งเท่ากับหัววัดนั้น

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งของลำดับชนิดแร่และอัญมณี

ความแข็ง	ชนิดแร่
1	ทัลก์ (talc)
2	ยิปซัม (gypsum)
3	แคลไซต์ (calcite)
4	ฟลูออไรต์ (fluorite)
5	อะพาไทต์ (apatite)
6	ออร์โทเคลส (orthoclase)
7	ควอตซ์ (quartz)
8	โทแพซ (topaz)
9	คอร์ันดัม (corundum)
10	เพชร (diamond)

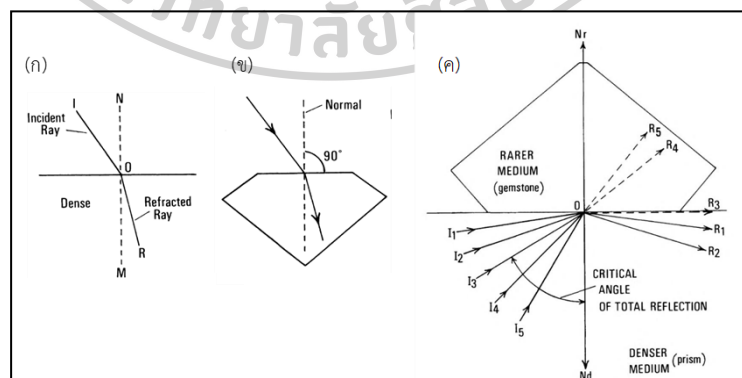
### 2.4.2 รีแฟรกโตมิเตอร์

รีแฟรกโตมิเตอร์ (refractometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติทางแสงของอัญมณี โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์จะแสดงผลเป็นค่าดัชนีหักเห (refractive index, RI) ของอัญมณีนั้น ค่าดัชนีหักเห  $n$  ของตัวกลางหนึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศต่ออัตราเร็วของแสงในตัวกลางนั้น ดังสมการ

$$n = \frac{c}{v}$$

การตรวจด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์นี้สามารถทำการตรวจสอบกับอัญมณีได้ทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นอัญมณีแบบทึบแสง โปร่งแสง และโปร่งใส หลักการทำงานของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์อาศัยกฎของสเนลล์ (Snell's law) และการสะท้อนกลับหมดของแสง (total internal reflection, TIR)

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลาง 2 ชนิด โดยแสงเดินทางทำมุมตกกระทบ  $\theta_1$  กับตัวกลางที่ 1 ซึ่งมีดัชนีหักเห  $n_1$  และเกิดการหักเหเป็นมุม  $\theta_2$  ในตัวกลางที่ 2 มีดัชนีหักเห  $n_2$  ภาพที่ 10(ก) หากตัวกลางที่ 2 เป็นอัญมณี จึงเกิดการหักเหของแสง ดังภาพที่ 10(ข) ในกรณีของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์นั้น อัญมณีที่ต้องการหาค่าดัชนีหักเหจะถูกนำมาวางไว้บนปริซึมของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ ภาพที่ 11(ก) เมื่อแสงเดินทางจากปริซึมเพื่อผ่านไปอัญมณี จึงทำให้เกิดทางเดินแสงดังภาพที่ 10(ค) โดยแสงที่ตกกระทบด้วยมุมที่น้อยกว่ามุมวิกฤต (critical angle) นั่นคือ  $I_4$  และ  $I_5$  แสงจะเกิดการหักเหในอัญมณี เมื่อแสงตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต แสงจะหักเหทำมุม  $90^\circ$  ซึ่งอยู่บริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั่นเอง สำหรับแสงที่ตกกระทบด้วยมุมที่มากกว่ามุมวิกฤต จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดตามรังสี  $R_1$  และ  $R_2$



ภาพที่ 10 (ก) การหักเหของแสงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก (ข) การหักเหของแสงผ่านอัญมณี และ (ค) การเกิดการสะท้อนกลับหมดในอัญมณี [16]

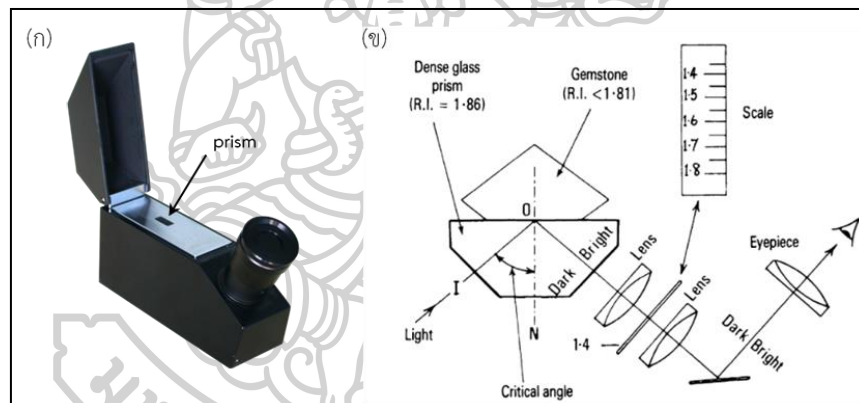
จากกฎของสเนลล์

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

กำหนดให้ตัวกลางที่ 1 คือปริซึม และตัวกลางที่ 2 คืออัญมณี เมื่อแสงตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤต ซึ่งจะทำให้เกิดการหักเหด้วยมุม  $90^\circ$  ดังนั้นค่าดัชนีหักเหของอัญมณีหาได้จาก

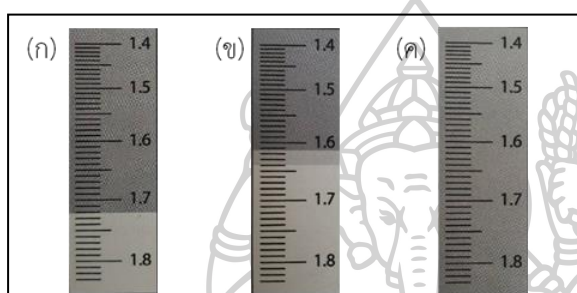
$$n_2 = n_1 \frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ}$$

ภาพที่ 11(ข) แสดงแผนภาพหลักการทำงานของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ จะเห็นว่าเมื่อแสงตกกระทบมากกว่ามุมวิกฤต ซึ่งทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด จึงเกิดเป็นแถบสว่างบนสเกล ในกรณีที่แสงตกกระทบเท่ากับมุมวิกฤตพอดี จึงไม่มีแสงเดินทางกลับเข้าไปในปริซึม ดังนั้นเมื่อมองจากเลนส์ใกล้ตา จึงเห็นเป็นขอบเงา (shadow edge) ซึ่งอยู่ ณ ตำแหน่งตัวเลขที่เป็นค่าดัชนีหักเหของอัญมณีนั่นเอง



ภาพที่ 11 (ก) เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ (ข) แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ [6, 16]

สเกลที่ปรากฏจากการตรวจสอบค่าดัชนีหักเหของอัญมณีแบ่งได้ 3 แบบ ดังภาพที่ 12 จากภาพที่ 13 (ก) มีขอบเงาเพียงขอบเดียว แสดงว่าเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยว (single refraction, SR) คือมีค่าดัชนีหักเหค่าเดียว หากมีขอบเงา 2 เส้นดังภาพที่ 14 (ข) แสดงว่าเป็นอัญมณีหักเหสองแนว (double refraction, DR) คือมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า ซึ่งค่าผลต่างระหว่างสองค่านี้เรียกว่า ค่าแสงหักเหสองแนว หรือไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) หากพบว่าสเกลมีดังภาพที่ 15 (ค) แสดงว่าอัญมณีนั้นมีค่าดัชนีหักเหสูงเกินค่าของสเกล ตารางที่ 3 แสดงค่าดัชนีหักเหของอัญมณีประเภทต่างๆ รวมถึงค่าไบรีฟริงเจนซ์สำหรับอัญมณีหักเหสองแนวด้วย



ภาพที่ 16 สเกลที่อ่านได้จากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ของอัญมณีแบบ (ก) หักเหเดี่ยว (ข) หักเหสองแนว และ (ค) มีค่าดัชนีหักเหสูงเกินสเกล [12]



ตารางที่ 3 ค่าดัชนีหักเห (RI) ของอัญมณีต่าง ๆ

Gem Species	Optical character	Usual range of RI	Typical birefringence
Opal	Isotropic	1.40 to 1.46	–
Fluorite	Isotropic	1.43 to 1.44	–
Paste (artificial glass) **	Isotropic	1.50 to 1.70	–
Feldspar	Biaxial	1.52 to 1.57	0.004 to 0.009
Chalcedony	(Polycrystalline)	1.53 to 1.55	–
Quartz	Uniaxial	1.54 to 1.56	0.009
Iolite	Biaxial	1.54 to 1.56	0.008 to 0.012
Beryl	Uniaxial	1.56 to 1.60	0.003 to 0.012
Topaz	Biaxial	1.61 to 1.64	0.008 to 0.010
Nephrite	(Polycrystalline)	Approximately 1.62	–
Tourmaline	Uniaxial	1.62 to 1.64	0.014 to 0.021
Peridot	Biaxial	1.65 to 1.69	0.036
Jadeite	(Polycrystalline)	Approximately 1.66	–
Tanzanite	Biaxial	1.69 to 1.70	0.006 to 0.013
Natural spinel	Isotropic	1.71 to 1.74	–
Verneuil synthetic spinel	Isotropic	1.72 to 1.73	–
Grossular garnet (hessonite)	Isotropic	1.73 to 1.75	–
Pyrope garnet	Isotropic	1.74 to 1.76	–
Almandine garnet *	Isotropic	1.76 to 1.81	–
Chrysoberyl	Biaxial	1.74 to 1.76	0.008 to 0.010
Corundum	Uniaxial	1.76 to 1.78	0.008 to 0.009
Zircon *	Uniaxial	1.78 to 1.99	0.059
Spessartine garnet *	Isotropic	1.80 to 1.82	–
Andradite garnet (demantoid) *	Isotropic	1.89	–
Diamond *	Isotropic	2.42	–

\* ค่า RI สูงกว่าน้ำยา RI (ปกติ 1.79 และ 1.81)

\*\* ค่า RI ของแก้ว (glass) มีค่าได้หลากหลาย

### 2.4.3 โพลาริสโคป

โพลาริสโคป (Polariscope) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณลักษณะทางแสง (optical character) และภาพการแทรกสอด (interference figure) รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะเครื่องโพลาริสโคป ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโพลาริซ (polarizing filter) 2 แผ่น คือแผ่นอนาไลเซอร์ (analyzer) และแผ่นโพลาริเซอร์ (polarizer) อัญมณีที่นำมาทดสอบต้องมีความโปร่งแสงหรือโปร่งใสเท่านั้น ไม่สามารถใช้กับวัตถุทึบแสงได้ โดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบด้วยเทคนิคนี้เพื่อนำมากำหนดลักษณะเฉพาะทางแสงของอัญมณี (optical characteristics) ซึ่งแบ่งออกเป็นชนิดหักเหเดี่ยว (SR) หักเหสองแนว (DR) หรือชนิดที่เป็นผลึกกลุ่ม (Polycrystalline หรือ Aggregates, AGG) นอกจากนี้การวัดด้วยวิธีการนี้ยังสามารถจำแนกอัญมณีชนิดหักเหสองแนวตามชนิดแกนทางแสงได้เป็นชนิดแกนแสงเดี่ยว (uniaxial) และชนิดแกนแสงคู่ (biaxial)







ภาพที่ 17 เครื่องโพลาริสโคป [18]

วิธีการทดสอบสามารถทำได้โดยนำอัญมณีมาวางไว้บนแท่นกระจกที่หมุนได้ซึ่งครอบอยู่บนแผ่นโพลาริเซอร์ เมื่อเปิดแหล่งกำเนิดแสงที่อยู่ฐานด้านล่าง แสงจะเดินทางผ่านแผ่นโพลาริเซอร์ อัญมณี และแผ่นอนาไลเซอร์ ผู้สังเกตมองลักษณะทางแสงของอัญมณีจากด้านบนของอนาไลเซอร์ โดยมองที่อัญมณีในขณะที่หมุนแท่นกระจก ซึ่งจะทำให้อัญมณีหมุนไปด้วยจนครบ 360° ให้สังเกตลักษณะแสงที่ผ่านอัญมณีและเปรียบเทียบรูปแบบผลการตรวจสอบอัญมณี ดังตารางที่ 2.4 [10]

สำหรับอัญมณีหักเหสองแนวที่มองเห็นริ้วการแทรกสอด (interference) เมื่อผู้สังเกตมองผ่าน อนาไลเซอร์ ให้ใช้โคโนสโคป หรือแก้วทรงกลม (conoscope) ไปวางไว้ ณ ตำแหน่งการแทรกสอด จากนั้นมองภาพการแทรกสอดที่ปรากฏบนโคโนสโคป ซึ่งจะทำให้ระบุชนิดของแกนแสงได้ ดังภาพที่ 17

ตารางที่ 4 รูปแบบผลการตรวจสอบด้วยเครื่องโพลาริสโคป

การสังเกต	สรุป	อัญมณี
อัญมณีมืดตลอดการหมุน $360^{\circ}$	optically isotropic amorphous หรือ cubic	garnet, spinel, paste, natural glass, fluorite, diamond, opal, plastics
		
อัญมณีสว่างและมี 4 ครั้ง เมื่อหมุนครบ $360^{\circ}$	optically anisotropic ทุกระบบผลึก ยกเว้น cubic	beryl, corundum, topaz, zircon, tourmaline, quartz, feldspar, peridot, chrysoberyl, iolite, tanzanite
		
อัญมณีสว่างตลอดการหมุน $360^{\circ}$	polycrystalline	jadeite, nephrite, chalcedony/ agate
		
อัญมณีแสดงปรากฏการณ์ผิดปกติ (anomalous extinction effect)	strain anisotropic, optically isotropic	paste, natural glass (moldavite), fluorite, Verneuil synthetic spinel, almandine garnet, diamond, some plastics, amber
		



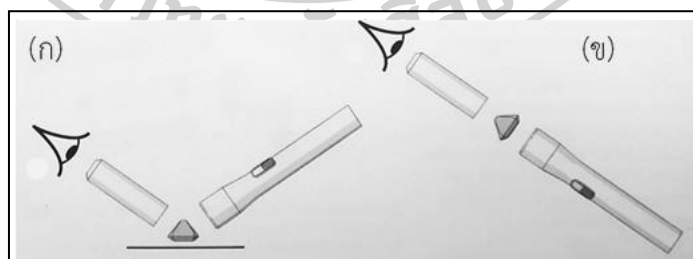
ภาพที่ 18 ภาพการแทรกสอดของอัญมณีหักเหสองแนวแบบ (ก) แกนแสงเดี่ยว (ข) ตาวัว (Bull's-eye) ในควอตซ์ และ (ค) แกนแสงคู่

#### 2.4.4 สเปกโตรสโคป

สเปกโตรสโคป (Spectroscope) เป็นเครื่องมือใช้ตรวจสอบสมบัติการดูดกลืนแสงของอัญมณี โดยแสดงผลเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) งานวิจัยนี้จะใช้สเปกโตรสโคปแบบเกรตติง มีลักษณะดังภาพที่ 19(ก) ดังนั้นหากใช้สเปกโตรสโคปมองไปที่แสงขาว (white light) จะทำให้เห็นสเปกตรัมเป็นไปตามภาพที่ 19 (ข) สำหรับการใช้งานสเปกโตรสโคปเพื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนของอัญมณีทำได้ 2 แบบ [6] ได้แก่ การใช้แสงขาวส่องเข้าที่อัญมณี แล้วใช้สเปกโตรสโคปไปปรับแสงที่สะท้อนออกมา ดังภาพที่ 20 (ก) และการให้แสงส่องผ่านอัญมณี ดังภาพที่ 20(ข) โดยสเปกตรัมการดูดกลืนที่สังเกตได้จากสเปกโตรสโคปนั้นเกิดจากสีที่ออกมาจากธาตุแทรนซิชัน (transition element) ที่อยู่ในอัญมณีแต่ละชนิด จึงทำให้เส้นสเปกตรัมที่แสดงออกมานั้นมีความแตกต่างกัน ตัวอย่างสเปกตรัมของอัญมณีบางชนิด แสดงดังภาพที่ 21

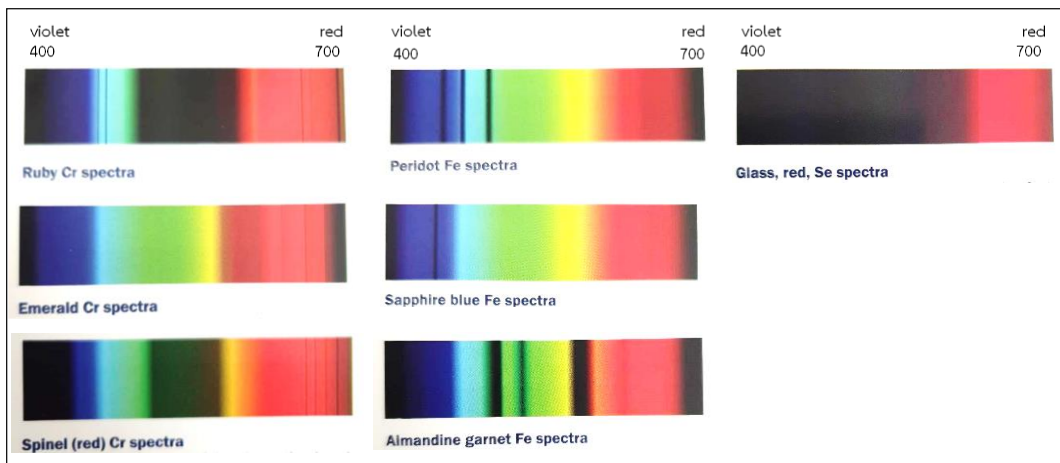


ภาพที่ 19 (ก) สเปกโตรสโคป และ (ข) สเปกตรัมของแสงขาวจากสเปกโตรสโคปแบบเกรตติง [14]



ภาพที่ 20 การใช้สเปกโตรสโคปแบบ (ก) แสงสะท้อน และ (ข) แบบแสงส่งผ่าน





ภาพที่ 21 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอัญมณี [6]



#### 2.4.5 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี

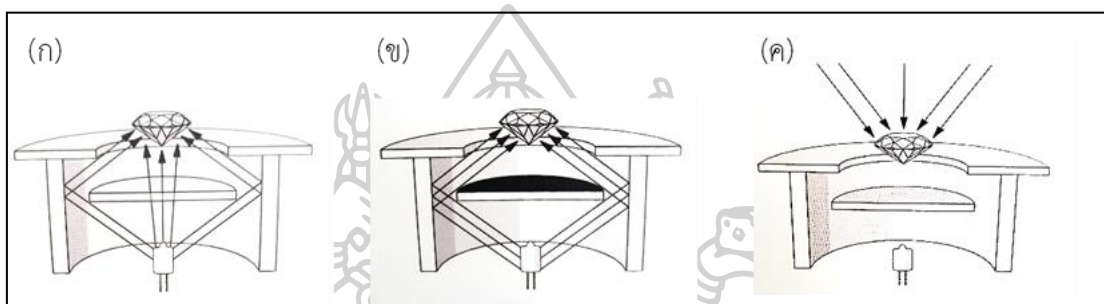
กล้องจุลทรรศน์สำหรับส่องอัญมณี (gem microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (stereo microscope) ชนิดหนึ่งที่มีอุปกรณ์เฉพาะเพิ่มเติม ได้แก่ ที่จับอัญมณี (stone holder) และแหล่งกำเนิดแสงแบบต่าง ๆ ดังภาพที่ 22 องค์ประกอบสำคัญสำหรับกล้องจุลทรรศน์อัญมณีนั้นคือการปรับการส่องแสงให้เหมาะสมกับการตรวจสอบอัญมณี ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ การส่องแสงแบบไบรท์ฟิลด์ (bright-field illumination) การส่องแสงแบบดาร์กฟิลด์ (dark-field illumination) และการส่องแสงด้านบน (top illumination)



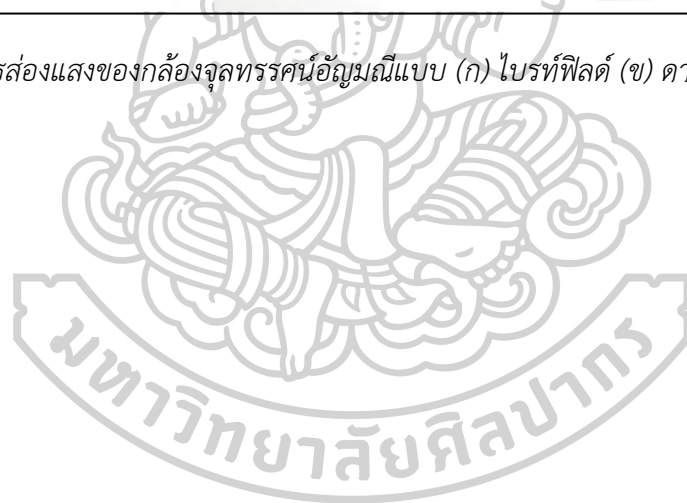
ภาพที่ 22 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี [8]



ภาพที่ 23(ก) แสดงการส่องแสงแบบไบรท์ฟิลด์ ซึ่งเป็นการให้แสงส่องเข้าไปยังอัญมณี โดยตรงจากด้านล่าง เหมาะสำหรับอัญมณีที่โปร่งใสและโปร่งแสง มักใช้ส่องดูอินคลูชันบางชนิดที่กลมกลืนกับบริเวณข้างเคียง ภาพที่ 23 (ข) แสดงการส่องแสงแบบดาร์กฟิลด์ ซึ่งเป็นการทำให้ฉากหลังมืดโดยกันแสงไม่ให้ส่องเข้าอัญมณีโดยตรง แต่ให้แสงส่องเข้าทางด้านข้าง ทำให้เห็นตำหนิภายใน หรืออินคลูชันภายในอัญมณีอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเป็นการปรับการส่องแสงที่นิยมใช้ในการส่องอัญมณี หากต้องการเห็นเฉพาะพื้นผิวภายนอกของอัญมณีเท่านั้น จะต้องใช้แสงส่องจากด้านบน ดังภาพที่ 23 (ค) [6]



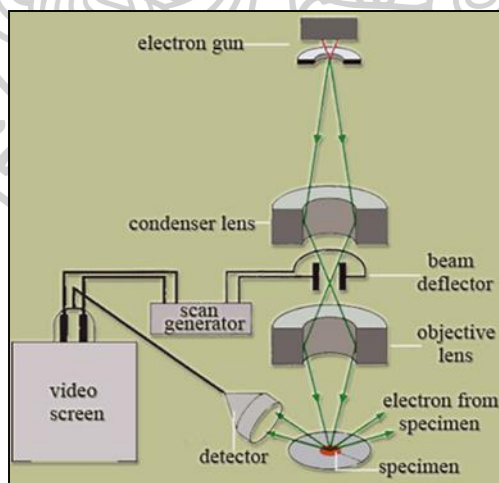
ภาพที่ 23 การส่องแสงของกล้องจุลทรรศน์อัญมณีแบบ (ก) ไบรท์ฟิลด์ (ข) ดาร์กฟิลด์ และ (ค) ด้านบน



## 2.5 เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงที่ใช้ในการวิเคราะห์หัตถ์อัญมณี

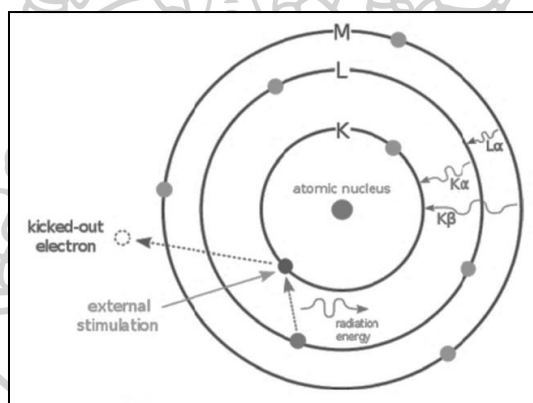
### 2.5.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDX) เป็นเครื่องมือวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่นิยมในงานด้านวัสดุศาสตร์ โดยนำมาใช้ศึกษารายละเอียดของพื้นผิวของวัตถุที่กำลังขยายสูง ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นลักษณะ 3 มิติ หลักการทำงานของเครื่อง SEM นั้นแสดงเป็นแผนภาพ ดังภาพที่ 24 ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะถูกป้อนเข้าไปให้กับระบบ โดยอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า แล้วผ่านไปที่เลนส์แม่เหล็ก (magnetic lens) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเลนส์ควบแสง (condenser lens) ในกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (light microscope) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนที่ผ่านเลนส์นี้รวมกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนได้ โดยที่ขนาดของลำอิเล็กตรอนนั้นบ่งบอกถึงความคมชัดของภาพ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิววัตถุหรือตัวอย่างชิ้นงาน อิเล็กตรอนที่ลงไปยังผิวตัวอย่าง เรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ซึ่งอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ออกมาจะถูกบันทึกและนำไปแปลงเป็นสัญญาณ หลังจากนั้นจะถูกนำไปสร้างภาพ



ภาพที่ 24 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่อง SEM [21]

เครื่อง EDX เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างชิ้นงาน หลักการทำงานคืออันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงกับวัสดุ แล้ววิเคราะห์จากรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาจากวัสดุชิ้นนั้น ดังนั้นเครื่อง EDX จึงมักเป็นเครื่องมือที่ต่อกับเครื่อง SEM เพื่อให้สามารถเห็นภาพพื้นผิวตัวอย่างและหาองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างในบริเวณที่ต้องการได้ เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกโฟกัสบนตัวอย่างอาจจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนชั้นในสุด (inner shell) หากลำอิเล็กตรอนตกกระทบด้วยพลังงานที่มากพอ จะทำให้อิเล็กตรอนวงในสุดหลุดออกมา และเกิดเป็นโฮล (hole) ดังนั้นอิเล็กตรอนจากวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงกว่า (outer shell) จะมายึดครองโฮลนี้ โดยผลต่างของพลังงานระหว่างชั้นพลังงานสูงกว่าและต่ำกว่าจะปล่อยออกมาในรูปของโฟตอนรังสีเอกซ์ (X-ray photon) ดังภาพที่ 25 พลังงานของรังสีเอกซ์ที่เปล่งออกมาจากวัสดุจะถูกวัดด้วยเครื่อง EDX ซึ่งพลังงานของรังสีเอกซ์นี้มีลักษณะเฉพาะ (characteristic) ในโครงสร้างอะตอมของแต่ละธาตุ จึงทำให้สามารถระบุองค์ประกอบธาตุของตัวอย่างนั้น ๆ ได้



ภาพที่ 25 หลักการทำงานของเครื่อง EDX [5]

### 2.5.2 ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

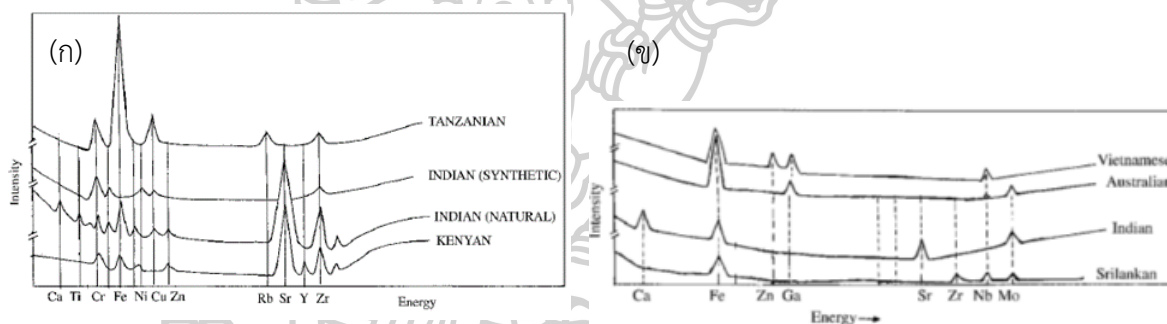
ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์สมบัติทางแสงของตัวอย่าง ทั้งการดูดกลืนแสง การส่งผ่านแสง และการสะท้อน โดยอาศัยหลักการดูดกลืนรังสีของสารที่อยู่ในช่วงยูวี (ultraviolet, UV) และช่วงแสงที่ตามองเห็น (visible) ระหว่างความยาวคลื่นประมาณ 190-1000 nm เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

สำหรับการใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในการตรวจสอบการดูดกลืนอัญมณีนั้น จะทำให้ได้กราฟสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของอัญมณี ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลตำแหน่งความยาวคลื่นของค่าการดูดกลืนแสงละเอียดและชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยสามารถนำกราฟไปเปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่สังเกตได้จากสเปกโตรสโคป



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

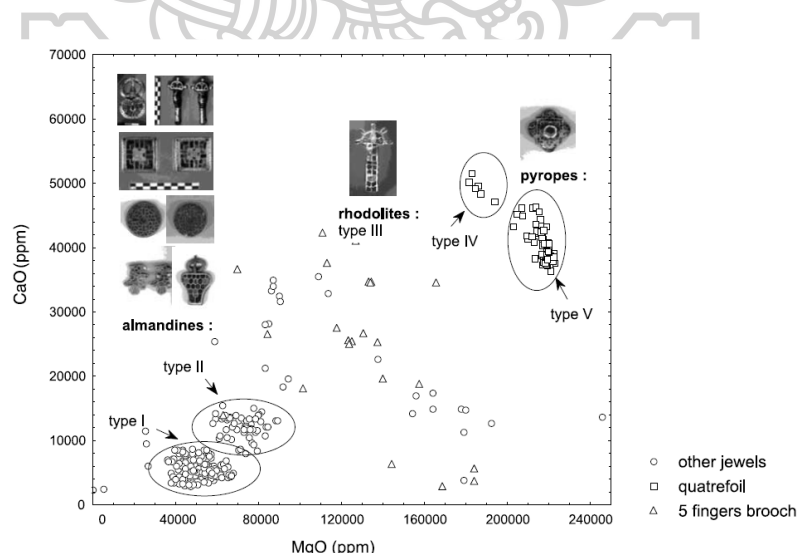
Joseph et al. (2000) [13] ได้ศึกษาการวิเคราะห์คุณลักษณะของทับทิม (ruby) และไพลิน (sapphire) จากแหล่งกำเนิดในประเทศต่าง ๆ ด้วยเทคนิควัดการเรืองรังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (energy-dispersive x-ray fluorescence spectrometry, EDXRF) พบว่า ในทับทิมธรรมชาติจะมี K, Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Sr และ Ba ส่วนทับทิมสังเคราะห์จะพบ Cr, Ni, Cu และ Zr และสเปกตรัมที่ไม่มี Fe ดังภาพที่ 26(ก) โดยจะพบ Fe ในทับทิมธรรมชาติทั้งหมด ไม่ว่าจะมาจากประเทศแหล่งกำเนิดใดก็ตาม ในขณะที่พวกนั้นองค์ประกอบธาตุที่มีอยู่ในไพลิน ได้แก่ Ca, Fe, Sr และ Mo ดังภาพที่ 26(ข) ซึ่ง Ca และ Sr จะพบในไพลินที่มาจากประเทศอินเดียเท่านั้น ส่วน Ga จะมีในไพลินที่มาจากเวียดนามและออสเตรเลียเท่านั้น ซึ่งไม่พบในไพลินที่มาจากอินเดียและศรีลังกา ดังนั้น EDXRF สามารถนำมาใช้ในการแยกความแตกต่างระหว่างทับทิมธรรมชาติและสังเคราะห์ รวมทั้งยังสามารถใช้ระบุประเทศแหล่งกำเนิดได้อีกด้วย



ภาพที่ 26 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ของ (ก) ทับทิม และ (ข) ไพลินจากประเทศแหล่งกำเนิดต่าง ๆ

Calligaro et al. (2002) [7] ได้ศึกษาการใช้ Particle Induced X-ray Emission (PIXE) และ  $\mu$ -Raman วิเคราะห์คุณลักษณะของการ์เนตที่ใช้ในเครื่องประดับของราชวงศ์เมรอเว็งเจียง (Merovingian) ซึ่งการ์เนตสีแดงเป็นอัญมณีที่โดดเด่นในยุโรปในช่วงยุคกลางตอนต้น ผู้วิจัยได้ศึกษาการ์เนตจำนวนมากกว่า 350 ชุด บนเครื่องประดับ 12 ชิ้นที่นำขึ้นมาจากสุสานหลวงของมหาวิหารแซ็ง-เดอนี (Saint-Denis) โดยปัญหาทางโบราณคดีคือการระบุแหล่งกำเนิดทางภูมิศาสตร์ของการ์เนตเหล่านี้เพื่อสร้างเส้นทางการค้าอัญมณีในยุคมืด ผู้วิจัยจึงใช้เทคนิค PIXE แบบลำรังสีภายนอก (external beam PIXE) เพื่อตรวจวัดองค์ประกอบของการ์เนต (Mg, Al, Si, Ca, Mn, Fe) เพื่อระบุชนิดของการ์เนต และเพื่อหาธาตุร่องรอย (trace element) ได้แก่ Cr และ Y ซึ่งผู้วิจัยได้ข้อสรุปว่าสามารถแบ่งการ์เนตออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ เครื่องประดับ 10 ชิ้นประดับด้วยการ์เนตชนิด almandine (Fe-rich) เครื่องประดับ 1 ชิ้นมีการ์เนตชนิด rhodolite และเครื่องประดับชิ้นสุดท้ายซึ่งเป็นชิ้นใหม่ที่สดนั้นฝังด้วยการ์เนตชนิด pyrope (Mg-rich)

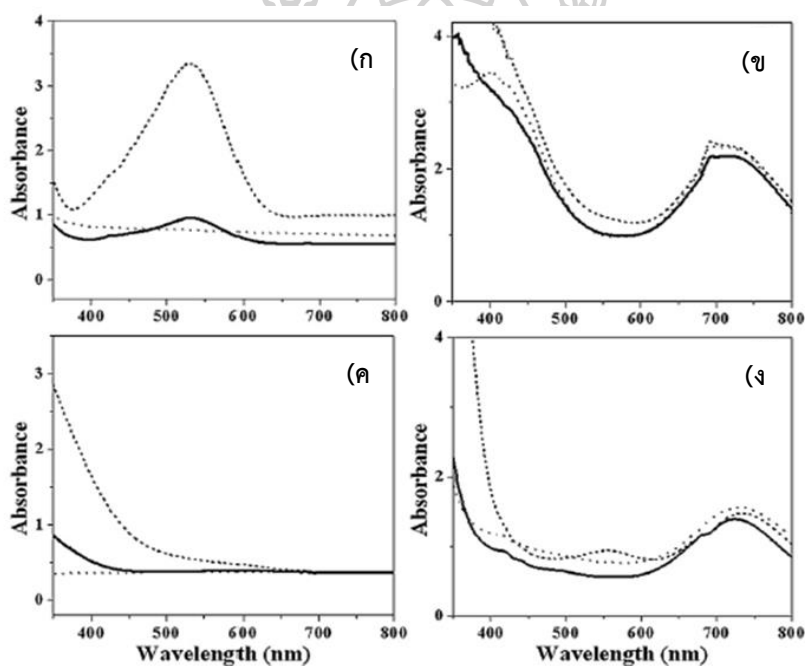
ปริมาณธาตุร่องรอยและองค์ประกอบหลักที่แตกต่างกันเล็กน้อยทำให้สามารถแยกได้เป็น 5 แหล่ง ดังภาพที่ 27 โดย 2 แหล่งเป็น pyrope (มีและไม่มี Cr) และอีก 2 แหล่งเป็น almandine garnets (มีปริมาณ Ca, Mg และ Yt โดดเด่น) โดยเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลวรรณกรรมจึงอาจกล่าวได้ว่า almandine มาจากเหมืองในอินเดีย ในขณะที่ rhodolite น่าจะนำเข้ามาจากศรีลังกา และ pyrope มาจากแหล่งแร่ Bohemian (Czech republic)



ภาพที่ 27 การพล็อตส่วนประกอบหลัก (Ca/Mg) ของการ์เนต



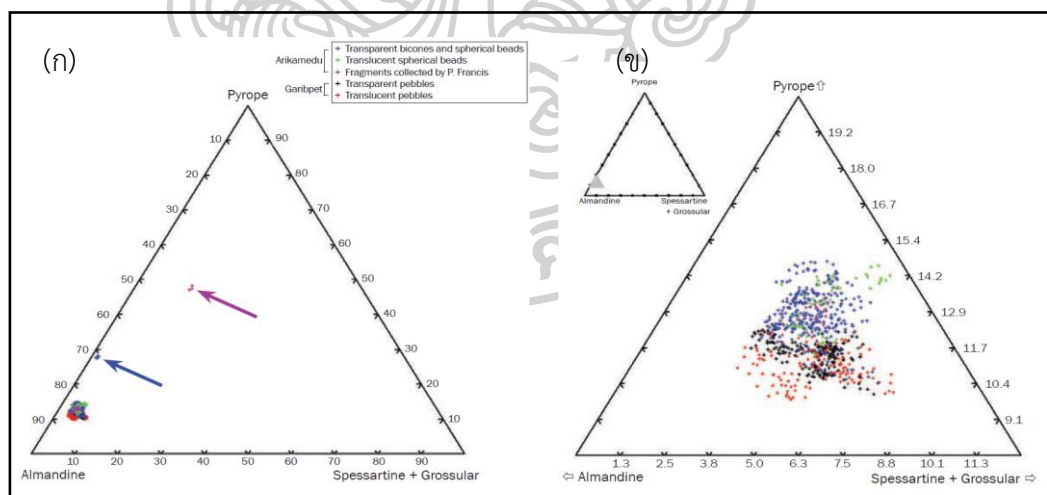
Ahn et al. (2013) [4] ศึกษาผลกระทบจากการฉายรังสีลำอิเล็กตรอน (electron beam irradiation) และการเผาด้วยความร้อน (heat treatment) ที่มีต่อทัวร์มาลีน (tourmaline) ผู้วิจัยเลือกใช้ตัวอย่างทัวร์มาลีนหลากหลายสีจาก Antandrokomby ประเทศมาดากัสการ์ โดยนำตัวอย่างมาฉายรังสีด้วยอิเล็กตรอน 10 MeV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และให้ร้อนที่ 550°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี UV-vis, mid-infrared, และ WD-XRF เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างก่อนและหลังการฉายรังสี สำหรับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแสดงดังภาพที่ 28 ซึ่งตัวอย่างทัวร์มาลีนสีชมพูเข้มหลังการฉายรังสีจะมีพีคการดูดกลืนที่ 390 และ 520 nm โดยหลังนำตัวอย่างนี้ไปเผาด้วยความร้อนจะกลายเป็นไม่มีสี สำหรับการฉายรังสีแล้วตัวอย่างทัวร์มาลีนที่ไม่มีสี สีน้ำเงินอ่อน และสีเหลือง จะแสดงพีคใหม่ที่ 365 nm



ภาพที่ 28 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง 300-800 nm ของตัวอย่างทัวร์มาลีนก่อนฉายรังสี (เส้นทึบ) หลังฉายรังสี (เส้นประ) และหลังการเผา (เส้นจุด) (ก) ตัวอย่างหมายเลข 3 (สีชมพูเข้ม) (ข) หมายเลข 12 (สีน้ำตาลเข้ม) (ค) หมายเลข 6 (ไม่มีสี) และ (ง) หมายเลข 9 (สีเขียว)

Schmetzer, K. et al. (2017) [17] ได้ศึกษาความเชื่อมโยงระหว่างการ์เนตที่พบในอินเดียที่โบราณสถาน Arikamedu และแหล่งแร่ที่ Garibpet โดยวิเคราะห์จากองค์ประกอบทางเคมีจากตัวอย่างการ์เนต ผลการศึกษาพบว่า ตัวอย่างส่วนใหญ่ที่มาจาก Arikamedu (ลูกปัดและเศษชิ้นส่วน) และพลอยดิบ (rough stones) จาก Garibpet เป็นการ์เนตที่มีปริมาณ almandine สูง โดยมีรายละเอียดปริมาณองค์ประกอบจากทั้งสองสถานที่ดังนี้ ที่โบราณสถาน Arikamedu มี almandine 77.4-83.5% มี pyrope 10.2-14.2% มี spessartine 0.9-5.3% และมี grossular 0.9-2.5% ส่วนที่แหล่งแร่ Garibpet มี almandine 79.2-84.0% มี pyrope 9.6-12.0% มี spessartine 1.1-5.9% และมี grossular 0.6-2.1%

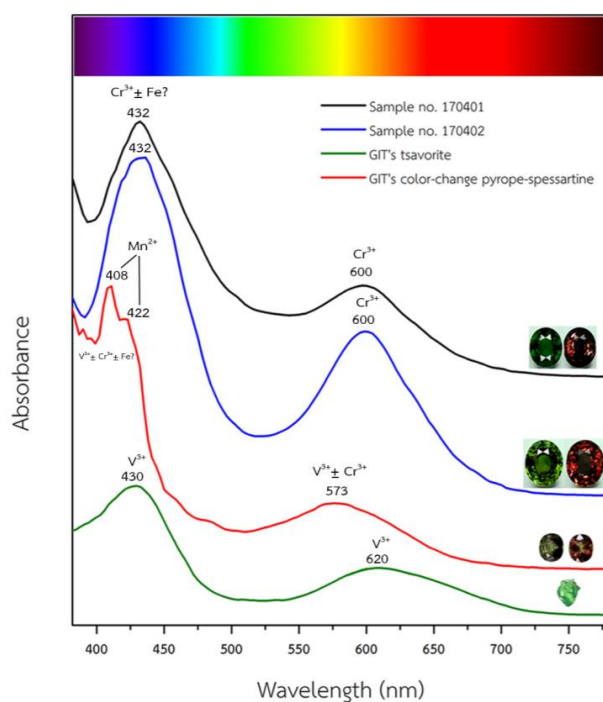
เมื่อนำแต่ละตัวอย่างมาพล็อตลงแผนภาพไตรภาค (ternary diagram) ซึ่งเป็นสามเหลี่ยมที่แต่ละด้านแทนองค์ประกอบ pyrope, almandine และ spessartine + grossular โดยให้สัดส่วนของทั้ง 3 องค์ประกอบรวมกันเท่ากับ 100% ดังภาพที่ 29 (ก) พบว่าองค์ประกอบจะหนาแน่นอยู่ในบริเวณเดียวกัน ยกเว้นตัวอย่างที่ผิดปกติ 2 ตัวอย่าง จาก Arikamedu (ลูกศรสีน้ำเงินและม่วง) ที่อยู่นอกพื้นที่องค์ประกอบหลัก ซึ่งอนุมานได้ว่ามาจากแหล่งที่แตกต่างกัน เมื่อขยายบริเวณพื้นที่องค์ประกอบหลักเพื่อศึกษารายละเอียด ดังภาพที่ 29 (ข) พบว่าตัวอย่างการ์เนตจาก Arikamedu และ Garibpet มีองค์ประกอบที่มีการซ้อนทับกันกระจายเป็นบริเวณกว้าง



ภาพที่ 29 (ก) แผนภาพไตรภาคขององค์ประกอบทางเคมีของการ์เนตจาก Arikamedu และ Garibpet (ข) ส่วนขยายรายละเอียดบริเวณสี่เหลี่ยม

Promwongnan et al. (2018) [215] รายงานเกี่ยวกับการ์เนตหายากชนิด grossular เปลี่ยนสี ได้ (color-change effect) โดยการศึกษาด้วยเทคนิค UV-Visible spectroscopy เพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของการ์เนตเปลี่ยนสีชนิด grossular นี้ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของการ์เนตชนิด tsavorite และการ์เนตเปลี่ยนสีชนิด pyrope-spessartine ดังภาพที่ 30 พบว่าการ์เนตเปลี่ยนสีชนิด grossular มีแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 432 nm และที่ 600 nm โดยมีช่วงส่งผ่านแสง 2 ช่วงในบริเวณสีเขียวและสีแดง ซึ่งเป็นสีของการ์เนตหรือปรากฏการณ์เปลี่ยนสีเขียวไปสีแดงนั่นเอง

สำหรับการ์เนตชนิด tsavorite ซึ่งเป็นการ์เนตชนิด grossular ที่มีสีเขียว มีแถบการดูดกลืนอยู่ที่ประมาณ 430 และ 620 nm ไปถึงบริเวณสีแดง โดยมีการส่งผ่านแสงสูงในบริเวณสีเขียวซึ่งทำให้เห็นเป็นสีเขียว (green hue) ส่วนการ์เนตเปลี่ยนสีได้ชนิด pyrope-spessartite มีแถบการดูดกลืนที่ประมาณ 573 nm และเนินที่ 408 and 422 nm ในบริเวณสีม่วง โดยช่วงการส่งผ่านแสง 2 ช่วงในบริเวณสีเขียว-น้ำเงิน และสีแดง-ส้ม ทำให้เกิดปรากฏการณ์เปลี่ยนสีจากสีเขียวแกมน้ำเงินเหลืองไปเป็นสีแดงส้ม



ภาพที่ 30 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของการ์เนตชนิด grossular แบบ color-change (เส้นสีน้ำเงินและดำ) การ์เนตชนิด tsavorite (สีเขียว) และการ์เนตชนิด pyrope-spessartite แบบ color-change (เส้นสีแดง)

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ที่สนใจศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางเคมี ของอัญมณีในตระกูลการ์เนตซึ่งมีหลากหลายชนิดและมีหลายเฉดสี โดยการเนตถือป็นหนึ่งในอัญมณีที่เป็นที่นิยมและจำหน่ายอยู่ในตลาดอัญมณี ซึ่งพบว่าในตลาดอัญมณีนั้นมีทั้งของแท้ และของปลอมที่รวมกันอยู่ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษา

ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกศึกษาการ์เนตที่มีประเภท (species) และชนิด (variety) แตกต่างกัน รวม 5 แบบ ได้แก่ ไพโรป (pyrope), แอลมันดีน (almandine), สเปนสซาร์ทีน (spessartine), เฮสโซไนต์ (Hessonite) และซาโวไรต์ (Tsavorite) โดยจัดหามาจากผู้จำหน่ายอัญมณีตามแหล่งจำหน่ายอัญมณีในประเทศไทยทั้งหมด

ในส่วนของการตรวจสอบในงานวิจัยนี้ตรวจสอบเพื่อจำแนกและระบุชนิดของการ์เนตโดยวิธีการที่ใช้มี 2 แบบ คือตรวจสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐาน และเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงจึงมีความน่าสนใจ ผลที่ได้น่าจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการแยกอัญมณีตระกูลการ์เนต

#### 3.1 ตัวอย่าง อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกศึกษาการ์เนตแตกต่างกัน 5 ชนิด ชนิดละ 5 ตัวอย่าง รวมทั้งสิ้น 25 ตัวอย่าง โดยชนิดของการ์เนต ได้แก่ Pyrope, Almandine, Spessartine, Hessonite และ Tsavorite

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย มีดังต่อไปนี้

ชุดเครื่องมือมาตรฐานสำหรับตรวจสอบอัญมณี

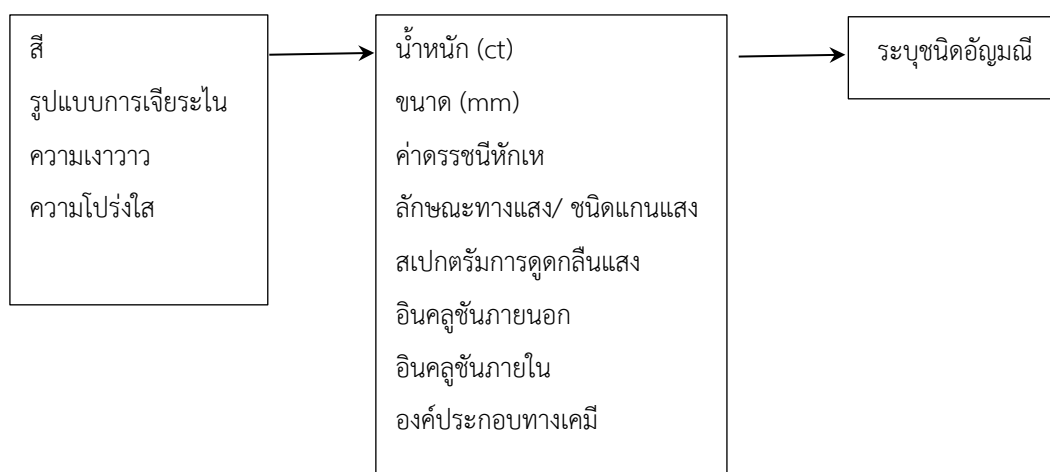
1. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
2. เครื่องวัดขนาดอัญมณีแบบดิจิทัล (digital gemstone gauge)
3. เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์
4. เครื่องโพลาริสโคป
5. สเปนโคโตรสโคป
6. กล้องจุลทรรศน์สำหรับส่องอัญมณี

### เครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (SEM/EDX)
2. ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟมิเตอร์

### 3.2 วิธีการทดลอง

1. เก็บตัวอย่างการันต์ใส่กล่องแยกกันพร้อมเขียนรหัสติดไว้ โดยตั้งรหัสตัวอย่างเป็น PY, AL, SP, HE และ TS ตามลำดับ แล้วตามด้วยเลขลำดับ เช่น PY1, PY2, PY3, PY4 และ PY5
2. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ซึ่งประกอบด้วย สี รูปร่างและการเจียรระไน ความเงาวาว (luster) และ ความโปร่งใส (transparency) ของอัญมณีตัวอย่างด้วยตาเปล่า
3. ตรวจสอบคุณลักษณะของอัญมณี ได้แก่ น้ำหนัก (ct) ขนาด (mm) ค่าตรรชนีหักเห ลักษณะทางแสง สเปกตรัมการดูดกลืนแสง อินคลูชันภายใน หรือตำหนิภายใน (internal inclusion) และอินคลูชันภายนอก (external inclusion) ด้วยชุดอุปกรณ์และเครื่องมือมาตรฐานสำหรับตรวจระบุอัญมณี ซึ่งประกอบด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล เครื่องวัดขนาดอัญมณีแบบดิจิทัล เครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ เครื่องโพลาริสโคป และกล้องจุลทรรศน์สำหรับส่องอัญมณี
4. บันทึกข้อมูลทั้งหมดในแบบรายงานการตรวจระบุอัญมณี (gem identification report) ทั้งนี้ ขั้นตอนข้อ 2 – 4 ทำให้ได้ข้อมูลคุณสมบัติทั้งหมดของแต่ละตัวอย่าง โดยเป็นการตรวจระบุอัญมณีมาตรฐานที่ยังคงใช้อยู่ในปัจจุบัน
5. นำตัวอย่างการันต์ไปหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง SEM/EDX
6. วิเคราะห์ผลการวิจัยจากข้อมูลธาตุองค์ประกอบและปริมาณธาตุ
7. นำตัวอย่างการันต์ไปตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องมือยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟมิเตอร์
8. วิเคราะห์ผลการวิจัยจากข้อมูลช่วงการดูดกลืนแสง



### 3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากวิธีการทดลองในข้อ 1 – 4 เพื่อระบุชนิดของอัญมณี มีขั้นตอนดังนี้

1. พิจารณาค่าดัชนีหักเหแสงที่ได้ว่าเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยวหรือหักเหสองแนว จากนั้นนำดัชนีหักเหไปเทียบกับตารางค่าดัชนีหักเหมาตรฐานว่าตรงกับอัญมณีใด มีค่าไปรีฟริงเจนซ์ตามตารางหรือไม่
2. พิจารณาลักษณะทางแสงว่าเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยว อัญมณีหักเหสองแนว อัญมณีแบบผลึกรวม หรืออัญมณีเดี่ยวที่มีความเครียด (strain) และอัญมณีหักเหสองแนวมีแกนแสงชนิดใด
3. เปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนที่ได้กับคู่มือมาตรฐานว่าตรงกันหรือไม่
4. พิจารณาอินคลูชันว่าเป็นอินคลูชันที่พบในอัญมณีธรรมชาติชนิดนั้น ๆ หรือไม่ ตรวจสอบว่าพบอินคลูชันของอัญมณีปลอมหรือไม่
5. สรุปลงในรายงานตรวจระบุอัญมณีว่า ตัวอย่างนั้นเป็นอัญมณีชนิดใด ตรงกับข้อมูลที่ยุ่จำหน่ายแจ้งหรือไม่

### 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากวิธีการทดลองในข้อ 5

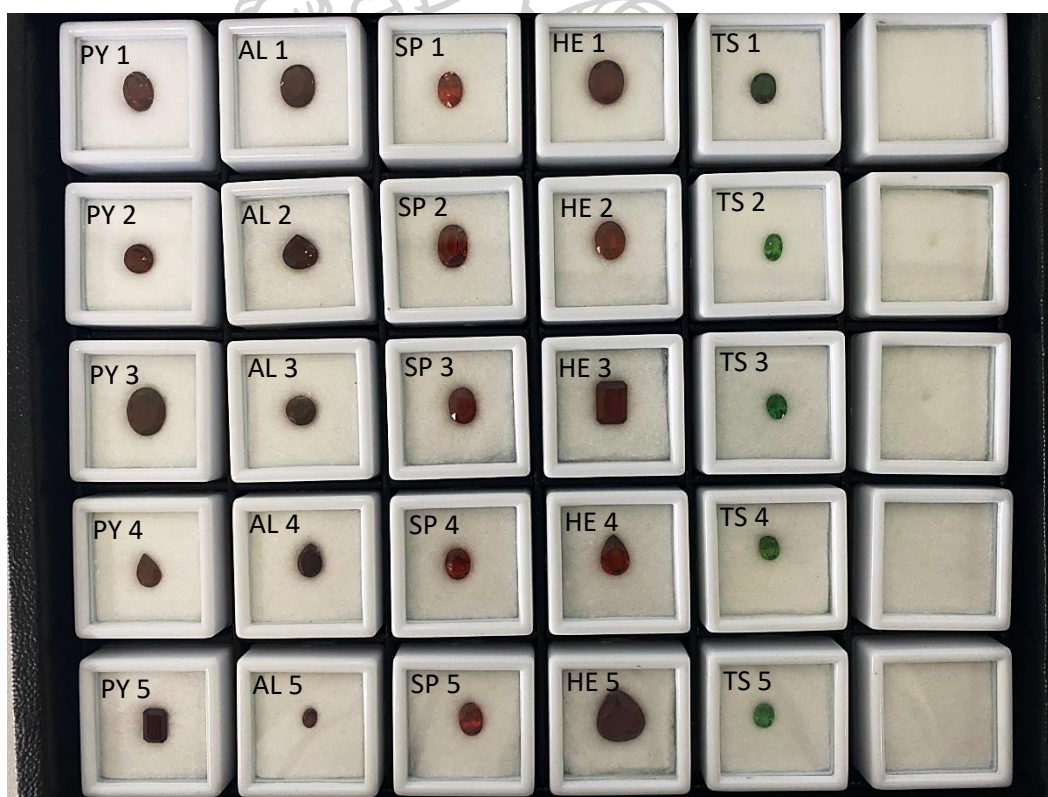
1. นำข้อมูลองค์ประกอบและปริมาณธาตุในตัวอย่งการเน็ตชนิดเดียวกันมาสรุป
2. นำข้อมูลองค์ประกอบและปริมาณธาตุของตัวอย่างการเน็ตแต่ละชนิดมาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ และอาจนำข้อมูลมาพล็อตลงในแผนภาพไตรภาค (ternary diagram)
3. พิจารณาการกระจายของกลุ่มข้อมูลว่า สามารถแยกเป็นตามชนิด แหล่งกำเนิด และสีได้หรือไม่
4. สรุปความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางเคมีและชนิดของการเน็ต

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการวิจัย






ในการศึกษาการตรวจสอบคุณสมบัติของอัญมณีตระกูลการ์เน็ต (Garnet) นำมาพิจารณาทั้งหมด 25 ตัวอย่างโดยอัญมณีตัวอย่างที่ใช้ได้แก่ ไพโรบ(Pyrope) แอลมาติน (Almandine) สเปนซาทีน(Spessartine) เฮนโซไนท์(Hensonite) และ ทรานซวาไรท์(Tsavorite) ซึ่งตั้งรหัสตัวอย่างเป็น PY , AL , SP , HE และ TS ตามลำดับ

โดยรายละเอียดเบื้องต้นได้ทำการตรวจสอบทางกายภาพของอัญมณีตระกูลการ์เน็ตก่อนเป็นอันดับแรกโดยได้ทำการตรวจสอบเกี่ยวกับข้อมูล ได้แก่ น้ำหนัก สี ขนาดความกว้าง ความยาว ความสูง รูปร่าง การเจียรไน และภาพถ่าย ที่ผู้วิจัยได้ทำการแยกอัญมณีตระกูลการ์เน็ตที่ใช้ในการวิจัยใส่ลงในกล่องเก็บอัญมณีและทำการแยกตัวอย่างเป็นชนิดละ 1- 5 โดยให้รหัสเป็น PY1 - PY5 หลังจากนั้นได้ทำการแยกข้อมูลซึ่งจะทำการจัดแยกข้อมูลแยกเป็นประเภทแต่ละประเภทแสดงดังตารางต่อไปนี้






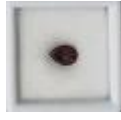

ภาพที่ 31 การจัดเก็บอัญมณีที่ใช้ในการตรวจสอบ

ตารางที่ 5 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Pyrope






ตัวอย่าง อัญมณี	สี (Color)	น้ำหนัก (ct)	ขนาด (mm)			รูปร่าง (Shape)	การเจียรไน (Cutting)	ภาพถ่าย
			ความ กว้าง	ความ ยาว	ความ สูง			
PY 1	แดง	1.535	6.01	8.04	3.85	Oval	Fancy	
PY 2	แดงแกมส้ม	1.027	6.01	6.01	3.77	Round	Fancy	
PY 3	แดงแกม น้ำตาล	2.795	8.05	9.97	4.34	Oval	Fancy	
PY 4	แดงแกมส้ม	0.782	5.00	7.11	3.01	Pear	Fancy	
PY 5	แดงแกมส้ม	1.305	5.09	7.15	3.63	Emerald	Emerald	








ตารางที่ 6 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Almandine

ตัวอย่าง อัญมณี	สี (Color)	น้ำหนัก (ct)	ขนาด (mm)			รูปร่าง (Shape)	การเจียรไน (Cutting)	ภาพถ่าย
			ความ กว้าง	ความ ยาว	ความ สูง			
AL 1	ส้มแกม แดง	1.890	7.09	8.80	3.32	Oval	Mixed	
AL 2	ส้มแกม แดง	1.650	7.27	7.22	4.21	Pear	Mixed	
AL 3	ส้มแกม แดง	1.272	6.20	6.20	4.14	Round	Mixed	
AL 4	ม่วงแกม แดง	1.160	5.02	7.05	3.21	Pear	Fancy	
AL 5	ส้มแกม แดง	0.190	3.01	4.03	1.75	Oval	Fancy	






ตารางที่ 7 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Spessatine

ตัวอย่าง อัญมณี	สี (Color)	น้ำหนัก (ct)	ขนาด (mm)			รูปร่าง (Shape)	การ เจียรไน (Cutting)	ภาพถ่าย
			ความ กว้าง	ความ ยาว	ความ สูง			
SP 1	ส้มแกม น้ำตาล	1.020	5.10	7.12	3.38	Oval	Fancy	
SP 2	แดงแกม เหลือง	1.692	6.15	8.84	3.20	Oval	Fancy	
SP 3	แดงแกม เหลือง	1.657	5.71	7.58	3.59	Oval	Fancy	
SP 4	ส้มแกม น้ำตาล	1.177	5.27	6.41	3.63	Oval	Mixed	
SP 5	ส้มแกม น้ำตาล	0.962	4.99	6.85	3.40	Oval	Mixed	

ตารางที่ 8 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง Hessonite

ตัวอย่าง อัญมณี	สี (Color)	น้ำหนัก (ct)	ขนาด (mm)			รูปร่าง (Shape)	การ เจียรไน (Cutting)	ภาพถ่าย
			ความ กว้าง	ความ ยาว	ความ สูง			
HE 1	เหลืองแกม ส้ม	2.807	7.28	8.86	4.61	Oval	Mixed	
HE 2	ส้มแกม น้ำตาล	1.720	6.22	7.76	4.27	Oval	Mixed	
HE 3	ส้มแกม น้ำตาล	1.463	6.37	8.94	4.19	Emerald	Emerald	
HE 4	เหลืองแกม ส้ม	1.123	5.97	8.42	3.09	Pear	Fancy	
HE 5	ส้มแกมแดง	4.540	10.03	8.42	5.97	Pear	Fancy	

ตารางที่ 9 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง *Tsavorite*

ตัวอย่าง อัญมณี	สี (Color)	น้ำหนัก (ct)	ขนาด (mm)			รูปร่าง (Shape)	การ เจียรไน (Cutting)	ภาพถ่าย
			ความ กว้าง	ความ ยาว	ความ สูง			
TS 1	เขียวเข้ม	0.760	5.16	6.31	2.69	Oval	Fancy	
TS 2	เขียวอ่อน	0.330	3.59	5.51	2.16	Oval	Fancy	
TS 3	เขียวอ่อน	0.385	4.08	5.07	2.46	Oval	Fancy	
TS 4	เขียวอ่อน	0.475	4.09	4.97	2.93	Oval	Fancy	
TS 5	เขียวแกม เหลือง	0.455	4.11	5.07	2.73	Oval	Fancy	

สำหรับการหาคุณสมบัติของการ์เน็ตด้วยชุดเครื่องมือมาตรฐานสำหรับตรวจระบุอัญมณี จากการตรวจสอบพบว่าอัญมณีตัวอย่างจัดอยู่ตามรหัสที่ตั้งไว้ สามารถสรุปได้ว่า ไพโรป แอลมันดีน เฮสโซไนต์ และซาโวไรต์ มีค่าดัชนีหักเหเฉลี่ยประมาณ 1.738 – 1.789 ส่วนสเปสซาร์ทึนไม่สามารถอ่านค่าด้วยเครื่องรีแฟรกโตมิเตอร์ได้ เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงเกิน 1.79 โดยแสดงรายละเอียดตามตารางดังต่อไปนี้

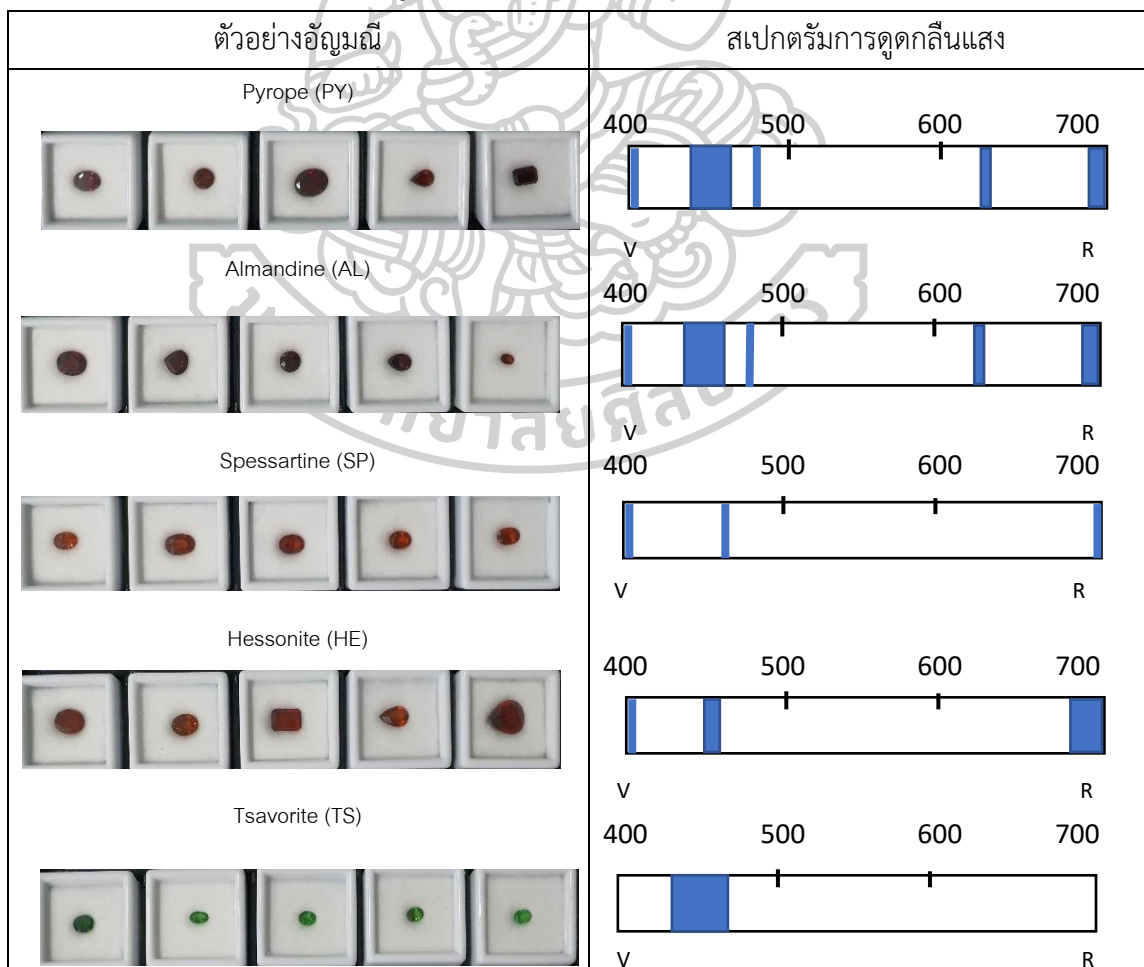
ตารางที่ 10 ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างการ์เน็ต

ตัวอย่างอัญมณี		ค่าดัชนีหักเหเฉลี่ย
Pyrope	PY 1	1.755 – 1.758
	PY 2	1.756 – 1.759
	PY 3	1.760
	PY 4	1.761 – 1.768
	PY 5	1.766 – 1.768
Almandine	AL 1	1.764 – 1.768
	AL 2	1.769 – 1.770
	AL 3	1.768 – 1.771
	AL 4	1.787 – 1.789
	AL 5	1.769 – 1.771
Spessatien	SP 1 - SP 5	สูงเกิน 1.79
Hensonite	HE 1	1.750 – 1.752
	HE 2	1.750 – 1.751
	HE 3	1.760
	HE 4	1.750 – 1.752
	HE 5	1.753 – 1.754
Tsavorite	TS 1	1.745 – 1.749
	TS 2	1.738 – 1.740
	TS 3	1.738 – 1.739
	TS 4	1.739 – 1.740
	TS 5	1.740 – 1.741

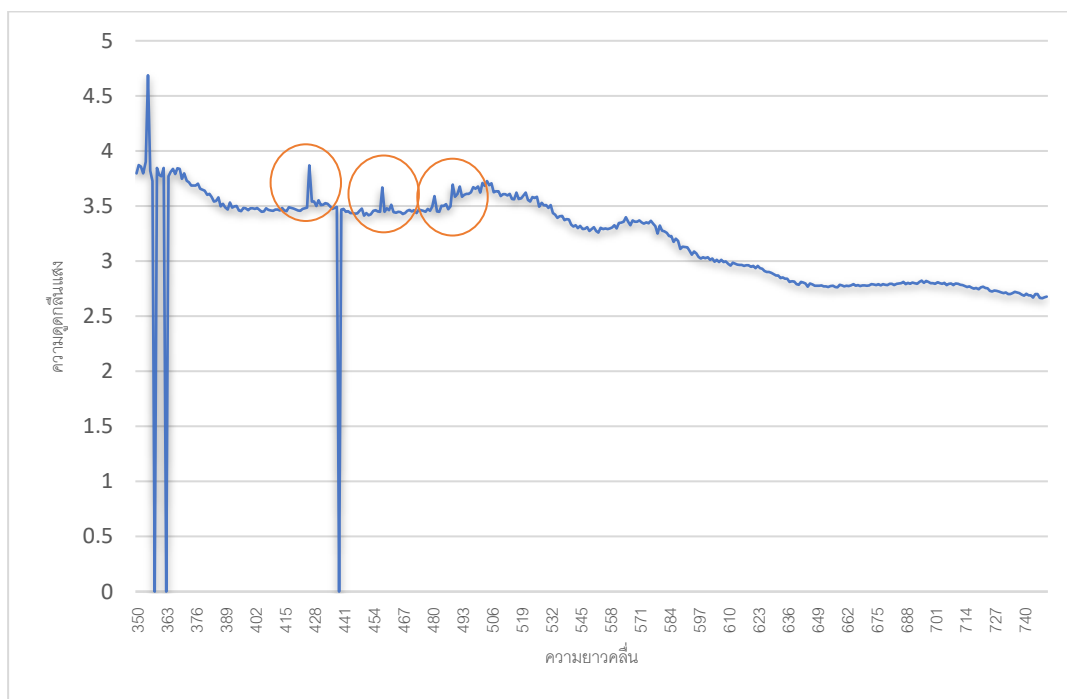
สำหรับลักษณะทางแสงของตัวอย่างการ์เนตเป็นแบบไอโซทรอปิก สำหรับลักษณะทางแสงของตัวอย่างการ์เนตเป็นแบบไอโซทรอปิก เนื่องจากเป็นอัญมณีหักเหเดี่ยวหรือมีค่าดรรชนีหักเหค่าเดียว จึงทำให้อัญมณีมีดตลอดเวลา เมื่อหมุนอัญมณีภายใต้โพลาไรสโคป โดยแอลมันดินจะแสดงลักษณะผิดปกติ (anomalous extinction) เนื่องจากความเครียด (strain) ภายในผลึก ซึ่งเป็นลักษณะของแอลมันดิน และนอกจากนี้อินคลูชันภายในที่พบในการ์เนตแต่ละแบบก็ถูกต้องตรงตามคู่มือการตรวจวิเคราะห์อัญมณี ซึ่งแสดงว่าตัวอย่างการ์เนตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทุกตัวอย่างเป็นอัญมณีธรรมชาติ ไม่ใช่อัญมณีสังเคราะห์หรืออัญมณีเลียนแบบ

สำหรับการตรวจสอบลักษณะทางแสงของตัวอย่างการ์เนตของช่วงความยาวคลื่น หรือการดูดกลืนแสงของการ์เนต สามารถสรุปได้ว่า ไพโรป แอลมันดิน มีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงที่เหมือนกัน ส่วน สเปสซาร์ทีน เฮสโซไนต์ และซาโวไรต์ นั้นมีช่วงความยาวคลื่นการดูดกลืนแสงที่ต่างจากไพโรป และแอลมันดิน โดยแสดงผลดังตารางต่อไปนี้

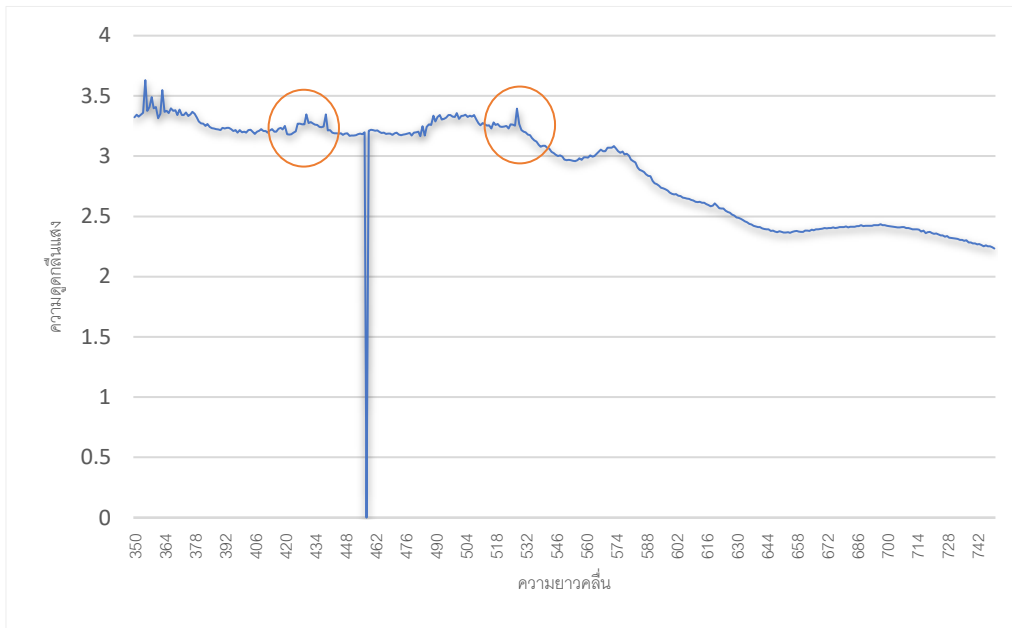
ตารางที่ 11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างการ์เนต



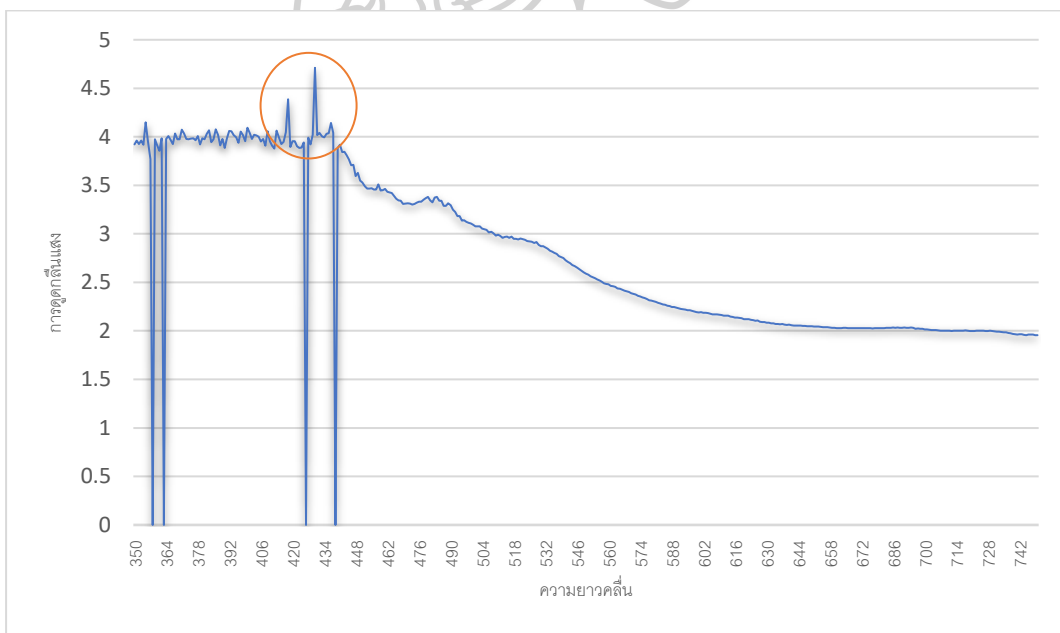
นอกจากผลการวิเคราะห์ลักษณะการดูดกลืนทางแสงแบบสเปกตรัมไลน์แล้ว ยังมีการตรวจสอบทางแสงเพิ่มเติมโดยตรวจสอบด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นการนำเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูงมาใช้ช่วยในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบข้อมูลทางแสงให้ชัดเจนสำหรับการตรวจสอบการดูดกลืนแสงหลังจากการตรวจสอบ นำข้อมูลที่ได้เขียนเป็นกราฟ โดยนำมาแยกเป็น ตัวอย่างละครภาพ ดังนี้



ภาพที่ 32 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Pyrope

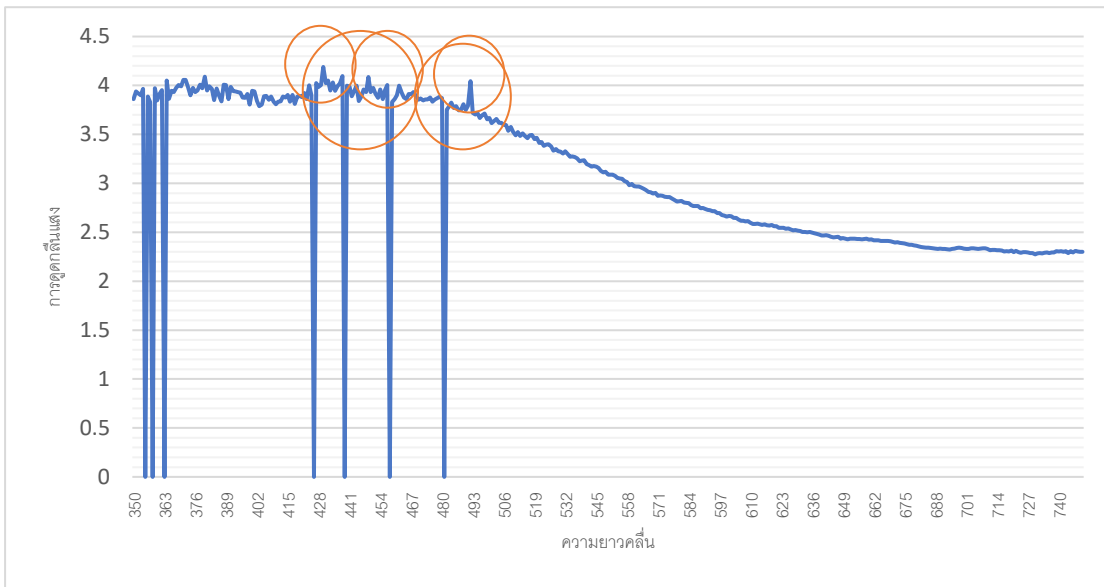


ภาพที่ 33 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Almandinte

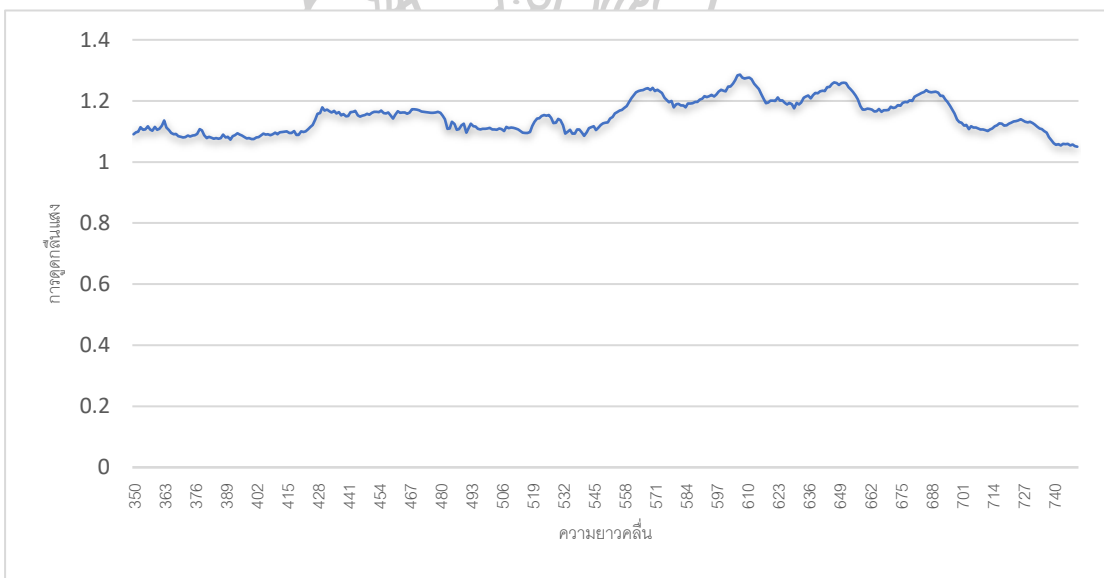


ภาพที่ 34 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Spessatien





ภาพที่ 35 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Henssonite



ภาพที่ 36 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ Tsavorite

**ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงจากเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์** พบว่าผลการตรวจสอบหลังนำข้อมูลมาเขียนกราฟ ของ PY AL SP และ HE มีพีคที่ขึ้นมาให้ผลที่ใกล้เคียงกับการตรวจสอบ สเปกตรัมการดูดกลืนด้วยสเปกโตรสโคป แต่เนื่องจากตัวอย่างอัญมณีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเล็ก จึงอาจทำให้การวางในเครื่องยูวีวิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม จึงทำให้ได้กราฟการดูดกลืนที่ไม่สมบูรณ์ ในส่วนของ TS พบว่าหลังนำข้อมูลมาเขียนกราฟ ไม่สามารถหาพีคของการดูดกลืนแสงได้เนื่องจากตัวอย่างอัญมณี TS ทั้ง 5 ตัวอย่างมีขนาดเล็กมาก จึงทำให้ข้อมูลที่ได้ออกมาเป็นดัง ภาพที่ 36

**ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี**ของตัวอย่างการเนตทั้ง 25 ตัวอย่าง ด้วยเครื่อง SEM/EDX พบว่า สามารถตรวจพบธาตุต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในอัญมณีตัวอย่างแต่ละตัวได้ โดยข้อมูลปริมาณธาตุจะรายงานเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ดังตารางที่ 4.8 – 4.12 ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้

ไฟโรป ประกอบด้วย ออกซิเจน (O), แมกนีเซียม (Mg), อะลูมิเนียม (Al), ซิลิคอน (Si), แคลเซียม (Ca), แมงกานีส (Mn) และเหล็ก (Fe) ซึ่งสามารถเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุได้ เป็น O 57.53%, Mg 8.78%, Al 11.08%, Si 14.72%, Ca 1.86%, Mn 0.36% และ Fe 5.68%

แอลมันดิน ประกอบด้วย ออกซิเจน แมกนีเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน แคลเซียม แมงกานีส และเหล็ก (Fe) ซึ่งสามารถเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุได้เป็น O 57.56%, Mg 6.88%, Al 10.98%, Si 14.71%, Ca 1.51%, Mn 0.51% และ Fe 7.86%

สเปสซาร์ทิน ประกอบด้วย ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิคอน แคลเซียม แมงกานีส และเหล็ก โดยตัวอย่าง SP1 และ SP2 พบว่าแมกนีเซียมในปริมาณ 0.81% และ 1.25% ตามลำดับ ส่วน SP4 พบว่ามีซีลีเนียม (Se) ปริมาณ 0.89% เพิ่มขึ้นมา สำหรับค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุมีค่าเป็น O 56.79%, Al 11.35%, Si 15.12%, Ca 0.44%, Mn 14.11% และ Fe 1.61%

เฮสโซไนต์ ประกอบด้วย ออกซิเจน อะลูมิเนียม ซิลิคอน แคลเซียม แมงกานีส และเหล็ก โดยตัวอย่าง HE5 ไม่พบปริมาณแมงกานีส สำหรับค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุมีค่าเป็น O 56.62%, Al 9.37%, Si 14.32%, Ca 15.72%, Mn 0.32% และ Fe 1.73%

ซาไวไรต์ ประกอบด้วย ออกซิเจน แมกนีเซียม อะลูมิเนียม ซิลิคอน แคลเซียม แมงกานีส ไทเทเนียม (Ti), วาเนเดียม (V) และโครเมียม (Cr) โดยตัวอย่าง TS2 และ TS3 ไม่พบปริมาณ แมงกานีส ส่วน TS5 ไม่พบปริมาณไทเทเนียม สำหรับค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุมีค่า เป็น O 58.10%, Mg 0.97%, Al 10.28%, Si 14.37%, Ca 15.23%, Mn 0.26%, Ti 0.21%, V 0.48% และ Cr 0.07%

ตารางที่ 12 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างไฟโรป

ตัวอย่าง อัญมณี	องค์ประกอบธาตุ(wt%)										
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Se	Ti	V	Cr
PY1	57.57	9.32	11.06	14.71	1.81	0.41	5.12	-	-	-	-
PY2	58.29	9.28	11.14	14.54	1.73	0.28	4.75	-	-	-	-
PY3	58.21	8.86	10.90	14.52	1.85	0.35	5.30	-	-	-	-
PY4	56.71	8.21	11.11	14.98	1.92	0.35	6.71	-	-	-	-
PY5	56.86	8.23	11.17	14.84	1.99	0.39	6.51	-	-	-	-

ตารางที่ 13 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างแอลมันดิน

ตัวอย่าง อัญมณี	องค์ประกอบธาตุ(wt%)										
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Se	Ti	V	Cr
AL1	58.19	8.48	10.78	14.40	1.88	0.32	5.96	-	-	-	-
AL2	60.21	7.80	10.74	14.21	1.50	0.35	5.19	-	-	-	-
AL3	58.83	7.67	10.78	14.56	1.70	0.35	6.11	-	-	-	-
AL4	55.38	2.33	11.28	15.13	0.53	0.93	14.41	-	-	-	-
AL5	55.18	8.10	11.31	15.25	1.96	0.58	7.62	-	-	-	-

ตารางที่ 14 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างสเปซาร์ทีน

ตัวอย่าง ข้อมูล	องค์ประกอบธาตุ(wt%)										
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Se	Ti	V	Cr
SP1	58.81	0.81	11.26	14.58	0.42	12.26	1.86	-	-	-	-
SP2	55.56	1.25	11.34	15.17	0.46	14.80	1.43	-	-	-	-
SP3	58.28	-	11.40	15.05	0.42	13.05	1.79	-	-	-	-
SP4	56.16	-	10.97	15.19	0.52	14.66	1.61	0.89	-	-	-
SP5	55.12	-	11.78	15.60	0.39	15.77	1.34	-	-	-	-

ตารางที่ 15 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเฮลโซไนต์

ตัวอย่าง ข้อมูล	องค์ประกอบธาตุ(wt%)										
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Se	Ti	V	Cr
HE1	58.07	-	9.31	14.45	16.06	0.34	1.77	-	-	-	-
HE2	58.39	-	9.54	14.35	16.00	0.36	1.36	-	-	-	-
HE3	59.06	-	9.07	14.34	15.30	0.23	1.99	-	-	-	-
HE4	59.74	-	9.50	14.02	14.83	0.33	1.58	-	-	-	-
HE5	57.83	-	9.43	14.42	16.39	-	1.93	-	-	-	-

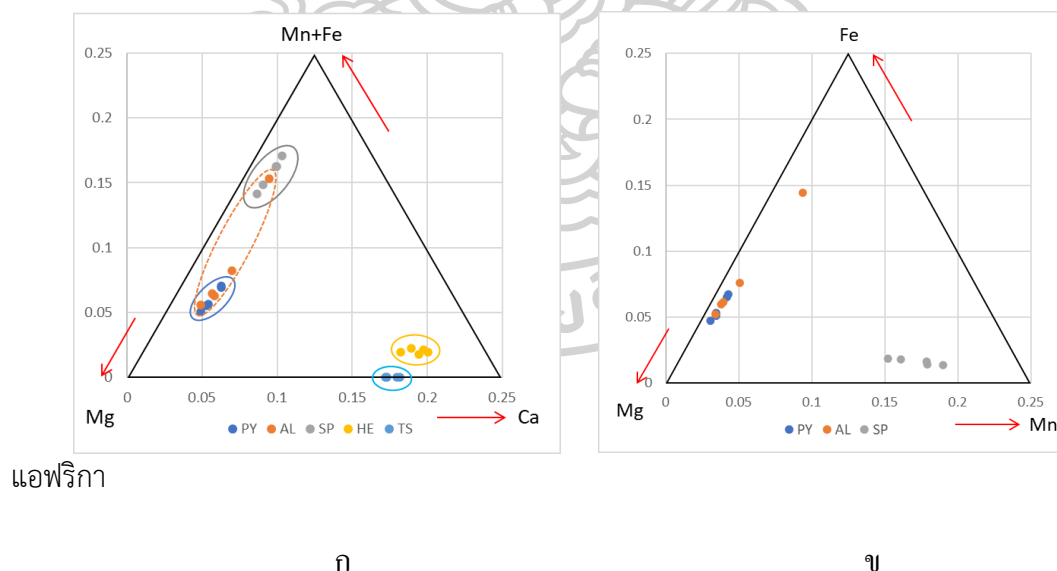
ตารางที่ 16 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างซาไวไรต์

ตัวอย่าง อัญมณี	องค์ประกอบธาตุ(wt%)										
	O	Mg	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Se	Ti	V	Cr
TS1	57.08	0.90	10.14	14.57	15.55	0.47	-	-	0.32	0.90	0.08
TS2	57.29	0.99	10.43	14.72	15.76	-	-	-	0.28	0.41	0.13
TS3	59.14	0.99	10.18	14.06	14.95	-	-	-	0.23	0.35	0.09
TS4	58.29	0.96	10.46	14.30	14.98	0.31	-	-	0.20	0.40	0.10
TS5	58.71	1.01	10.19	14.21	14.90	0.57	-	-	-	0.36	0.04

เมื่อทางผู้วิจัยได้นำข้อมูลจากตารางที่ 12 – 16 มาพิจารณาสูตรทางเคมีของการเน็ตแต่ละประเภท ในชุด  $X_3Al_2(SiO_4)_3$  ได้แก่ ไพโรป  $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$  แอลมันดิน  $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$  และสเปสซาร์ทิน  $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากเครื่อง SEM/EDX พบว่า ปริมาณแต่ละธาตุในสเปสซาร์ทินนั้นมีปริมาณที่เป็นไปตามสูตรทางเคมี ส่วนไพโรปและแอลมันดินนั้นมีปริมาณ Mg และ Fe คล้ายกันจนแยกไม่ออก ยกเว้นตัวอย่าง AL4 เท่านั้น ซึ่งปริมาณธาตุในแอลมันดินเป็นไปตามสูตรทางเคมี และเมื่อกล่าวถึงการวิเคราะห์ระหว่างไพโรปกับแอลมันดินนั้น พบว่าไพโรปมักจะมีค่าดรรชนีหักเหอยู่ที่ประมาณ 1.75 – 1.76 และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.7 – 3.8 ส่วนแอลมันดินจะมีค่าดรรชนีหักเหอยู่ที่ประมาณ 1.76-1.78 และมีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.8 – 4.2 เมื่อพิจารณาค่าดรรชนีหักเหของแอลมันดินตัวอย่าง AL4 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.788 จะเห็นได้ชัดว่าเป็นประเภทแอลมันดิน ในขณะที่ตัวอย่าง AL1, AL2, AL3 และ AL5 มีค่าดรรชนีหักเหเฉลี่ย 1.765, 1.769, 1.769 และ 1.771 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าดรรชนีหักเหอยู่ใกล้ค่าดรรชนีหักเหที่เป็นไปได้สูงสุดของไพโรป จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การจำแนกประเภทด้วยปริมาณธาตุเป็นไปได้ยาก ในกรณีที่ตัวอย่างมีคุณสมบัติอื่น ๆ ใกล้เคียงกัน

สำหรับสูตรเคมีของการ์เนตในชุด  $\text{Ca}_3\text{Y}_2(\text{SiO}_4)_3$  ได้แก่ ประเภททรออสซูลาร์ ซึ่งประกอบด้วย เฮสโซไนต์และซาโวไรต์  $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลจากเครื่อง SEM/EDX พบว่า ทั้งเฮสโซไนต์และซาโวไรต์มีปริมาณธาตุเป็นไปตามสูตรเคมี โดยสามารถแยกเฮสโซไนต์กับซาโวไรต์ออกจากกันได้ เนื่องจากซาโวไรต์จะมีปริมาณธาตุแทรนซิชัน (transition element) หรือธาตุให้สี (coloring element) ได้แก่ ไททาเนียม วาเนเดียม และโครเมียม เพิ่มขึ้นมา

เมื่อนำข้อมูลปริมาณธาตุ Mg, Ca และ Mn+Fe มาเขียนแผนภาพไตรภาค (ternary diagram) ดังภาพที่ 37 (ก) จะเห็นการกระจายของกลุ่มข้อมูลปริมาณธาตุ ทำให้สามารถจำแนกประเภท PY, AL, SP และชนิด HE, TS ออกจากกันได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณาประเภท PY, AL และ SP พบว่า มีตัวอย่าง AL 1 ตัวอย่าง (AL4) อยู่ในบริเวณของ SP ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลปริมาณธาตุ Mg, Mn และ Fe ของการ์เนตประเภท PY, AL และ SP มาเขียนแผนภาพไตรภาคเพื่อวิเคราะห์เพิ่มเติม ดังภาพที่ 37 (ข) พบว่า ตัวอย่าง AL4 นั้น ไม่ได้มีองค์ประกอบธาตุแบบ SP แต่เป็น AL ที่มีปริมาณธาตุ Mg น้อยกว่าตัวอย่างแอลมันดินอื่น และมีปริมาณธาตุ FE สูงกว่าตัวอย่างแอลมันดินอื่น ซึ่งอาจมีสาเหตุอันเนื่องมาจาก AL4 เป็นตัวอย่างที่ไม่ได้ระบุแหล่งที่มา ดังนั้นอาจเป็นจะมีแหล่งกำเนิดแตกต่างจากตัวอย่าง AL อื่นซึ่งมาจาก



แอฟริกา

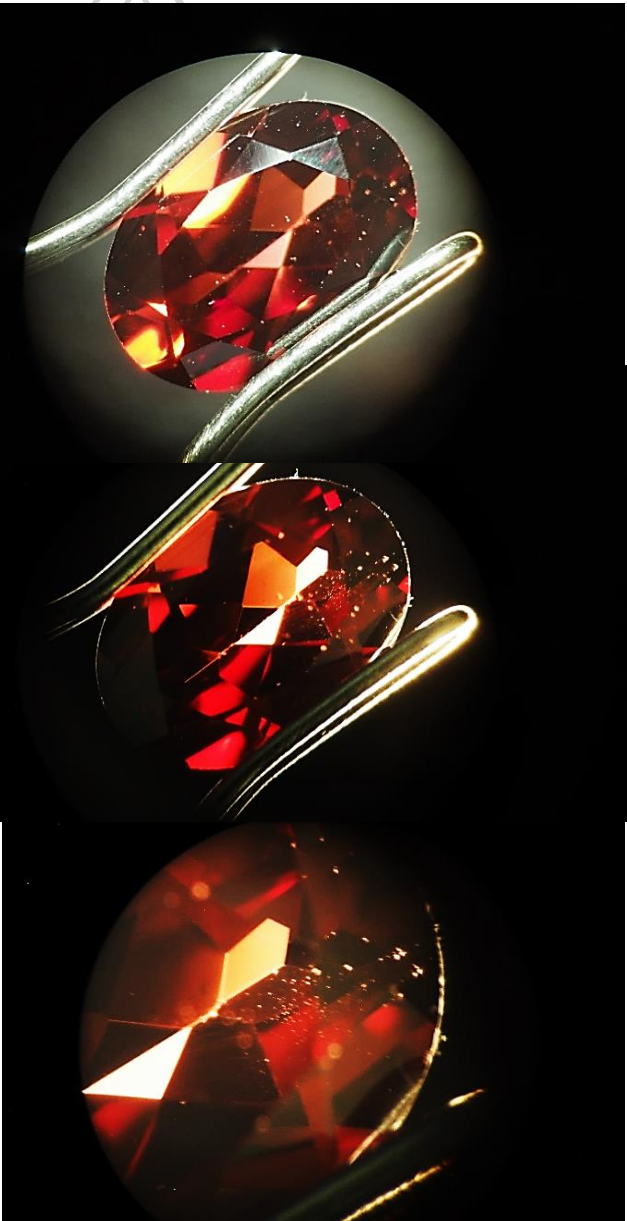
ก

ข

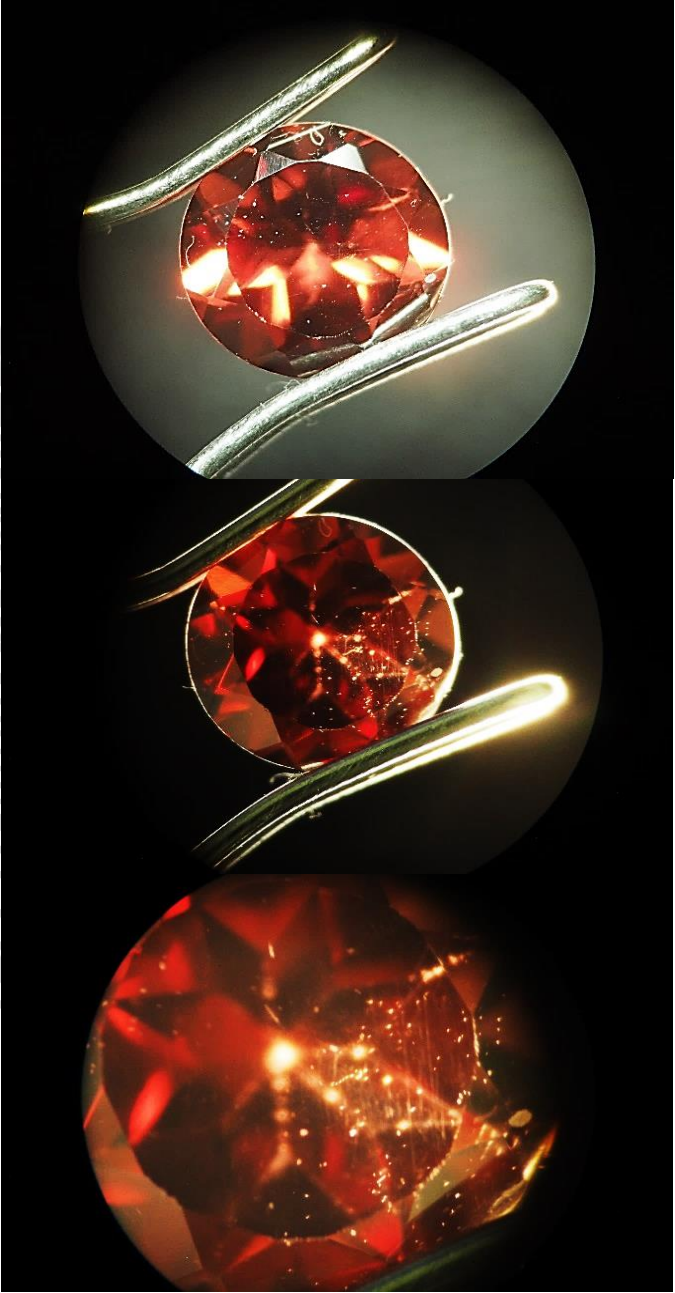
ภาพที่ 37 ก แผนภาพไตรภาคขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างการ์เนต , ข แผนภาพไตรภาคขององค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างไฟโรป แอลมันดิน และสเปสซาร์ทีน

ผลการตรวจสอบลักษณะมลทิน (Inclusion) ของอัญมณีโดยแบ่งการตรวจสอบเป็น  
ออกเป็น 2 อย่างคือ การตรวจสอบลักษณะมลทินภายนอก (External Inclusion) และ การ  
ตรวจสอบลักษณะมลทินภายใน (Internal Inclusion) หลังจากการตรวจสอบลักษณะมลทินพบว่า  
ภายในของอัญมณีแต่ละตัวมีลักษณะมลทินที่ต่างกัน และบางสิ่งบางอย่างเหมือนกันโดยแสดง  
ข้อมูลรายละเอียดตามตารางที่ 17-21

ตารางที่ 17 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไฟโรปต์ตัวที่ 1(PY1)

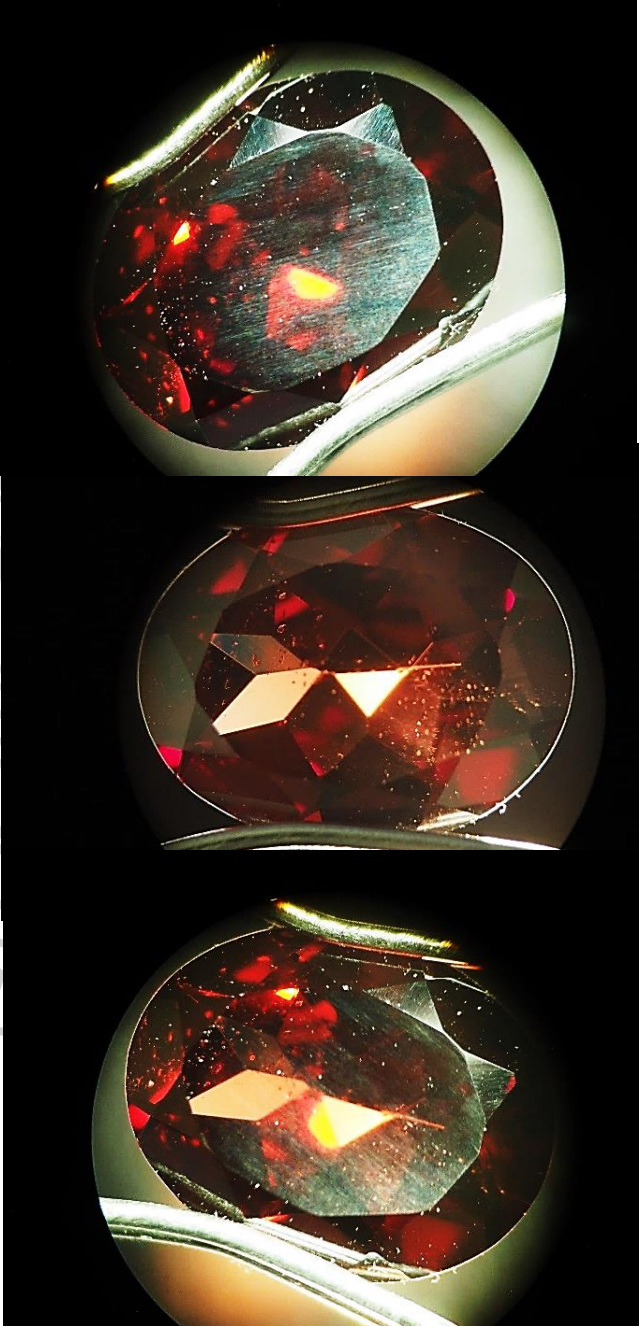
Inclusions ของ PY 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystais)</li> </ul>	

ตารางที่ 18 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไฟโรปต์วี่ 2 (PY2)

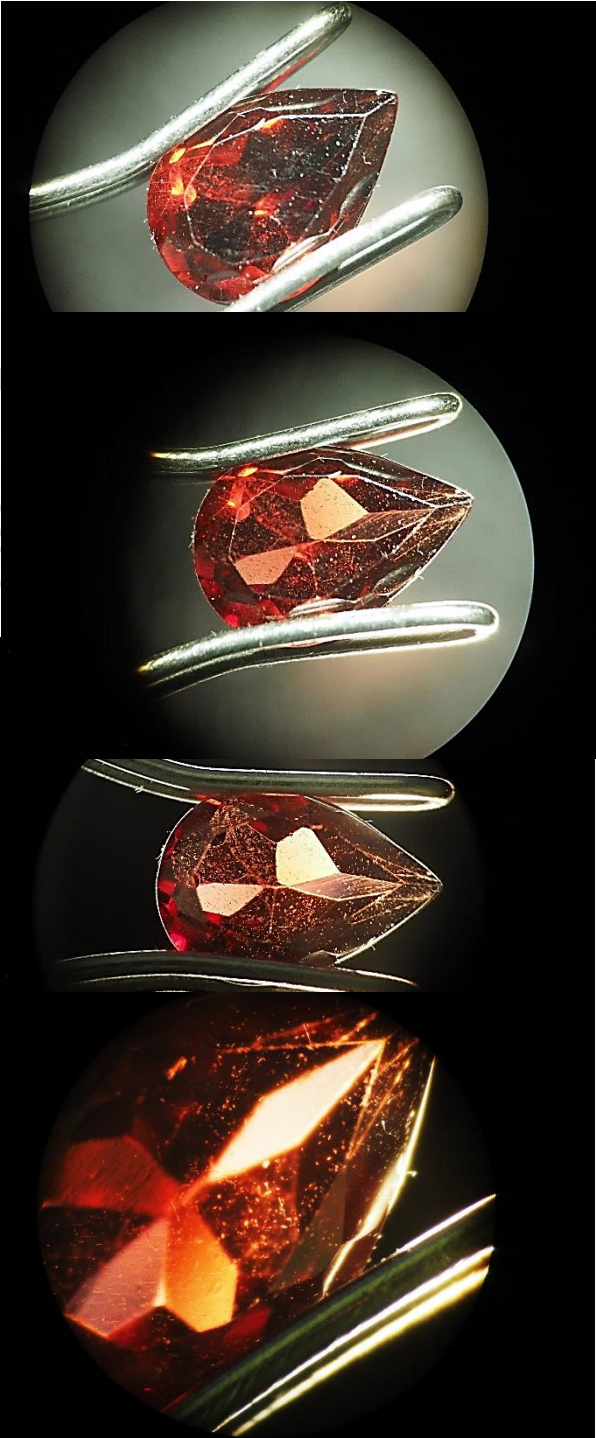
Inclusions ของ PY 2	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• เศษขนผ้า</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> </ul>	



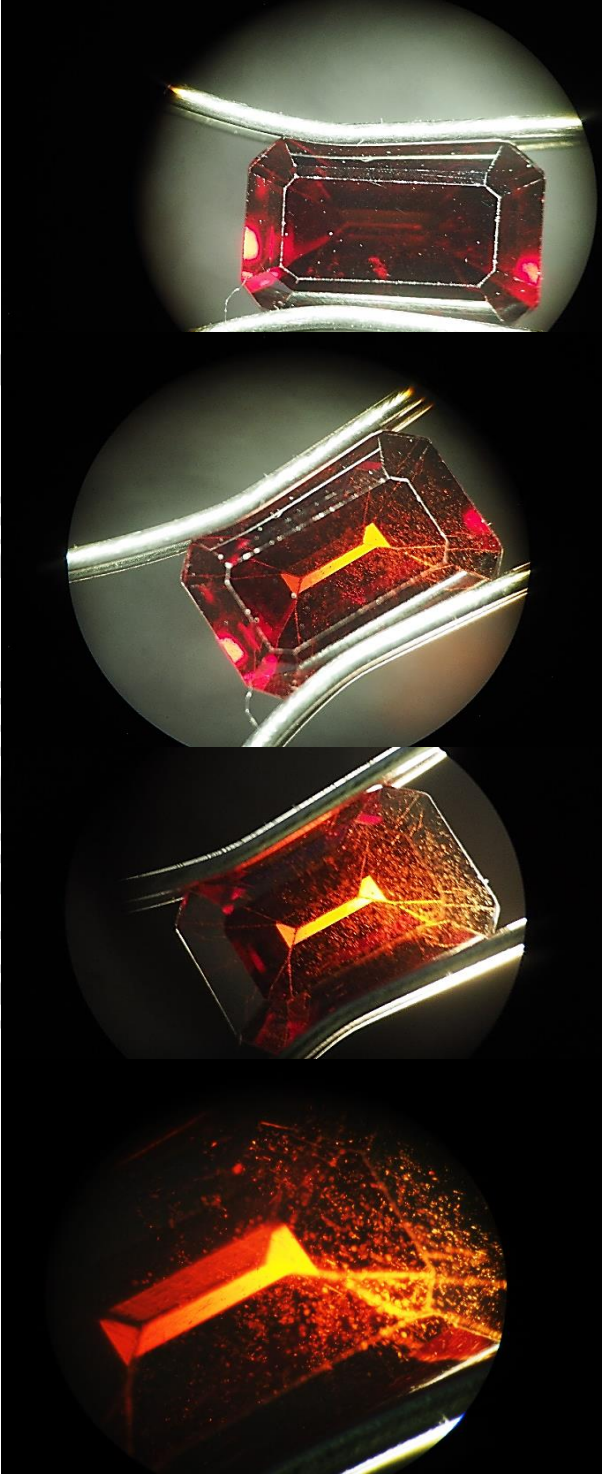
ตารางที่ 19 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไฟโรบิตัวที่ 3 (PY3)

Inclusions ของ PY 3	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟูน</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> <li>• รอยซีกข่วน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	

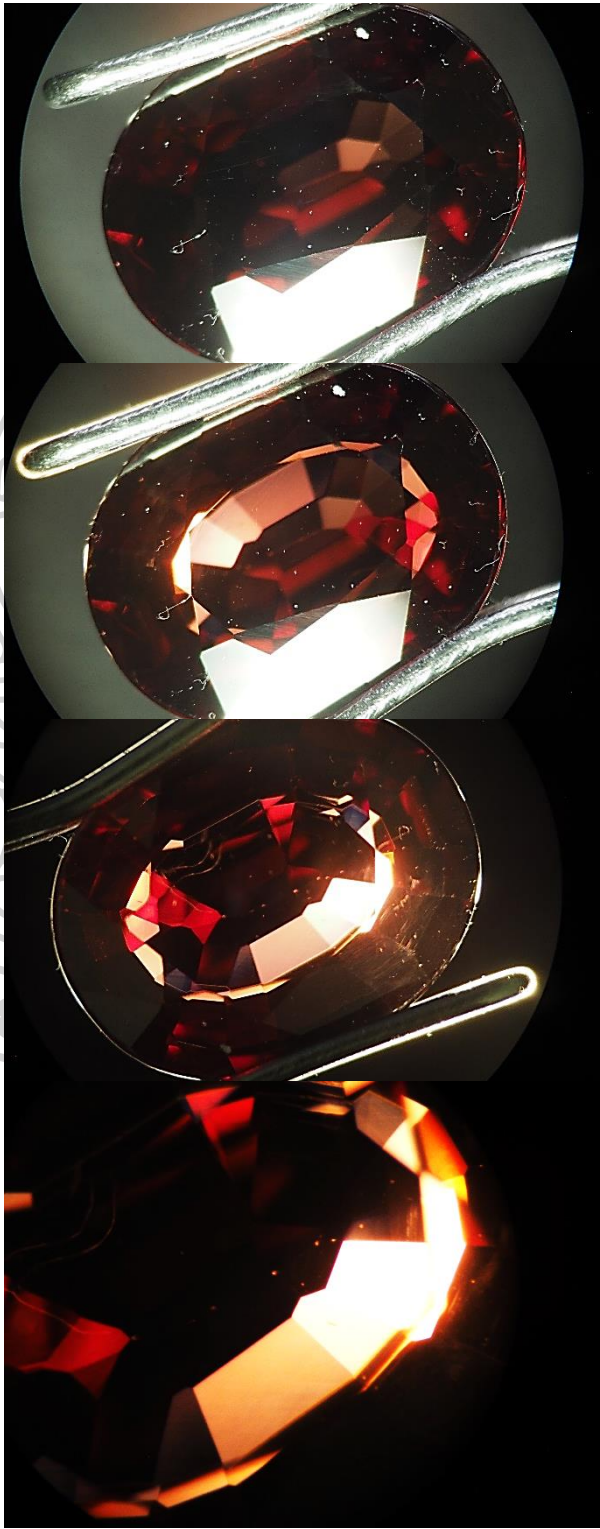
ตารางที่ 20 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไฟโรปต์ตัวที่ 4 (PY4)

Inclusions ของ PY 4	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• เศษขนผ้า</li> <li>• รอยขีดข่วน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	 <p>The image displays four sequential views of a red gemstone (likely a ruby) held by tweezers. The top view shows the stone with some surface dust and scratches. The second view shows a prominent needle-like crystal inclusion. The third view shows a different internal inclusion. The bottom view is a close-up showing multiple internal inclusions and the stone's facets.</p>

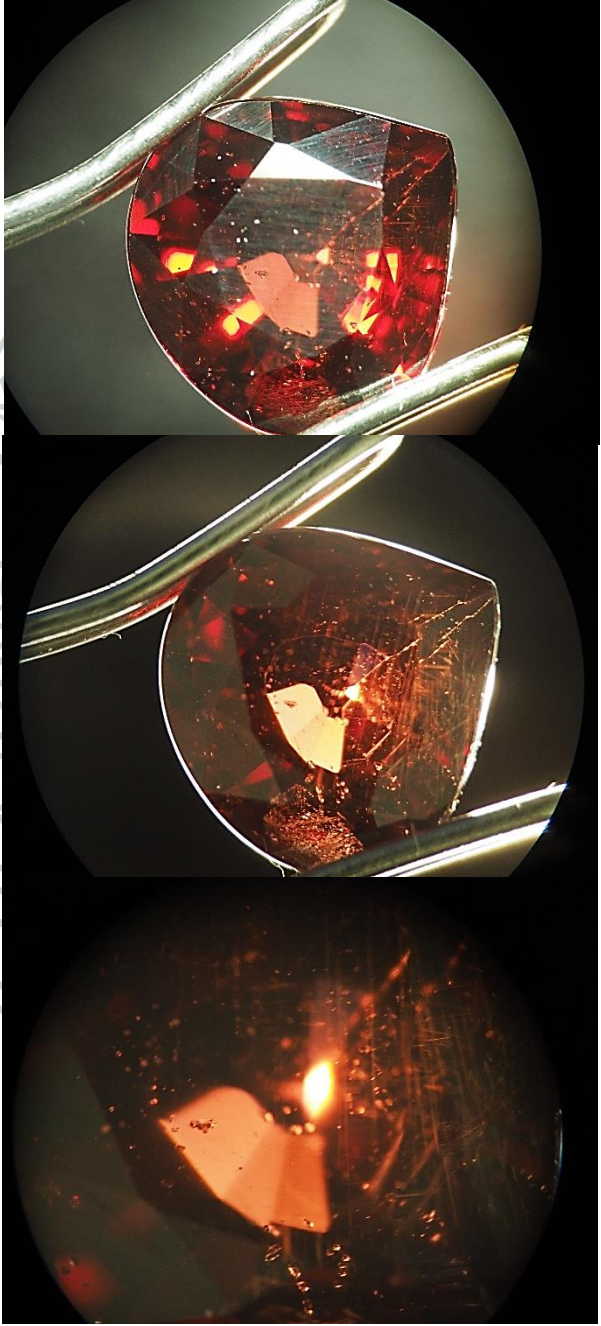
ตารางที่ 21 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างไพโรปต์ตัวที่ 5 (PY5)

Inclusions ของ PY 5	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• เศษขนผ้า</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	

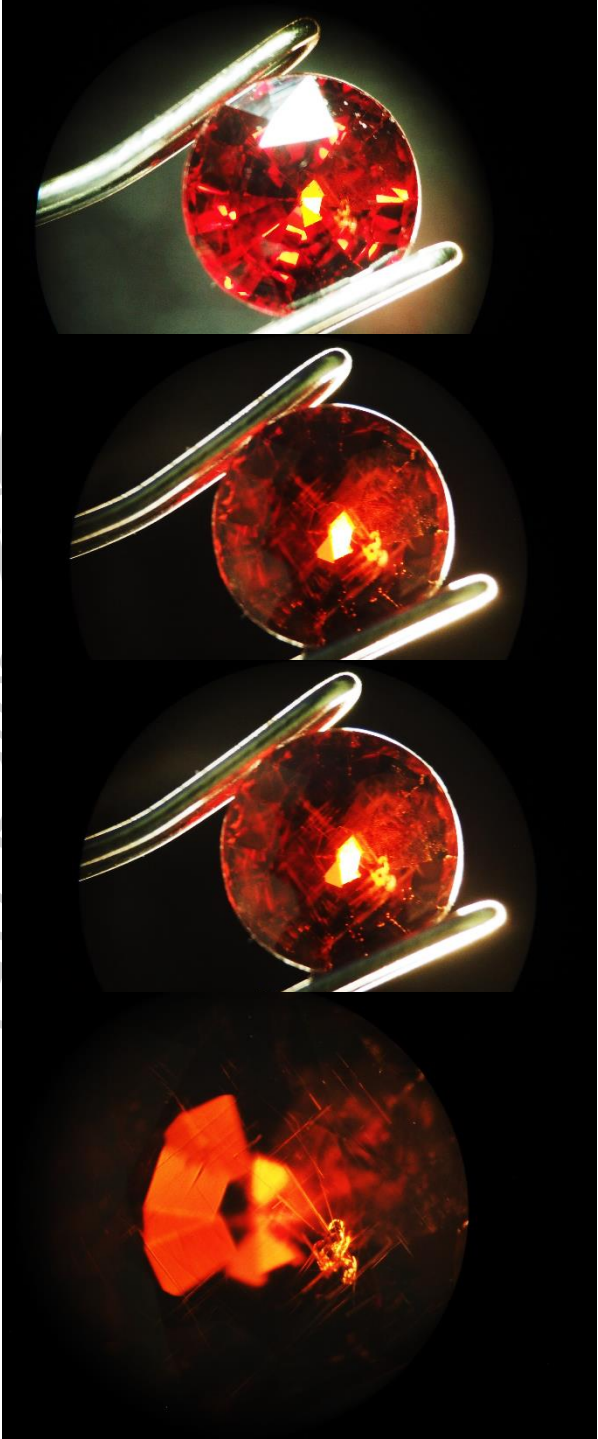
ตารางที่ 22 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างแอลมันต์ในตัวที่ 1 (AL1)

Inclusions ของ AL 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• เศษขนผ้า</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• คล้ายคลื่นความร้อน (Heat wave effect)</li> </ul>	


ตารางที่ 23 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างแอลมันต์ในตัวที่ 2 (AL2)

Inclusions ของ AL 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> <li>• รอยขีด</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	

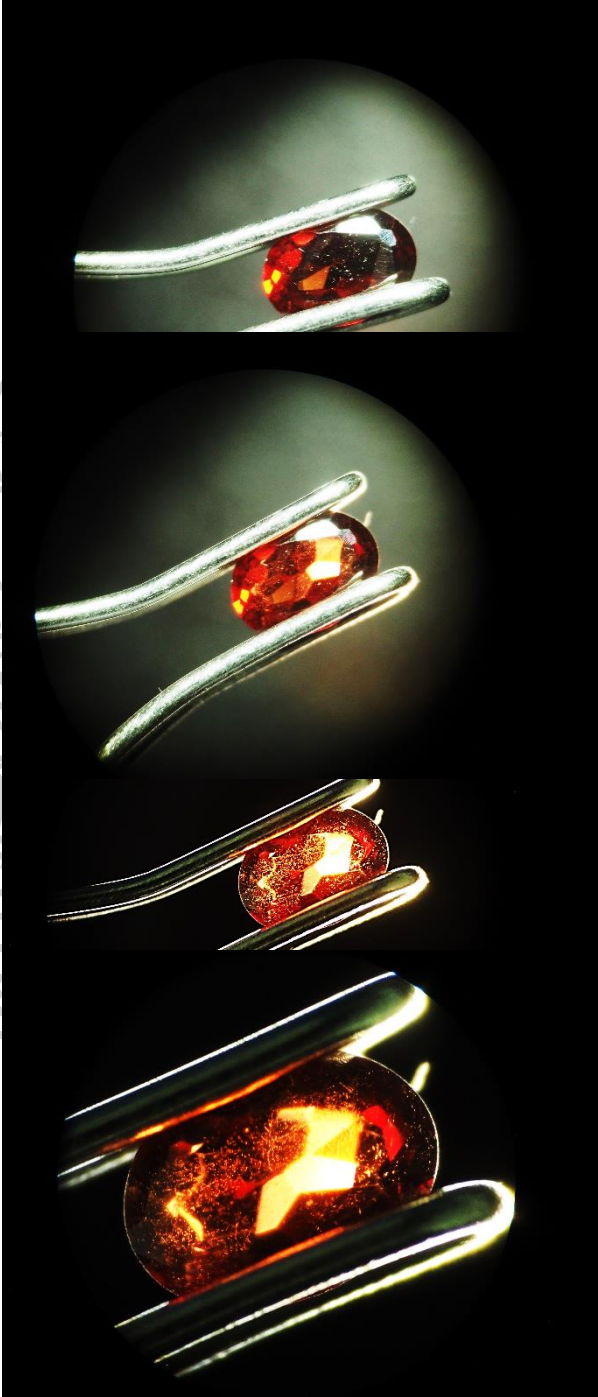
ตารางที่ 24 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างแอลมันต์เม็ดที่ 3 (AL3)

Inclusions ของ AL 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟุ้ง</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• รอยแตก</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	

ตารางที่ 25 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างแอลมันต์ในตัวที่ 4 (AL4)


Inclusions ของ AL 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• รอยขีด</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> </ul>	

ตารางที่ 26 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างแอลมันต์ในตัวที่ 5 (AL5)

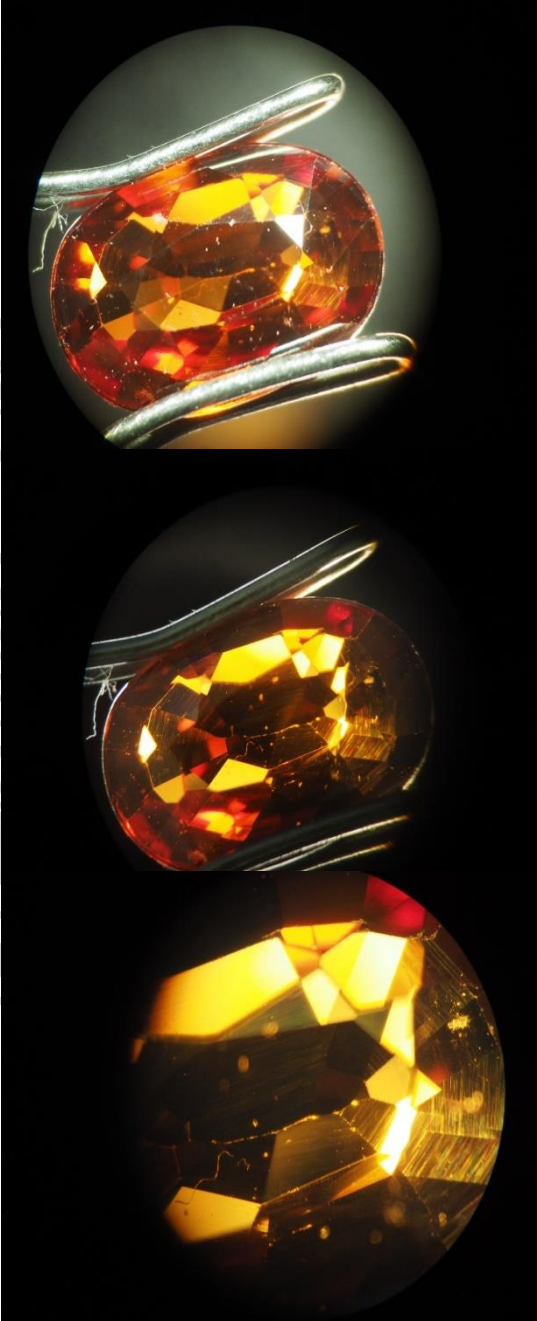
Inclusions ของ AL 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟูน</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> <li>• รอยขีด</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> </ul>	




ตารางที่ 27 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างสเปสลาทีนตัวที่ 1 (SP1)

Inclusions ของ SP 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจากความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• รอยแตก</li> <li>• wavy feather</li> </ul>	

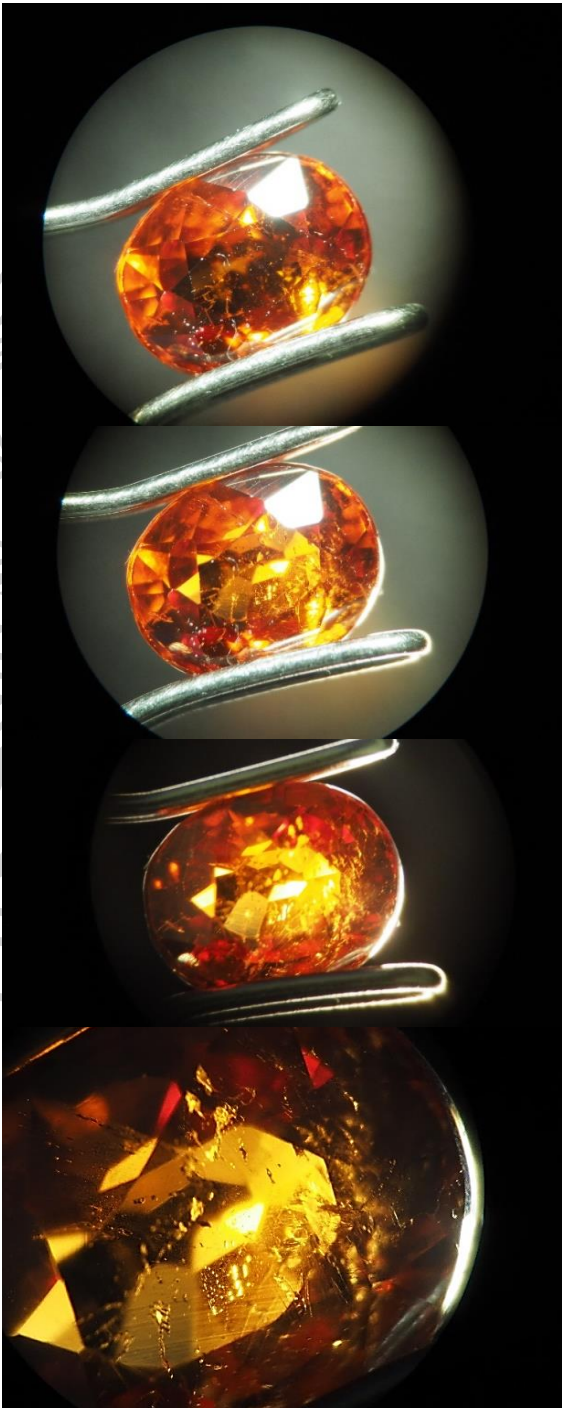
ตารางที่ 28 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างสเปสลาทีนตัวที่ 2 (SP2)

Inclusions ของ SP 2	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟูน</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจากความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• Liquid droplet</li> <li>• wavy feather</li> </ul>	

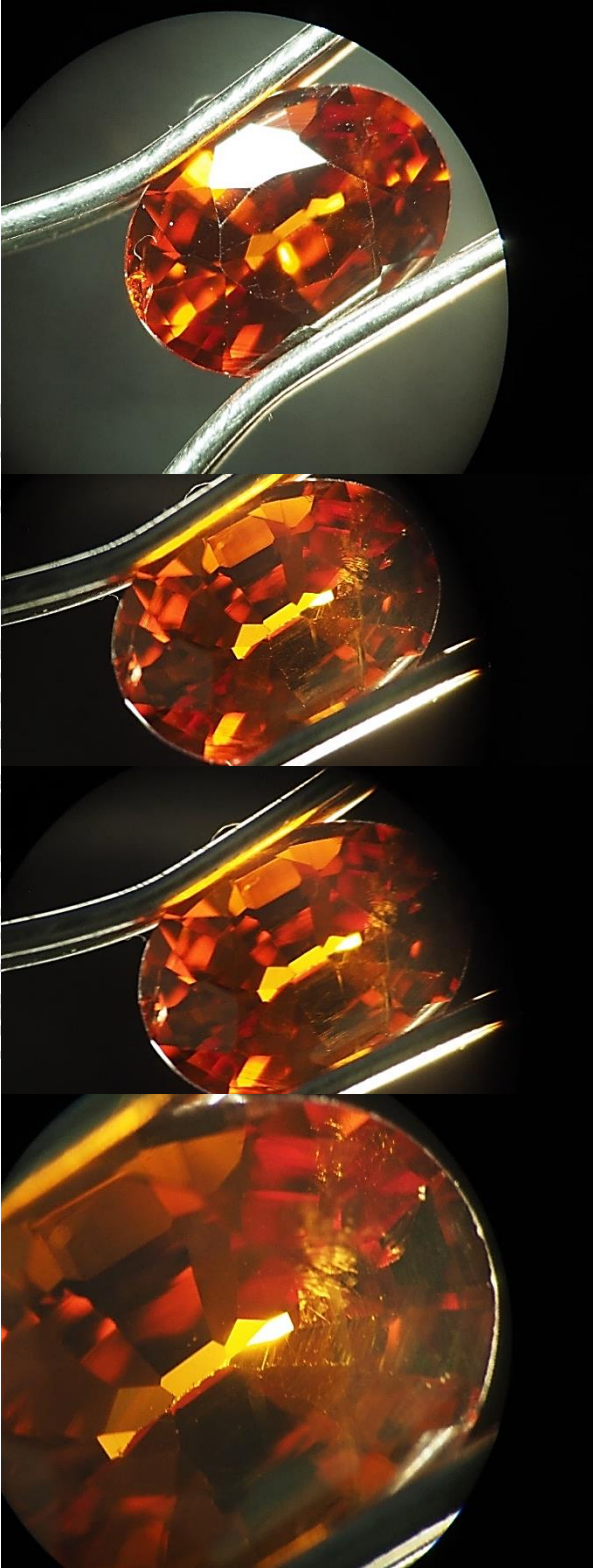
ตารางที่ 29 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างสเปสซาทีนตัวที่ 3 (SP3)

Inclusions ของ SP 3	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจาก ความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• wavy feather</li> </ul>	

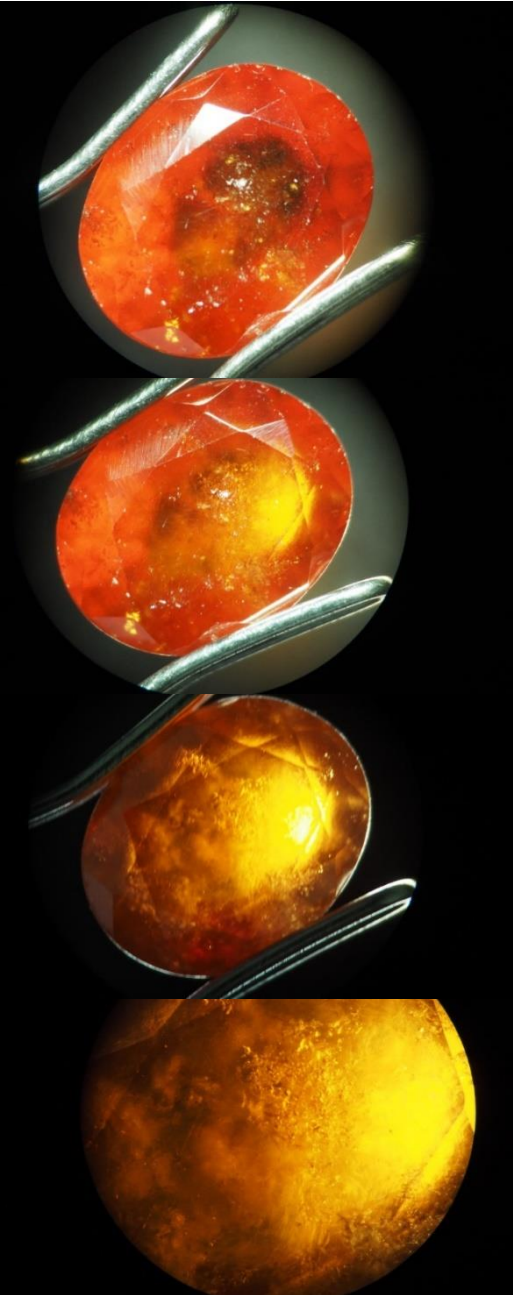
ตารางที่ 30 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างสเปสทาหินตัวที่ 4 (SP4)

Inclusions ของ SP 4	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจากความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• Crystal inclusion</li> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• wavy feather</li> </ul>	


ตารางที่ 31 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างสเปสลาหินตัวที่ 5 (SP5)

Inclusions ของ SP 5	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟุ่่น</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> <li>• เศษขนผ้า</li> <li>• รอยบิ่น</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• wavy feather</li> </ul>	

ตารางที่ 32 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างเฮนโซไนต์ ตัวที่ 1 (HE1)

Inclusions ของ HE 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oily internal</li> <li>• Granular appearance</li> <li>• Crystal inclusion</li> </ul>	

ตารางที่ 33 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างเฮนโซไนต์ ตัวที่ 2 (HE2)

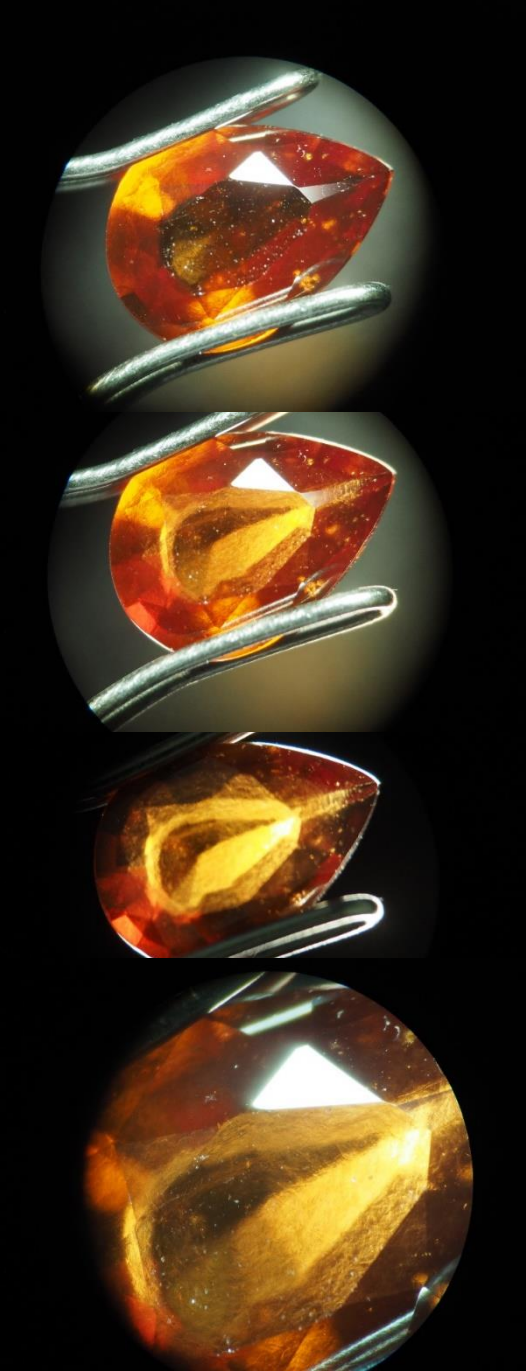
Inclusions ของ HE 2	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oily internal effect</li> <li>• Granular appearance</li> <li>• Crystal inclusion</li> </ul>	

ตารางที่ 34 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างเฮนโซไนต์ ตัวที่ 3 (HE3)


Inclusions ของ HE 3	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oily internal effect</li> <li>• Granular appearance</li> </ul>	 <p>The image displays three views of a rectangular, orange-red gemstone (hensoite) held in tweezers. The top view shows the stone's facets and a slightly granular internal texture. The middle view highlights a prominent 'oily internal effect' where light reflects off internal surfaces, giving it a shimmering, liquid-like appearance. The bottom view shows the stone from a different angle, emphasizing its color and the granular nature of its internal structure.</p>



ตารางที่ 35 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างเฮนโซไนต์ ตัวที่ 4 (HE4)

Inclusions ของ HE 4	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oily internal effect</li> <li>• Granular appearance</li> </ul>	

ตารางที่ 36 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างเฮนโซไนต์ ตัวที่ 5 (HE5)

Inclusions ของ HE 5	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• Liquid droplet</li> <li>• Oily internal effect</li> <li>• Granular appearance</li> </ul>	


ตารางที่ 37 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างทชวาไรต์ตัวที่ 1 (TS1)

Inclusions ของ TS 1	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระโน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจากความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• fibrous crystals</li> <li>• feathers</li> </ul>	

ตารางที่ 38 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างทซวาไรต์ตัวที่ 2 (TS2)

Inclusions ของ TS 2	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตก รอยบิ่น</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยแตกจากความเค้นภายใน (zircon haloes)</li> <li>• fibrous crystals</li> <li>• feathers</li> </ul>	 <p>The image displays four sequential photographs of a green zircon gemstone held by tweezers against a black background. The top photo shows the stone with a prominent white, irregular inclusion. The second photo shows a different view of the stone with a large, dark, fibrous inclusion. The third photo shows the stone with a large, white, feather-like inclusion. The bottom photo shows the stone with a large, white, irregular inclusion, similar to the top photo. A faint watermark of a hand holding a torch and the Thai text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี' is visible in the background of the images.</p>

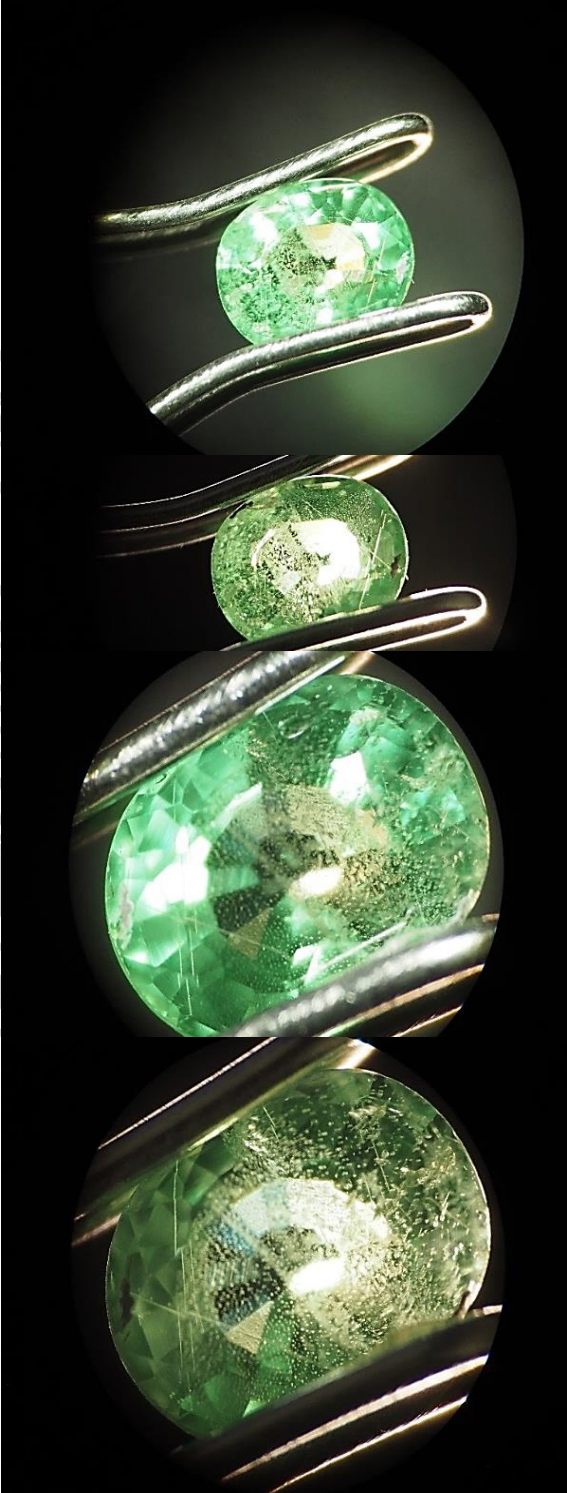
ตารางที่ 39 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างทชวาไรต์ตัวที่ 3 (TS3)

Inclusions ของ TS 3	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• เศษขนผ้า</li> <li>• รอยเจียรระโน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• fibrous crystals</li> <li>• feathers</li> </ul>	

ตารางที่ 40 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างทชวาไรต์ตัวที่ 4 (TS4)

Inclusions ของ TS 4	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• รอยเจียรระไน</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• fibrous crystals</li> </ul>	

ตารางที่ 41 ลักษณะที่ตรวจพบจากภายในและภายนอกของตัวอย่างทชวาไรต์ตัวที่ 5 (TS5)

Inclusions ของ TS 5	รูปภาพ
<p>External Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ฝุ่น</li> <li>• รอยเจียรระไน</li> <li>• รอยบิ่น รอยแตก</li> </ul> <p>Internal Inclusion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ผลึกคล้ายเข็ม (needle-like crystals)</li> <li>• fibrous crystals</li> <li>• feathers</li> </ul>	

## บทที่ 5

### อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการวิจัยหัวข้อเรื่อง “การจำแนกประเภทของอัญมณีตระกูลการ์เนตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Species Classification of the Garnet Group Gemstones Using SEM/EDX)” เป็นการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของอัญมณีตระกูลการ์เนตโดยผู้วิจัยได้เลือกใช้ตัวอย่างทั้งหมดที่ทำการตรวจสอบ จำนวน 25 ตัวอย่าง โดยเลือกตัวอย่างมา 5 ประเภทจากทั้งหมดของตระกูลการ์เนตได้แก่ ไพโรป, แอลมันดีน, สเปนซาร์ทีน, เฮสโซไนต์ และซาโวไรต์ ซึ่งใช้ประเภทละ 5 ตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้ เมื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ซึ่งทำการตรวจสอบทั้งภายใน และภายนอกของอัญมณีทั้ง 25 ตัวอย่างครบเรียบร้อย ทางผู้วิจัยได้นำมาทำการศึกษาลักษณะทางแสง และทางเคมีต่อไป เพื่อศึกษาลักษณะและแยกความแตกต่างของแต่ละประเภทโดยเลือกใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานสำหรับใช้ในการตรวจสอบความแตกต่างของธาตุทางเคมีของอัญมณีแต่ละประเภทในตระกูลการ์เนต

#### สรุปผล

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของอัญมณีตระกูลการ์เนตด้วยเครื่อง SEM/EDX สามารถนำมาใช้ในการจำแนกประเภทและชนิดของการ์เนตได้ ซึ่งสัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุมีค่าประมาณใกล้เคียงตามสูตรทางเคมีของการ์เนตแต่ละแบบ เมื่อนำปริมาณธาตุมาเขียนแผนภาพไตรภาคจะทำให้สามารถวิเคราะห์ประเภทและชนิดของตัวอย่างการ์เนตออกจากกันได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ตัวอย่างการ์เนตที่เป็นประเภทไพโรปและแอลมันดีน ซึ่งมีคุณสมบัติบางอย่างที่ซ้อนทับกัน จึงทำให้บางตัวอย่างอาจไม่สามารถใช้วิธีการนี้จำแนกออกจากกันได้

#### ข้อเสนอแนะ

1. เพิ่มตัวอย่างที่ใช้ในการตรวจสอบแต่ละประเภทให้มากกว่าเดิมเพื่อหาความแตกต่าง หรือความชัดเจนให้มากกว่าเดิม
2. เพิ่มเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบที่สามารถตรวจได้ละเอียดกว่า SEM/EDX เพื่อจำแนกหาความแตกต่าง หรือจุดที่ต่างกันของอัญมณีแต่ละประเภทให้มากขึ้น
3. เพิ่มประเภทจากอัญมณีตระกูลการ์เนตที่ใช้ในการตรวจสอบเพื่อ ความแตกต่างให้มากขึ้น



## รายการอ้างอิง

1. (องค์การมหาชน), ศ.ศ. สถิติมูลค่าการส่งออกพลอยเจียรไนและอัญมณีรัตนชาติของไทย ปี 2559 - ปี 2563. 2563 [cited เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม; Available from: <https://infocenter.git.or.th>.
2. (องค์การมหาชน), ศ. โกเมน (*Garnet*). 2552 [cited เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม; Available from: <https://www.git.or.th/garnet.html>.
3. (องค์การมหาชน), ศ. หลากหลายสีสันไปกับการ์เน็ต...อัญมณีสีแดงหนึ่งในพลอยนพเก้า. 2562 [cited เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม; Available from: [https://infocenter.git.or.th/Content\\_View.aspx?id=2554&Lang=TH&mail=1&fbclid=IwAR3UPubBobQxntMLkQ7amLpzSKFR2RJaJ\\_Q4ZdcBaY5MZAiKa7SBHlc-aZc](https://infocenter.git.or.th/Content_View.aspx?id=2554&Lang=TH&mail=1&fbclid=IwAR3UPubBobQxntMLkQ7amLpzSKFR2RJaJ_Q4ZdcBaY5MZAiKa7SBHlc-aZc)
4. Ahn, Y., Seo, J., Park, J., *Electronic and Vibrational Spectra of Tourmaline – The Impact of Electron Beam Irradiation and Heat Treatment*. *Vibrational Spectroscopy* 2013; p. 165-175.
5. Andrei, C.A., *Towards Efficient Photovoltaic Devices: Key Facts and Experiments on Dye Sensitised Solar Cells*. 2017, Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars.
6. Britain, T.G.A.o.G., *Practical Gemmology Handbook*. 2014, London.
7. Calligaro, T., Colinart, S., et al., *Combined external-beam PIXE and l-Raman characterisation of garnets used in Merovingian jewellery*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 2002; p. 320-327.
8. Central., M. *Leica S6 E Gemmological GEM Microscope 10x – 64x*. . 2020 March 20]; Available from: <https://microscopecentral.com/products/leica-s6-e-gemmological-gem-microscope-10x-64x>.
9. Cesur, S., *Gemstone Hunting*. 2020.
10. GIA. *Garnet Description*. 2020 [cited Accessed March 11; Available from: <https://www.gia.edu/garnet-description>.
11. GIA. *Garnet*. 2020 March 25]; Available from: <https://www.gia.edu/garnet>.
12. GmbH, A.K.O. *Gemstone Refractometer*. 2020 March 4]; Available from: [https://www.kruess.com/gemmology/products/gemstone-refractometers/?utm\\_source=BMON%20AdWords%20Campaigns&utm\\_medium=CPC%20Search%20Network&utm\\_campaign=Asia%2C%20Gem%20Refractometers](https://www.kruess.com/gemmology/products/gemstone-refractometers/?utm_source=BMON%20AdWords%20Campaigns&utm_medium=CPC%20Search%20Network&utm_campaign=Asia%2C%20Gem%20Refractometers).

13. Joseph, D., Lal, M., et al. , *Characterization gem stones (rubies and sapphires) by energy-dispersive x-ray fluorescence spectrometry*. *X-ray Spectrometry* 2000: p. 147-150.
14. Koivula, J.I., Hughes, Richard W. *Gem Testing with the Spectroscope*. . 2006 March 19]; Available from: <https://www.lotusgemology.com/index.php/library/articles/282-gem-testing-with-the-spectroscope-lotus-gemology>.
15. Promwongnan, S., Buathong, A. . *A Rare Nearly-Pure End-Member Grossular Garnet with Color-Change Effect*. 2018 April 25]; Available from: [https://www.git.or.th/eng/testing\\_center\\_en/lab\\_notes\\_en/glab\\_en/2018/11/Article-2711201801.pdf](https://www.git.or.th/eng/testing_center_en/lab_notes_en/glab_en/2018/11/Article-2711201801.pdf).
16. Read, P.G., *Gemmology*. 1991, Cambridge.
17. Schmetzer, K., Gilg, H. A., et al. , *The Linkage Between Garnets Found in India at the Arikamedu Archaeological Site and Their Source at the Garibpet Deposit*. *Gemmology* 2017. 35.
18. Store, G. *GIA Polariscopes*. 2020 March 18]; Available from: <https://store.gia.edu/products/gia-polariscope>.
19. กรมทรัพยากรธรณี. การ์เน็ต. 2559 [cited เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม; Available from: <http://www.dmr.go.th/main.php?filename=garnet>.
20. กระทรวงพาณิชย์, ก. ข้อมูลสถานการณ์ส่งออกสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับ (มกราคม-สิงหาคม 2562). 2562 [cited เข้าถึงเมื่อ 15 มกราคม; Available from: [https://ditp.go.th/ditp\\_web61/article\\_sub\\_view.php?filename=contents\\_attach/565590/565590.pdf&title=565590&cate=791&d=0](https://ditp.go.th/ditp_web61/article_sub_view.php?filename=contents_attach/565590/565590.pdf&title=565590&cate=791&d=0).
21. มหาวิทยาลัยมหิดล, ศ. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 2546 24 มีนาคม]; Available from: <https://il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณิชา ทองอ่อน
วัน เดือน ปี เกิด	12 มิถุนายน 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลนครปฐม
วุฒิการศึกษา	ระดับปริญญาตรี เอกวิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	162/4 ม.7 ตำบลมาบแค อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000

