



# โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนาม  
กับการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาพร้อมกับเบริลเลียม

โดย

นายณัฐชนนท์ สีทองสุด  
เลขประจำตัวนิสิต 5732723423

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี  
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการนี้เป็นได้ในการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

พลอยแซ่ปไฟร์สี่เขี้ยวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามกับการเปลี่ยนแปลง

หลังการเผาพร้อมกับเบริลเลียม

นายณัฐชนนท์ สีทองสุด

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

YELLOWISH GREEN SAPPHIRES FROM SOUTHERN VIETNAM AND THEIR  
ALTERATION AFTER BERYLLIUM-ASSISTED HEATING

Mr. Natchanon Seethornsud

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology  
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University  
Academic Year 2017

หัวข้อโครงการ	พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามกับการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาพร้อมกับเบริลเลียม
โดย	นายณัฐชนนท์ สีทองสุด
สาขาวิชา	ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์

---

ณัฐชนนท์ สีทองสุด: พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามกับการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาพร้อมกับเบริลเลียม (YELLOWISH GREEN SAPPHIRES FROM SOUTHERN VIETNAM AND THEIR ALTERATION AFTER BERYLLIUM-ASSISTED HEATING) อ.ที่ปริกษชาติวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, 75 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งเป็นพลอยแซปไฟร์จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นพื้นฐาน และขั้นสูงจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) เป็นการพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยตัวอย่างพลอยแซปไฟร์มีความสัมพันธ์กับการปะทุของหินอัลคาไลบะซอลต์ที่กระจายตัวอยู่ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งสิ้น 32 ตัวอย่าง เนื้อพลอยค่อนข้างชุ่ม มีรอยแตกภายในค่อนข้างมาก และมีมลทินภายในที่เห็นชัด ไม่แสดงการเรืองแสงภายใต้แสงเหนือม่วงช่วงคลื่นยาวและคลื่นสั้น พบมลทินผลึกเนกาทีฟ, ผลึกแร่ซ้อนภายใน แถบการเจริญเติบโตของผลึกพบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินรอยแตกผลึกหลายนิ้วมือได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบมลทินผลึกแร่หลอมละลายและมลทินลักษณะคล้ายสปริงหรือท่อขุดไปมาภายในตัวอย่างพลอยที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์พบธาตุหลักคือ  $Al_2O_3$  และมีธาตุเหล็กออกไซด์ที่เป็นธาตุร่องรอยรองลงมา การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดพบว่า การดูดกลืน OH Group ที่ตำแหน่ง  $3620$  และ  $3697\text{ cm}^{-1}$  และ การดูดกลืน CH – Stretching ที่ตำแหน่ง  $2850$  และ  $2915\text{ cm}^{-1}$  ไม่เด่นชัด หลังการปรับปรุงคุณภาพไม่พบลักษณะการตกห้องข้างบริเวณช่วงการดูดกลืน OH Group การดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงการมองเห็นช่วงใกล้อินฟราเรด แสดงยอดการดูดกลืน  $Fe^{3+}$  ที่ความยาวคลื่น  $450\text{ nm}$  สูงขึ้นและแสดงการดูดกลืน  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  น้อยลงที่ความยาวคลื่น  $450-700\text{ nm}$  แสดงการดูดกลืน  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  ลดลงที่ความยาวคลื่น  $450-700\text{ nm}$  แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $Fe^{2+}$  ไปเป็น  $Fe^{3+}$  เพิ่มขึ้น ทำให้สีเขียวอมเหลืองที่เกิดจาก  $Fe^{3+}$  และ intervalence charge Transfer ของ  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  กลายเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่า เมื่อปริมาณ  $Mg^{2+} + Be^{2+}$  มากกว่าปริมาณ  $Ti^{4+} + Si^{4+}$  จะเกิด trapped-hole color center เนื่องจาก  $Be^{2+}$  และ  $Mg^{2+}$  ทำให้เกิดสีเหลือง

# # 5732723423: MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS: SAPPHIRES / BERYLLIUM TREATED / SOUTHERN VIETNAM / MINERAL  
INCLUSIONS

NATCHANON SEETHORNSUD: YELLOWISH GREEN SAPPHIRES FROM SOUTHERN  
VIETNAM AND THEIR ALTERATION AFTER BERYLLIUM-ASSISTED HEATING.

ADVISOR: ASSOC. PROF.CHAKKAPHAN SUTTHIRAT, Ph.D., 75 pp.

The objective of this research is to study characteristics of Yellowish Green Sapphires from Southern Vietnam and their alteration after being heated with beryllium. Basic and advanced gem-testing instruments from The Gem and Jewelry Institute of Thailand were used for this study. The main aim of this study is to develop database for further investigation of sapphires after being heated with beryllium beryllium-assisted heating. The origin of sapphires from Southern Vietnam is from Alkali Basal, which is distributed in Southern Vietnam. Thirty two sapphire samples under this study are opaque with obvious internal cracks and crystal inclusions. Their luminescences are inert under long wave and short wave UV lamps. Inclusions are identified as negative crystal, two-phase inclusion. Growth line and fingerprint are changed in different shapes. In addition, crystals melt and spring-like inclusion were found in the sample of sapphires after being heated with beryllium. Curve absorption was not found at OH Group range. UV-VIS-NIR  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  absorption is at 450-700 nm, indicating a change in  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  As  $Fe^{3+}$  increased, which made Yellowish green color of  $Fe^{3+}$  and  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  intervalence charge transfer become more yellowish. It is assumed that when  $Mg^{2+} + Be^{2+}$  content is greater than  $Ti^{4+} + Si^{4+}$ , a trapped-hole color center is formed as  $Be^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  produce yellow color.

## กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย) ผู้คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตั้งแต่เริ่มวางแผนโครงการดำเนินการวิจัย วางแผนการทำงานที่เป็นขั้นตอน ตามลำดับความสำคัญ ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ และการอภิปรายผลร่วมกับผลการวิเคราะห์ รวมถึงติดตามการทำงาน และให้กำลังใจ อีกทั้งยังช่วยแก้ไข ปัญหา และข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดการทำงาน ทำให้โครงการวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ตามเวลาที่คาดหวังไว้ จึงขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พิษณุพงศ์ กาญจนพยนต์ที่คอยชี้แนวทางการทำงาน ให้ความรู้ข้อมูลที่สำคัญ และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้งานดีขึ้น

ขอขอบคุณนางสาวนาตยา นิลฮัต, นายทัศนรา ศรีปุ่นจัน, นางสาวซาร่าห์ กัฟฟาร์ และ พี่ๆ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่คอยสอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ให้ความรู้ และคำแนะนำ รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์ ตลอดการดำเนินโครงการวิจัย นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ และบุคลากร ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมไปถึงบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยเล่มนี้เป็นผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ณ
สารบัญตาราง	ต
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 พื้นที่ศึกษา	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การเผาผลายด้วยสารเบริลเลียมและเทคนิคการตรวจสอบ	4
2.2 ธรณีวิทยาและการเกิดของพลอยในพื้นที่การศึกษา	7
2.3 ลักษณะทั่วไปของพลอยแซปไฟร์ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม	8
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ	12
บทที่ 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผล	
4.1 ลักษณะทั่วไป	17
4.2 มลทินภายใต้กล้องจุลทรรศน์	18
4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)	24
4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	25
4.5 องค์ประกอบทางเคมี	27



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 อภิปรายผล และสรุปผล	29
เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก ก	37
ภาคผนวก ข	41
ภาคผนวก ค	46
ภาคผนวก ง	49

## สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของหินบะซอลต์อัลคาไลน์ (สีน้ำเงิน) ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม (จาก <a href="https://i.pinimg.com/">https://i.pinimg.com/</a> )	3
รูปที่ 2.1.1	รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะขอบพลอยสีเหลืองของพลอยแซปไฟร์สีชมพูที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (GIT ISSUE 1/2009)	4
รูปที่ 2.1.2	รูปที่ 2.2 มลทินผลึกแร่ที่หลอมละลายจากความร้อนสูง เนื่องจากการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (GIT ISSUE 1/2009)	4
รูปที่ 2.1.3	แสดงลักษณะการตกผลึกใหม่ ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)	5
รูปที่ 2.1.4	แสดงลักษณะมลทินรอยแตกรูปจาน ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)	5
รูปที่ 2.1.5	แสดงลักษณะมลทินที่มีลักษณะเรียงตัวกันคล้ายตะขาบ ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)	5
รูปที่ 2.1.6	แสดงลักษณะมลทินขนาดเล็กที่มีการเรียงตัวเป็นวงกลม ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)	5
รูปที่ 2.1.7	แสดงลักษณะมลทินขนาดเล็กที่มีการเรียงตัวเป็นวงกลม ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)	6
รูปที่ 2.1.8	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (GIT ISSUE 1/2009)	6
รูปที่ 2.7	สเปกตรัมของไพไลน์ที่ผ่านการเผาแบบใส่ธาตุเบริลเลียม (Be) จาก Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (GIT ISSUE 1/2009)	7

## สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา	10
รูปที่ 3.2.1	เครื่อง Hydrostatic Balance และน้ำยาจากสถาบันวิจัยและพัฒนา อัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	12
รูปที่ 3.2.2	เครื่อง Refractometer และน้ำยาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและ เครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	12
รูปที่ 3.2.3	ตู้ UV Lamp จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	13
รูปที่ 3.2.4	กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope) จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	13
รูปที่ 3.2.5	เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูปที่ 3.2.6	เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนา อัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูปที่ 3.2.7	เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100 จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	15
รูปที่ 2.16	เครื่อง LIBS โดย LTB Lasertechnik Berlin จากสถาบันวิจัยและ พัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	16
รูปที่ 4.1	ภาพตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม	17
รูปที่ 4.2.1	รอยแตกบริเวณผิวพลอยของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ	20

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
	40x (NH9)	
รูปที่ 4.2.2	มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึกของพลอยแซปไฟร์สีเขียว	20
	อมเหลืองธรรมชาติ 50x (NH8)	
รูปที่ 4.2.3	รอยแตกบริเวณผิวพลอยของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	
	50x (SVT17)	
รูปที่ 4.2.4	มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึกของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง	20
	คุณภาพ 50x (SVT21)	
รูปที่ 4.2.5	ผิวหน้าพลอยที่ผ่านความร้อนสูงของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง	21
	คุณภาพ 50x (SVT6)	
รูปที่ 4.2.6	การตกผลึกซ้ำบริเวณผิวของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง	21
	คุณภาพ 50x (SVT10)	
รูปที่ 4.2.7	รูปที่ 4.2.7 มลทินผลึกเนกาทีฟของพลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลือง	21
	ธรรมชาติ 50x (NH7)	
รูปที่ 4.2.8	รูปที่ 4.2.8 มลทินผลึกเนกาทีฟของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับ	21
	ปรุงคุณภาพ 50x (SVT8)	
รูปที่ 4.2.9	มลทินผลึกแร่ ที่มีมลทินผลึกแร่ซ่อนอยู่ใน ของพลอยแซปไฟร์สีเขียว	
	อมเหลืองธรรมชาติ 50x (NH5)	22
	และพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	
รูปที่ 4.2.10	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือของพลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลือง	22
	ธรรมชาติ 40x (NH6)	

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.2.11	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 40x (SVT2)	22
รูปที่ 4.2.12	มลทินผลึกแร่หลอมละลายของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ภาพ 50x (SVT2)	23
รูปที่ 4.2.13	มลทินผลึกแร่หลอมละลายของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ภาพ 50x (SVT2)	23
รูปที่ 4.2.14	มลทินเรียงตัวคล้ายเส้นด้ายของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (HT_SVT10)	23
รูปที่ 4.2.15	มลทินเรียงตัวคล้ายเส้นด้ายของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (HT_SVT10)	23
รูปที่ 4.2.16	มลทินเรียงตัวหอคคล้ายสปริงของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT28)	23
รูปที่ 4.3.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านและความยาวคลื่นจาก เครื่อง FTIR ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ (NH10)	24
รูปที่ 4.3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านและความยาวคลื่นจาก เครื่อง FTIR ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (SVT4)	25
รูปที่ 4.4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างๆและ ความยาวคลื่นจากเครื่อง UV-VIS-NIR ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลือง ธรรมชาติ (NH1)	26
รูปที่ 4.4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างๆและความ ยาวคลื่นจากเครื่อง UV-VIS-NIR ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	26

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
	ภาพ (HT_SVT3)	
รูปที่ 4.5.1	สรุปผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS ของพลอยแซปไฟร์	28
รูปที่ 4.5.2	สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม สรุปผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS พลอยแซปไฟร์สีเหลือง จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม	28
รูปที่ 5.1	แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์โดยใช้ความเข้มข้นของ Fe และ Ga/Mg (Peucat et al., 2007)	
รูปที่ 5.2	แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์โดยใช้ อัตราส่วนของ Cr/Ga และ Fe/Ti (Sutherland et al., 1998)	30
รูปที่ 5.3	แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์โดยใช้ $FeO + TiO_2$ $+ Ga_2O_3$ และ $FeO-Cr_2O_3-MgO-V_2O_3$ (Giuliani et al., 2014)	31
รูปที่ 5.4	ซึ่งแสดงความสัมพันธ์รูปเปลี่ยนสีด้านของธาตुर่องรอยในระบบ Al-Fe-Mg-Ti (Häger, 2001)	34

## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	แสดงลักษณะทั่วไปของพลอยแซปไฟร์ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม  (Smith et al., 1995)	8
ตารางที่ 4.1	สรุปลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์  สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ	18
ตารางที่ 4.2	สรุปลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอย  แซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	18
ตารางที่ 4.3	สรุปลักษณะมลทินที่พบในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลือง  ธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	19
ตารางที่ 4.4	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์  สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ	27
ตารางที่ 4.5	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์  ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม	27
ตารางที่ 5.1	สรุปลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงคุณภาพ  โดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม	33

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

รัตนชาติ หมายถึง แร่หรือหินบางชนิด หรืออินทรีย์วัตถุธรรมชาติที่นำมาเจียรระโน ตกแต่ง หรือ แกะสลัก เพื่อใช้เป็นเครื่องประดับ มีความงาม ทนทาน และหายาก พลอยบุษราคัม (yellow sapphire) เป็นหนึ่งในรัตนชาติที่ได้รับความนิยมสูงเป็นพลอยในตระกูลคอร์รันดัม (corundum) ที่มีความแข็งตามโมห์สเกล เท่ากับ 9 ซึ่งแข็งเป็นรองเพชรเท่านั้น องค์ประกอบทางเคมีของคอร์รันดัมเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) และมีรูปผลึกอยู่ในระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ซึ่งพลอยคอร์รันดัมแต่ละชนิดจะมีสีแตกต่างกัน เนื่องจากธาตุเจือปน เช่น โครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) เป็นธาตุเจือปน ให้สีแดง เรียกคอร์รันดัมสีแดงนี้ว่า ทับทิม (ruby) ส่วนคอร์รันดัมสีอื่นๆ จะเรียกว่าแซปไฟร์ (sapphire) เนื่องจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันอย่างหลากหลายของพลอยคอร์รันดัม ส่งผลให้พลอยจากแต่ละแหล่งกำเนิด มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันออกไป เช่น ลักษณะทางกายภาพ สี การเรืองแสง มลทินภายใน ธาตุร่องรอย (trace elements) โดยเฉพาะชนิดของมลทินที่โดดเด่นในแต่ละแหล่งกำเนิด (สุพร อินทโสภา และคณะ, 2545)

พลอยบุษราคัม และแซปไฟร์ชนิดอื่นพบการเกิดเป็นแหล่งแร่ใหญ่ๆ 2 แบบ คือ แหล่งแร่ที่มีการกำเนิดแบบปฐมภูมิ และแหล่งแร่ที่มีการกำเนิดแบบทุติยภูมิ โดยแหล่งพลอยที่มีการกำเนิดแบบปฐมภูมิมักเป็นพลอยที่พบอยู่กับหินต้นกำเนิด เช่น หินอัคนีแทรกซอน หินแปร และหินภูเขาไฟชนิดหินแอลคาไลน์บะซอลต์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยกระบวนการต่างๆทางธรณีวิทยา ส่วนแหล่งแร่ที่มีการกำเนิดแบบทุติยภูมิมักสัมพันธ์กับการผุพังสลายตัวของเนื้อหินต้นกำเนิด และมีการพัดพาไปสะสมตัวเป็นแหล่งพลอยแหล่งใหม่ (สุพร อินทโสภา และคณะ, 2545)

ในปัจจุบันธุรกิจอัญมณี สิ้นสุดส่งผลกระทบต่อการประเมินราคาของตัวพลอยเป็นอย่างมาก อีกทั้งสิ้นนั้นเกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติหรือเกิดจากการปรับปรุงคุณภาพก็ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อการประเมินราคาตัวพลอยทั้งสิ้น ซึ่งการปรับปรุงคุณภาพของพลอยที่เราสนใจและได้รับความนิยมในปัจจุบันคือการเผาพลอยโดยการเติมสารประกอบเบริลเลียมเข้าไปในกระบวนการเผา ซึ่งเรียกว่าการเผาใหม่ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามหลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับเบริลเลียม

เนื่องด้วยพลอยแซปไฟร์จากตอนใต้ของเวียดนามนั้นถือเป็นหนึ่งในแหล่งแร่ที่สำคัญและได้รับความนิยม ดังนั้นการศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามหลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับเบริลเลียม นำไปสู่การสร้างฐานข้อมูลในการตรวจสอบพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับเบริลเลียม



## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนาม หลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับเบริลเลียม

## 1.3 สมมติฐาน

พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามหลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับเบริลเลียม จะแสดงลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมีที่เปลี่ยนแปลงไป

## 1.4 ขอบเขตการศึกษา

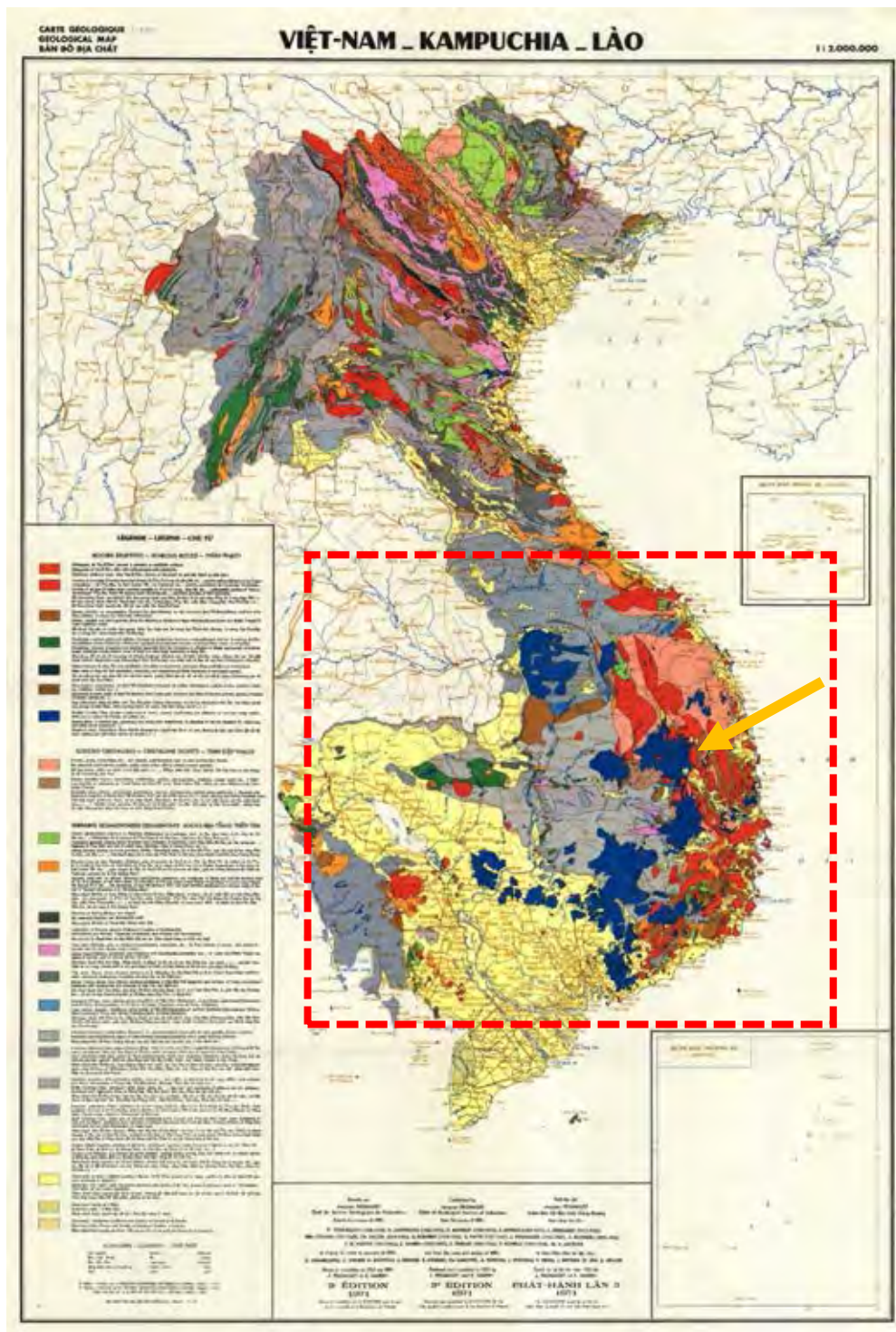
ศึกษาตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองที่ยังไม่ผ่านการเผาพร้อมกับเบริลเลียมและพลอยแซปไฟร์ ที่ผ่านการเผาพร้อมกับเบริลเลียม จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม จำนวน 30 ตัวอย่าง โดยศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะทางอัญมณีของพลอย ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ลักษณะทางแสง (optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) โดยใช้เครื่องมือทางอัญมณีขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือทางอัญมณีขั้นสูง

## 1.5 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ตั้งอยู่ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม ซึ่งเป็นพลอยแซปไฟร์ที่ได้จากหินอัลคาไลนบะซอลต์ (รูปที่ 1.1) ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา พบการกระจายตัวของหินอัลคาไลนบะซอลต์ได้ทั่วไปทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม ซึ่งเหมาะแก่การทำเหมืองพลอย ประกอบไปด้วยพลอยแซปไฟร์ชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. การเปลี่ยนแปลงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามหลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับเบริลเลียมเพื่อนำไปสู่การพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับการสนับสนุนการตรวจสอบพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับเบริลเลียม
2. เรียนรู้วิธีการใช้เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์อัญมณีทั้งเครื่องมือตรวจสอบอัญมณีขั้นพื้นฐานและเครื่องมือวิเคราะห์อัญมณีขั้นสูง
3. ทักษะในการทำงานวิจัย



รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะการกระจายตัวของหินบะซอลต์อัลคาไลน์ (สีน้ำเงิน) ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม (จาก <https://i.pinimg.com/>)

## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การเผาผลายด้วยสารเบริลเลียมและเทคนิคการตรวจสอบ

ในทางธรณีวิทยานั้นมีแหล่งแร่ที่ให้พลอยแซฟไฟร์อยู่มากมายหลายแห่งทั่วโลก แต่กลับพบพลอยคุณภาพสูงที่ใช้เป็นอัญมณีและเครื่องประดับอยู่น้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่พบ ดังนั้นผู้ประกอบการจึงคิดค้นและหาวิธีการปรับปรุงคุณภาพทำให้พลอยเหล่านี้สวยงามและเป็นการเพิ่มมูลค่าพลอยตามที่ตลาดต้องการในขณะนั้น โดยมีวิธีการต่างๆมากมาย ซึ่งมีการคิดและพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน

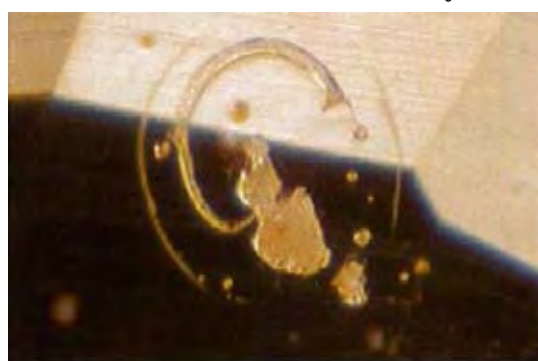
เมื่อประมาณปีพ.ศ. 2545 มีการคิดค้นวิธีการเผาผลายแบบใหม่เกิดขึ้น คือการเผาผลายโดยมีการใส่สารธาตุเบริลเลียม (Be) ลงในการเผา ซึ่งธาตุเบริลเลียม (Be) อาจจะมาจกพลอยคริสโซเบริล (Chrysoberyl) หรือเป็นสารประกอบอื่นที่มีเบริลเลียม (Be) โดยตรง

โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ได้อธิบายเทคนิคการตรวจสอบพลอยคอร์ันดัมที่ถูกเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (Be) โดยการตรวจสอบเบื้องต้นนำพลอยมาทำการจุ่มในสารเมทิลีนไอโอดายน์จะพบว่าขอบพลอยแสดงลักษณะสีเหลืองในขณะที่ส่วนกลางของพลอยยังคงเป็นสีชมพู

(รูปที่ 2.1.1) แต่ในปัจจุบันเทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาจนในหลายๆกรณีไม่สามารถตรวจสอบได้อีกต่อไป หลักฐานของการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมอีกส่วนหนึ่งคือการสังเกตลักษณะมลทินภายในพลอย เช่น มลทินผลึกแร่ที่หลอมละลายจากความร้อนสูง (รูปที่ 2.1.2) และพื้นผิวที่แสดงลักษณะของการตกผลึกใหม่ (รูปที่ 2.1.3)

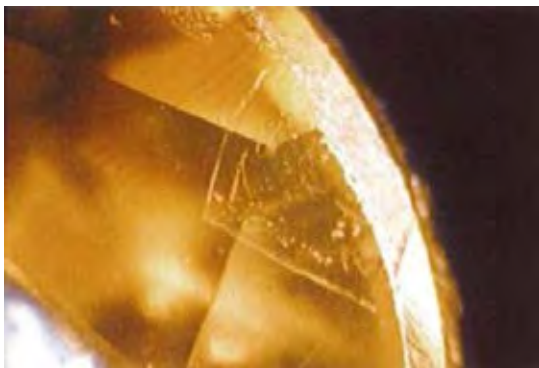


รูปที่ 2.1.1 แสดงลักษณะขอบพลอยสีเหลืองของพลอยแซฟไฟร์สีชมพูที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (GIT ISSUE 1/2009)



รูปที่ 2.1.2 มลทินผลึกแร่ที่หลอมละลายจากความร้อนสูง เนื่องจากการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (GIT ISSUE 1/2009)

มลทินอีกชนิดหนึ่งที่มักพบในพลอยคอร์ริมดัมที่เผาพร้อมกับสารเบริลเลียม เช่น มลทินรอยแตกรูปจาน (รูปที่ 2.1.4) มลทินที่มีลักษณะเรียงตัวกันคล้ายตะขาบ (รูปที่ 2.1.5) มลทินขนาดเล็กที่มีการเรียงตัวเป็นวงกลม (รูปที่ 2.1.6) หรือผลึกแร่หลอมละลายที่มีมลทินขนาดเล็กล้อมรอบอยู่ในพลอย (รูปที่ 2.1.7) อย่างไรก็ตามหลักฐานที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นเพียงการตรวจสอบทางอ้อมในการตรวจสอบเท่านั้น



รูปที่ 2.1.3 แสดงลักษณะการแตกผลึกใหม่ ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)



รูปที่ 2.1.4 แสดงลักษณะมลทินรอยแตกรูปจานของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)

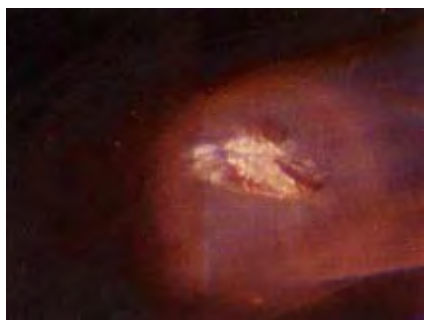


รูปที่ 2.1.5 แสดงลักษณะมลทินที่มีลักษณะเรียงตัวกันคล้ายตะขาบ ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)



รูปที่ 2.1.6 แสดงลักษณะมลทินขนาดเล็กที่มีการเรียงตัวเป็นวงกลม ของพลอยที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)





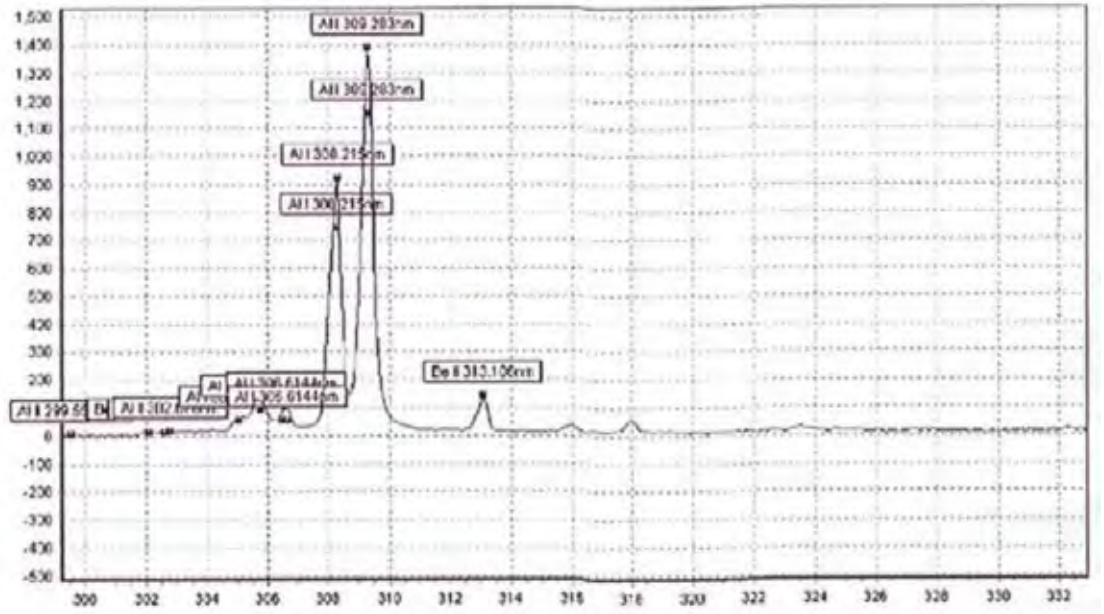
รูปที่ 2.1.7 แสดงลักษณะผลึกแร่หลอมละลายที่มี  
มลทินขนาดเล็กล้อมรอบอยู่ในพลอย ของพลอยที่ผ่าน  
การเผาด้วยความร้อนสูง (GIT ISSUE 1/2009)

ในการตรวจสอบหาธาตุเบริลเลีย(Be)

โดยตรงนั้น เนื่องจากธาตุเบริลเลียมเป็นธาตุเบาอยู่ในหมู่ II เครื่อง EDXRF ไม่สามารถที่จะตรวจสอบได้ เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบคือ Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (รูปที่ 2.1.8) เครื่องจะทำการตรวจโดยใช้ laser ยิงไปที่ผิวพลอยทำให้เกิดรอยขนาดเล็กระดับไมครอนและทำให้เกิดการเปล่งแสงของธาตุขึ้นเนื่องจากพลังงานจาก laser หมดลงอิเล็กตรอนก็จะย้ายจาก excited state ไปสู่ ground state ก็จะมีการปล่อยพลังงานออกมานั้นก็คือเกิดการ emission การวิเคราะห์เครื่องจะมี optical เป็นตัวรับแสงแล้วส่งผ่านไปยัง spectrometer เพื่อขยายสัญญาณที่เกิดขึ้นและประมวลผลออกมาเป็นสเปคตรัม (รูปที่ 2.1.9) ซึ่งธาตุในแต่ละตัวนั้นจะมีการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันออกไปจึงทำให้วิเคราะห์หาธาตุต่างๆได้ออกมาเป็นเชิงคุณภาพ และ Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) การวิเคราะห์เครื่องจะใช้ laser เป็นตัว sample introduction หลังจากทีตัวอย่างระเหยเป็นไอขึ้นมา ก็จะเข้าสู่ในส่วนของ Inductively Coupled Plasma (ICP) ตัว ICP จะเผาไอระเหยที่เข้ามาด้วยอุณหภูมิ 6,000-8,000 องศาเซลวิน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) แล้วผ่านเข้าสู่ในส่วนของ Mass Spectrometry (MS) ซึ่งเป็นตัววิเคราะห์ข้อมูลที่มีความละเอียดสูง สามารถวัดได้ในระดับหนึ่งในพันล้านส่วน (ppb) สามารถที่จะวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ



รูปที่ 2.1.8 Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)  
(GIT ISSUE 1/2009)



รูปที่ 2.1.9 สเปกตรัมของโพลินที่ผ่านการเผาแบบใส่ธาตุเบริลเลียม (Be) จาก Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) (GIT ISSUE 1/2009)

## 2.2 ธรณีวิทยาและการเกิดของพลอยในพื้นที่การศึกษา

ธรณีวิทยาทั่วไปทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม พลอยแซปไฟร์มีลักษณะคล้ายกับหินบะซอลต์อัลคาไลน์อื่นๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และจีน เช่น Mingxi ในจังหวัด Fujian (Keller and Keller, 1986) Penglai บนเกาะ Hainan (Wang, 1988) Changle จังหวัด Shandong ในประเทศจีน (Guo et al., 1992b) ซึ่งแร่ในพื้นที่เหล่านี้พบว่าการสะสมตัวแบบตะกอนน้ำพา (Alluvial deposits) ซึ่งเกิดจากกระบวนการผุพังของตะกอนและยังคงสภาพของแร่ที่มีความแข็งแรงเอาไว้ เช่น เซอร์คอน สปิเนล และการ์เน็ต เป็นต้น

กระบวนการทางภูเขาไฟที่เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 13 ล้านปีก่อน ส่งผลให้หินบะซอลต์อัลคาไลน์ที่มีพลอยคอร์รัมด์มโผล่และปรากฏบนพื้นผิวโลกซึ่งพบได้ในปัจจุบัน (see, e.g., Barr and Macdonald, 1981) ในช่วงกลางมหายุคมีโซโซอิก และ ช่วงปลายมหายุคมีโซโซอิก (ประมาณ 37 ล้านปีที่แล้ว) ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปรากฏลักษณะของรอยเลื่อน ที่เลื่อนเป็นบล็อก (Block faulting) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึง (Regional tension) มีลักษณะทางธรณีวิทยาดั้งเดิมที่แผ่นดินตรงกลางถูกรอยเลื่อนขนานทั้งสองข้าง ดึงให้ทรุดต่ำลงเป็นกรaben (Graben) ในส่วนนี้ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามอาจกล่าวได้ว่าประกอบด้วยหลายส่วนจากที่ราบสูงที่ถูกกัดกร่อนคั่นด้วยหุบเขา (Trough-like valleys) กระบวนการทางภูเขาไฟตามแนวปะการังส่งผลให้เกิดหินบะซอลต์ กระจายตัวปกคลุมพื้นที่อย่างกว้างขวาง

แอ่ง (Depressions) บริเวณนี้ไม่เพียงแต่เต็มไปด้วยหินบะซอลต์แต่พบทั้งหินตะกอนอื่นๆ รวมไปถึงพลอยคอร์รัมด์ ที่ได้มาจากการผุพังของหมวดหิน (Rock formations) ในบริเวณที่มีความชันสูง (i.e., the upraised fault blocks; Barr and Macdonald, 1981)

บะซอลต์ (Basalt) เป็นคำทั่วไปที่ใช้เรียกหินอัคนีบาดาลสีดำ หินเมฟิก (ซึ่งมีธาตุเหล็กและแมกนีเซียมสูง) ซึ่งประกอบด้วยแร่แพลจิโอเคลสที่มีแคลเซียมสูง และโคลโนไฟรอกซีนที่มีแคลเซียมสูง ซึ่งแบ่งประเภทของบะซอลต์ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ หินบะซอลต์โธลีโอต์ (Tholeiite) และ หินบะซอลต์อัลคาไลน์ (Alkali) ในบริเวณที่เกิดหินบะซอลต์มากกว่าหนึ่งชนิด เช่นทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามและที่อื่นๆในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยปกติจะพบสาย tholeiite ที่มีอายุแก่กว่า และพบ alkali ที่มีอายุอ่อนกว่า

คอร์รัมดัมที่พบในพื้นที่การศึกษา พบเฉพาะคอร์รัมดัมที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์อัลคาไลน์เท่านั้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหินบะซอลต์ทั้งหมด มีลักษณะความเป็นอัลคาไลน์สูง ( $>3-5 \text{ wt.}\% \text{ Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) และมีความเป็นซิลิกาต่ำ ( $40-50 \text{ wt.}\% \text{ SiO}_2$ ) (see, e.g., Levinson and Coolz, 1994)

หินชนิดบะซอลต์ที่เกิดขึ้นบริเวณเนื้อโลกส่วนบน โดยกระบวนการหลอมละลายบางส่วน (Partial melting) จากชนิดของหินบะซอลต์ที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท หินบะซอลต์อัลคาไลน์ทั่วไปเกิดในระดับความลึก(ประมาณ 60-120 กิโลเมตร) ที่มากกว่าหินบะซอลต์โธลีโอต์ (ประมาณ 20-80 กิโลเมตร) นอกจากนี้หินบะซอลต์อัลคาไลน์มักจะพบหินแปลกปลอม (Xenoliths) และผลึกแปลกปลอม (Xenocrysts) มากมาย ซึ่งมีคอร์รัมดัมหรือพลอยแซปไฟร์อื่นๆ เป็นผลึกแปลกปลอมที่ถูกนำพาจากชั้นเนื้อโลกสู่พื้นผิวโลก (see, e.g., Levinson and Coolz, 1994)

### 2.3 ลักษณะทั่วไปของพลอยแซปไฟร์ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม

พบว่าลักษณะของพลอยแซปไฟร์ที่กระจายตัวที่พบโดยทั่วไปทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามนั้น แสดงคุณสมบัติการดูดกลืนคลื่นแสง 450nm (strong, broad) 460nm (moderate to strong, broad) และ 469nm (weak to moderate, broad) และยังแสดงคุณสมบัติทางอัญมณีอื่นๆอีก ซึ่งสรุปไว้ในตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะทั่วไปของพลอยแซปไฟร์ทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม (Smith et al., 1995)

Properties	Observation
Color	Weak to highly saturated colors ranging from blue to bluish green, with tones from light to extremely dark
Clarity	Very clean to heavily included, most in the range of slightly to moderately included
Refractive index	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>n_e = 1.760 - 1.764</math></li> <li>• <math>n_o = 1.769 - 1.772</math></li> </ul>
Birefringence	0.008-0.009
Optic character	Uniaxial negative
Specific gravity	3.99-4.02
Pleochroism	Strong dichroism: blue to violetish blue parallel to the c-axis and mostly green-blue to yellow-green perpendicular to the c-axis
Fluorescence to UV radiation	Inert to long- and short-wave
Optical absorption spectrum (nm)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 450 (strong, broad)</li> <li>• 460 (moderate to strong, broad)</li> <li>• 469 (weak to moderate, broad)</li> </ul>
Internal features	<p>Strong color zoning, prominent growth structures, laminated twinning, very fine grained clouds, several types of cloud patterns, various needle-like inclusions, "fingerprints," and negative crystals and crystalline inclusions of :</p> <p>Plagioclase feldspar (Na, Al, Si   K, Ca)            Uranpyrochlore (Nb, U, Ca, Ti, Ta, Na   Fe)            Columbite (Nb, Fe, Mn   Ta, Ti)            Zircon (Zr, Si   Hf)            Ilmenite (Fe, Ti   Mn[?])            Pyrrhotite (Fe, S)            Magnetite-hercynite (spinel),            (Fe, Al   Si, Ti, Mn Zn)            Chromite-hercynite (spinel) (Fe, Cr, Al)            Goethite (XRD)            Kaolinite (IR spectroscopy)</p>



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

สำหรับโครงการวิจัยในหัวข้อ “พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองจากตอนใต้ของเวียดนามกับการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาพร้อมกับเบริลเลียม” ได้แบ่งลำดับขั้นตอนวิธีวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา ดังรูป 3.1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

### 3.1.1. รวบรวม ศึกษา และประมวลผลข้อมูลทางด้านทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวบรวม ศึกษา และประมวลผลจากหนังสือ รายงาน เอกสาร และงานวิจัยเก่า ที่ศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพของพลอยแซปไฟร์ด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม และกระบวนการทางธรณีวิทยา บริเวณที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาพลอยแซปไฟร์จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม ไปจนถึงศึกษาการเลือกใช้เครื่องมือและวิธีการที่จะนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ศึกษา ลักษณะของพลอยแซปไฟร์จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม เพื่อสามารถนำมาประยุกต์เป็นข้อมูลเบื้องต้น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ และได้มาซึ่งผลสรุปที่น่าเชื่อถือ มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

### 3.1.2. วางแผนการดำเนินงาน คัดเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างพลอยเพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือขั้นสูง

คัดเลือก และจัดเตรียมตัวอย่างพลอย โดยเลือกตัวอย่างแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จากพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามจำนวน 32 เม็ด ซึ่งเป็นพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติจำนวน 16 เม็ด และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม 16 เม็ด และได้ถูกคัดเลือกมาขัดเงาหน้าพลอยตั้งฉากแกนแสง เป็นหน้าเรียบบาง ให้แสงสามารถส่องผ่านได้ เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์พลอยตัวอย่างด้วยเครื่องมือขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือขั้นสูงในลำดับถัดไป

### 3.1.3 ตรวจสอบสมบัติพื้นฐานทางอัญมณี

1. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทั่วไปของอัญมณี เช่น สี, รูปร่าง และขนาด ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ด้วยเครื่องมือ Hydrostatic Balance, UV lamp, Refractometer และ Gemological Microscope

2. ตรวจสอบลักษณะทางแสง ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ด้วยเครื่องมือ UV-VIS-NIR Spectrophotometer และ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

3. ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก ด้วยเครื่องมือ Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)

4. วิเคราะห์หาธาตุเบริลเลียม (Be) ที่เจือปนอยู่ในของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดย Induced Breakdown Spectrometer (LIBS)

### 3.1.4. รวบรวมผลข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ทำการวิเคราะห์ แปลความหมาย และอภิปราย

นำผลข้อมูลจากการศึกษาในแต่ละขั้นตอน โดยเฉพาะผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง เช่น ธาตุองค์ประกอบ, การดูดกลืนแสง, องค์ประกอบภายในโมเลกุล ทำการวิเคราะห์ และแปลความหมาย เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางของประเทศไทยและเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดนำมาเชื่อมโยงถึงสาเหตุที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหลังการปรับปรุงคุณภาพในรายงานการวิจัยต่างๆที่ได้ทำการศึกษาในขั้นตอนแรก

### 3.1.5. สรุป และนำเสนอโครงการวิจัย

สรุปผลการวิเคราะห์ นำเสนอในรูปแบบสัมมนา และจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

## 3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

✚ ศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Physical properties) ประกอบด้วย

### Hydrostatic Balance

เครื่องมือชั่งน้ำหนัก ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ชั่งในอากาศ และในน้ำ เพื่อคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของอัญมณี ของตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางธรรมชาติและตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (รูปที่ 3.2.1)

### Refractometer

เครื่องมือวัดค่าดัชนีหักเหของแสง เพื่อวัดค่าดัชนีหักเหของของตัวอย่างพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางธรรมชาติและตัวอย่างพอลิเมอร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งใช้ร่วมกันกับน้ำยาเมทิลีนไอโอดีน หรือน้ำยาอาร์ไอ (RI liquid) ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.81(รูปที่ 3.2.2)



รูปที่ 3.2.1 เครื่อง Hydrostatic Balance และน้ำยาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูปที่ 3.2.2 เครื่อง Refractometer และน้ำยาจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

## UV Lamp

หลอดรังสีเหนือม่วงคลื่นสั้น และคลื่นยาว ใช้ตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณีภายใต้รังสีเหนือม่วงคลื่นสั้น ที่ความยาวคลื่น 254 nm และคลื่นยาวที่ความยาวคลื่น 365 nm (รูปที่ 3.2.3)



รูปที่ 3.2.3 ตู้ UV Lamp จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

## 🌈 ศึกษาลักษณะทางแสง (Optical properties) ประกอบด้วย

### กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope)

เครื่องมือศึกษาลักษณะผิวภายนอก และลักษณะภายในของอัญมณี เพื่อศึกษาลักษณะมลทิน (inclusions) ของของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวมหาสมุทรธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยหากใช้แสงไฟแบบธรรมดา เมื่อส่องผ่านเข้าไปในตัวอย่งจะแยกความแตกต่างระหว่างมลทินกับเนื้อพลอยได้ยาก เพราะตัวอย่างมักจะมีควมใส หรือโปร่งแสง เช่นเดียวกับมลทิน หรือมีแสงสะท้อนทำให้เห็นเฉพาะผิวภายนอก ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อัญมณีจึงมีระบบ dark field เพื่อใช้แยกมลทินได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 3.2.4)



รูปที่ 3.2.4 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope)

จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

### Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

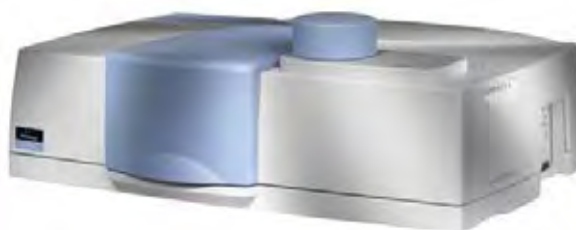
เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบภายในโมเลกุล จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorption) หรือการให้แสงผ่าน (transmission) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการดูดกลืนแสง หรือ การให้แสงผ่านของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผา ร่วมกับสารเบริลเลียม เนื่องจากปฏิกิริยาระดับอะตอมขององค์ประกอบในโมเลกุลของพลอยที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด สามารถใช้ในการตรวจสอบการปรับปรุงคุณภาพบางประเภท (รูปที่ 3.2.5)



รูปที่ 3.2.5 เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700  
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

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

เครื่องมือวัดค่าการส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างย่าน Ultraviolet (UV), Visible (ViS) และ Near Infrared (NIR) เมื่อตกกระทบตัวอย่างทดสอบ ใช้ในการศึกษาสาเหตุการเกิดสีในอัญมณี และธาตุร่องรอยบางชนิด ที่อาจบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผา ร่วมกับสารเบริลเลียม โดยเครื่องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ Perkin Elmer Precisely และ Lambda950 เป็นเครื่องตรวจจับและดูการดูดกลืนในช่วงคลื่นตั้งแต่ 250-1500 นาโนเมตร (รูป 3.2.6)



รูปที่ 3.2.6 เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer  
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

## 🚦 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis)

### Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)

เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ถึงระดับไมโครเมตร (micro-analysis) เพื่อศึกษาธาตุองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยหลักการคือ ยิงลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งทำให้องค์ประกอบภายในตัวอย่างปล่อยอิเล็กตรอน และรังสีเอ็กซ์เรย์ในลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ โดยปริมาณธาตุที่สนใจ และนำมาศึกษาวิเคราะห์ คือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  (รูปที่ 3.2.7)



รูปที่ 3.2.7 เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100 จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องมือวิเคราะห์หาธาตุเบริลเลียม (รูปที่ 3.2.8) ที่เจือปนในตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยหลักการทำงานคือใช้แสงเลเซอร์พลังงานสูงยิงไปที่ตัวอย่างโดยตรง ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างระเหิดกลายเป็นพลาสมา แล้วจึงใช้เครื่อง Spectrometer ความไวสูงมาทำการวัด Spectrum ของไอพลาสมานั้น หลังจากนั้นจึงใช้ซอฟต์แวร์ของ LTB Lasertechnik Berlin มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาว่าตัวอย่างนั้นประกอบด้วยธาตุใด



รูปที่ 3.2.8 เครื่อง LIBS โดย LTB Lasertechnik Berlin จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

\*หมายเหตุ รูปภาพเครื่องมือรูปที่ 3.2 ถึง 3.10 จากเว็บไซต์ออนไลน์

- [http://www.ebay.tv/sch/Jewelry-Watches-/281/i.html?\\_sop=12&\\_nkw=gem+refractometer&\\_frs=1](http://www.ebay.tv/sch/Jewelry-Watches-/281/i.html?_sop=12&_nkw=gem+refractometer&_frs=1)
- <http://www.internetstones.com/ultraviolet-lamp-heavy-liquids-instruments-hardness-pencils-weighingscalesiii.html>
- [http://jcrs.com/newsletters/2011/2011\\_12.htm](http://jcrs.com/newsletters/2011/2011_12.htm)
- <http://www.gia.edu/gems-gemology/summer-2013-luo-fluorescence-optical-defects>
- <http://www.jascoinc.com/spectroscopy/v-770-uv-vis-spectrophotometer>
- <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=10880>
- <http://www.barascientific.com/products/shimadzu/scientific/surface/eng/EPMA/EPMA-1610.php>
- <http://www.warsash.com.au/suppliers/renishaw.php>
- <http://anchorcertgemlab.com/about-us/bruker-tensor>

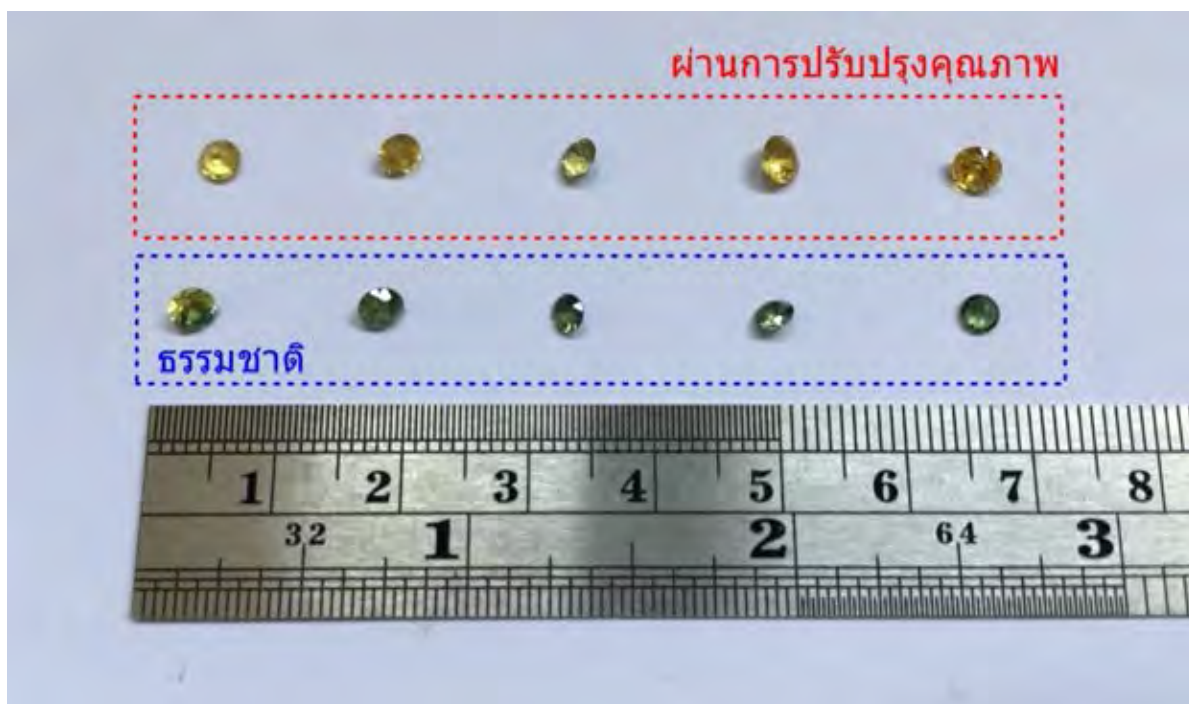
## บทที่ 4

### ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 ลักษณะทั่วไป

ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษานั้น ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเหลืองที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมโดยผู้ประกอบการจังหวัดจันทบุรี ซึ่งพลอยทั้ง 2 ชุดมาจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม จำนวนทั้งหมด 32 ตัวอย่าง ซึ่งเป็นตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ จำนวน 16 ตัวอย่าง และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จำนวน 16 ตัวอย่าง เมื่อผ่านการกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมจะมีลักษณะสีเหลือง ความโปร่งใส (Transparency) หรือระดับของการยอมให้แสงส่องผ่าน คือ ถึงโปร่งแสง (Translucent) มีการเจียรระไนแบบเพชร (Brilliant cut)

ตัวแทนกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามและกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม แสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามสีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม



ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทางอัญมณีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของกลุ่มตัวอย่างตามธรรมชาติ สรุปลไว้ในตารางที่ 4.1 และผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม สรุปลไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 สรุปลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ

Color	Transparency	Weight (ct)	SG (g/cm <sup>3</sup> )	RI		Birefringence	Fluorescence	
				n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>		LW	SW
Yellowish Green	Translucent	0.0775-0.3370	3.74-4.13	1.770-1.780	1.762-1.772	0.005-0.009	Inert	Inert

ตารางที่ 4.2 สรุปลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

Color	Transparency	Weight (ct)	SG (g/cm <sup>3</sup> )	RI		Birefringence	Fluorescence	
				n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>		LW	SW
Yellow	Translucent	0.1320-0.3555	3.81-4.10	1.769-1.780	1.760-1.775	0.005-0.009	Inert	Inert

#### 4.2 มลทินภายใต้กล้องจุลทรรศน์

การศึกษามลทินเนื้อในภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี ในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม พบว่าเนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น มีรอยแตกภายในค่อนข้างมาก และมีปริมาณมลทินภายในมาก แต่พบมลทินผลึกได้ยากในกลุ่มพลอยตัวอย่างนี้

จากการศึกษาลักษณะผิวภายนอกและมลทินภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม พบลักษณะที่ปรากฏ แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปลักษณะมลทินที่พบในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวมหากรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

มลทิน	พลอยแซปไฟร์สีเขียวมหากรรมชาติ	พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	หมายเหตุ
รอยแตกผสานลายนิ้วมือ (Fingerprint)	***	***	มลทินในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์มหากรรมชาติมีลักษณะเป็นรูปร่างหรือวงกลม แต่ในพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่ามลทินนี้มีลักษณะไม่เป็นรูปร่างและมีความซับซ้อนของมลทินเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อัญมณี
ผลึกเนกาทีฟ (Negative crystal)	*	*	
ผลึกแร่อ่อนภายใน (Two-phase inclusion)	*		
แถบการเจริญเติบโตของผลึก (Growth line)	***	***	
รอยแตกบริเวณผิวพลอย	**	**	
ผลึกแร่หลอมละลาย		**	พบเฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยเกิดจากการหลอมละลายของผลึกแร่เนื่องจากอิทธิพลความร้อนที่แผ่ร่วมกับสารเบริลเลียม
มลทินลักษณะคล้ายสปริงหรือท่อขดไปมา		**	พบเฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการแผ่ร่วมกับสารเบริลเลียม ซึ่งมลทินนี้มีลักษณะคล้ายสปริง (like-spring inclusions) หรือท่อขดไปมา

หมายเหตุ \*\*\* พบได้มาก \*\*พบได้บ้าง \*พบได้น้อย

มลทินที่พบมากที่สุดและเห็นการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดของพลอยทั้งสองชุด คือมลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือมลทินในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์มหากรรมชาติมีลักษณะเป็นรูปร่างหรือวงกลม แต่ในพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ พบว่ามลทินนี้มีลักษณะไม่เป็นรูปร่างและมีความซับซ้อนของมลทินเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อัญมณี อาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของของเหลวภายในรอยแตกของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ซึ่งมีลักษณะแห้งกรังเกิดขึ้นหลังการปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนั้นยังพบลักษณะของมลทินผลึกแร่หลอมละลาย ซึ่งพบเฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยเกิดจากการหลอมละลายของผลึกแร่เนื่องจากอิทธิพลความร้อนที่แผ่ร่วมกับสารเบริลเลียม อีกทั้งยังพบลักษณะมลทินเฉพาะที่มีมลทินลักษณะคล้ายสปริงหรือท่อขดไปมาซึ่งมลทินนี้มีลักษณะคล้ายสปริง (like-spring inclusions) หรือท่อขดไปมา

ซึ่งลักษณะของมลทินที่ปรากฏในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ทั้ง 2 ชุด และลักษณะที่ปรากฏบนพื้นผิวของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ มีดังนี้

- **ลักษณะที่ปรากฏบริเวณผิวนอกของพลอยแซปไฟร์**

พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ พบว่ามีรอยแตกบริเวณผิวพลอย (รูปที่ 4.2.1) และพบมลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึกหรือ Growth line (รูปที่ 4.2.2) ได้อย่างชัดเจน

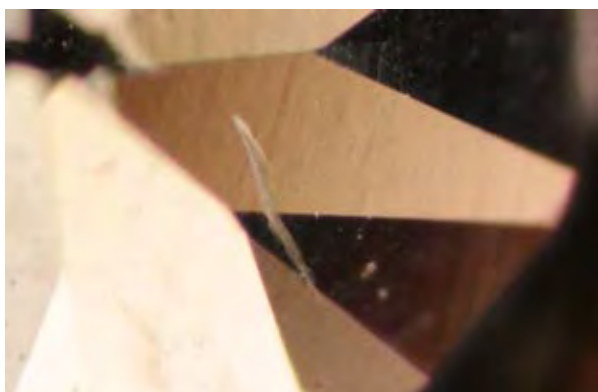
พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ก็สามารถพบรอยแตกบริเวณผิวพลอย (รูปที่ 4.2.3) และพบมลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก (รูปที่ 4.2.3) ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.2.1 รอยแตกบริเวณผิวพลอย  
ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ 40x (NH9)



รูปที่ 4.2.2 มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก  
ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ 50x (NH8)

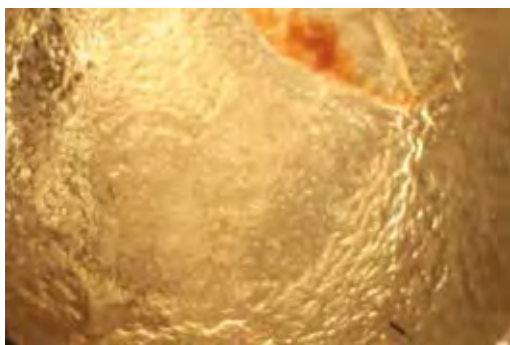


รูปที่ 4.2.3 รอยแตกบริเวณผิวพลอย  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT17)

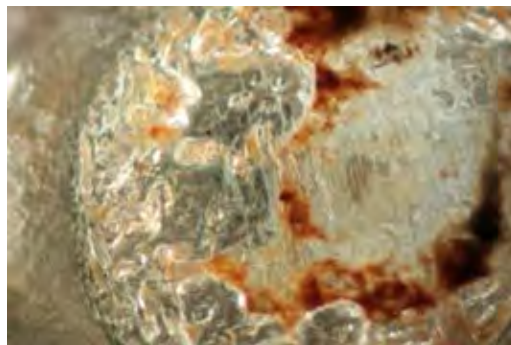


รูปที่ 4.2.4 มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT21)

นอกจากนั้นหากพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาก่อนที่จะนำมาเข้ากระบวนการขัดเงา จะพบว่าบริเวณผิวพลอยมีลักษณะหลอมบางส่วน (รูปที่ 4.2.5) อันเกิดมาจากอิทธิพลของความร้อนสูงที่ใช้ในการเผาพลอยร่วมกับสารเบริลเลียม และพบการตกผลึกซ้ำบริเวณผิวของพลอย (รูปที่ 4.2.6)



รูปที่ 4.2.5 ผิวหน้าพลอยที่ผ่านความร้อนสูง

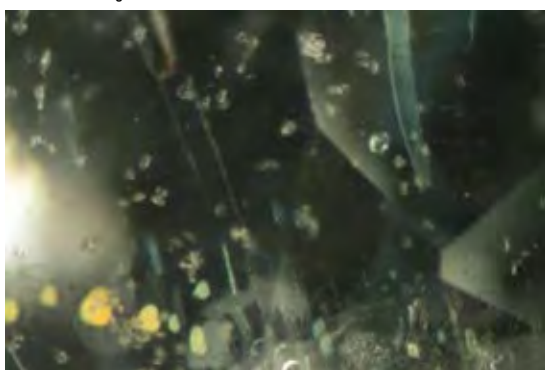


รูปที่ 4.2.6 การตกผลึกซ้ำบริเวณผิว

ของพลอยแซฟไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT6) ของพลอยแซฟไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT10)

- **มลทินผลึกเนกาทีฟ (Negative crystal)**

เป็นมลทินที่เกิดจากการเย็นตัวตามผลึก เกิดช่องว่างในเนื้อพลอยตามลักษณะโครงสร้างของผลึก ในตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีเขียวมเหลี่ยมธรรมชาติพบทั้งแบบเป็นเส้นยาว และผลึกทรงสี่เหลี่ยม กระจายอยู่ทั่วไป (รูปที่ 4.2.7) และพบมลทินผลึกเนกาทีฟลักษณะคล้ายกันในพลอยแซฟไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (รูปที่ 4.2.8)



รูปที่ 4.2.7 มลทินผลึกเนกาทีฟ

ของพลอยแซฟไฟร์สีเขียวมเหลี่ยมธรรมชาติ 50x (NH7)



รูปที่ 4.2.8 มลทินผลึกเนกาทีฟ

ของพลอยแซฟไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT8)

- **มลทินผลึกแร่ซ้อนภายใน (Two-phase inclusion)**

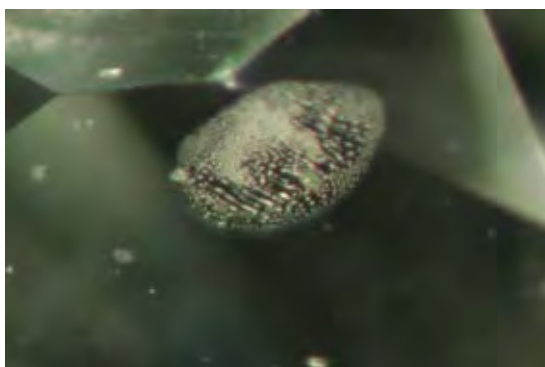
จากการศึกษาผ่านกล้องจุลทรรศน์อัญมณี เห็นมลทินผลึกแร่ซ้อนเฉพาะในตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีเขียวมเหลี่ยมธรรมชาติ โดยมลทินภายนอกมีลักษณะเป็นทรงรี มีความเหลี่ยมเล็กน้อย ส่วนมลทินภายในมีลักษณะเป็นทรงกลมค่อนรี มีลักษณะใส (รูปที่ 4.2.9)



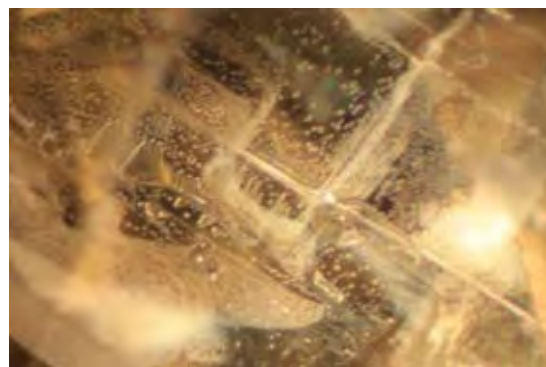
รูปที่ 4.2.9 มลทินผลึกแร่ ที่มีมลทินผลึกแร่ซ่อนอยู่ภายใน  
ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ 50x (NH5)

- **มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ (Fingerprint)**

มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ พบได้โดยทั่วไปในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ โดยตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ จะแสดงลักษณะมลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือเป็นลักษณะวงกลม วงรี หรือค่อนข้างมีรูปทรง แสดงในรูปที่ 4.2.10 แต่มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือที่พบในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จะมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างออกไป ซึ่งโดยส่วนมากที่พบจะมีลักษณะแผ่กระจายเป็นวงกว้าง ซ้อนทับกันไปมา และไม่เป็นรูปร่าง แสดงในรูปที่ 4.2.11



รูปที่ 4.2.10 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ  
ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ 40x (NH6)

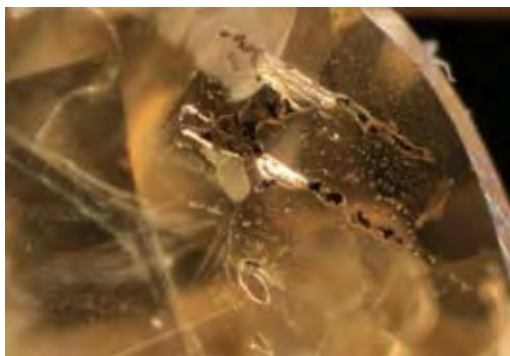


รูปที่ 4.2.11 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 40x (SVT2)

- **มลทินผลึกแร่หลอมละลาย**

เป็นมลทินที่พบเฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับเบริลเลียม ซึ่งเกิดจากการหลอมละลายของผลึกแร่ภายในพลอย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนสูง ส่งผลให้เกิดลักษณะปรากฏเช่นนี้ แสดงลักษณะตามรูปที่ 4.2.12 และ 4.2.13





รูปที่ 4.2.12 มลทินผลึกแร่หลอมละลาย  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT2)

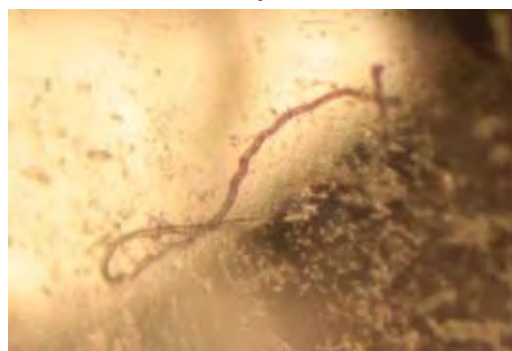


รูปที่ 4.2.13 มลทินผลึกแร่หลอมละลาย  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT2)

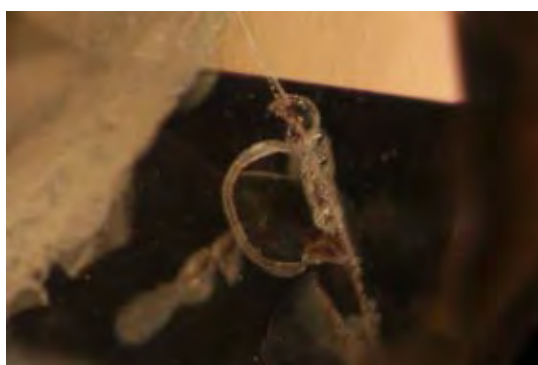
- มลทินชนิดอื่นๆ ที่มักพบเฉพาะในพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม พบลักษณะมลทินเรียงตัวคล้ายเส้นด้ายกระจายตัวบางบริเวณในเนื้อพลอย (รูปที่ 4.2.14 – 4.2.16)



รูปที่ 4.2.14 มลทินเรียงตัวคล้ายเส้นด้ายของพลอย  
แซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (HT\_SVT10)



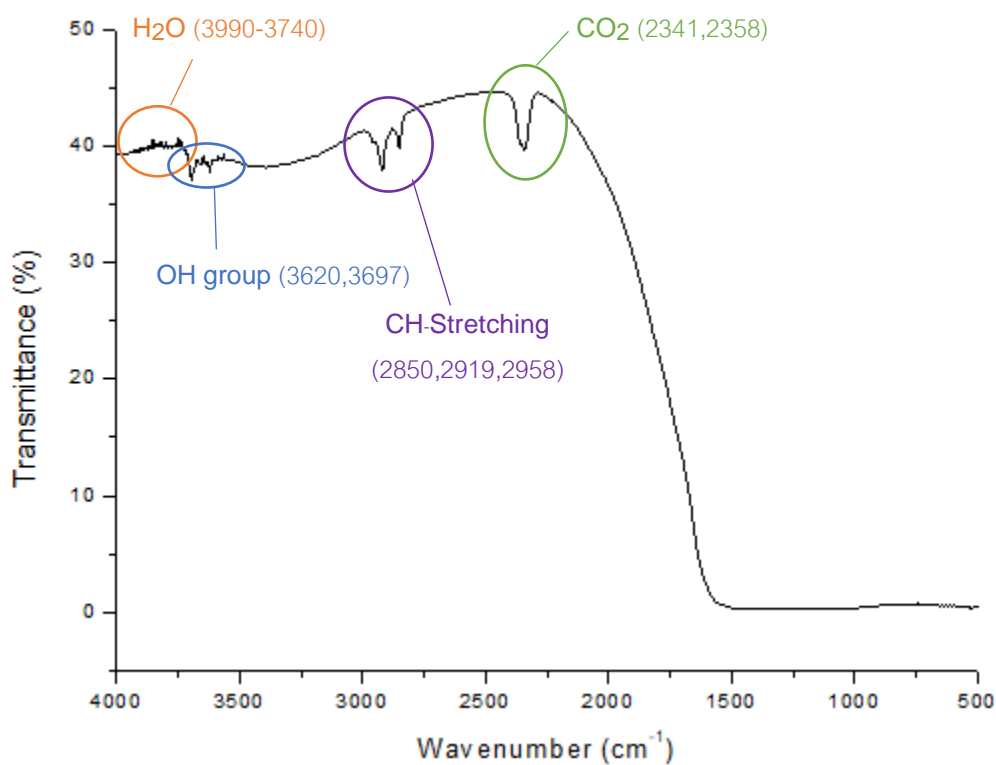
รูปที่ 4.2.15 มลทินเรียงตัวคล้ายเส้นด้ายของพลอย  
แซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (HT\_SVT10)



รูปที่ 4.2.16 มลทินเรียงตัวหอคคล้ายสปริง  
ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 50x (SVT28)

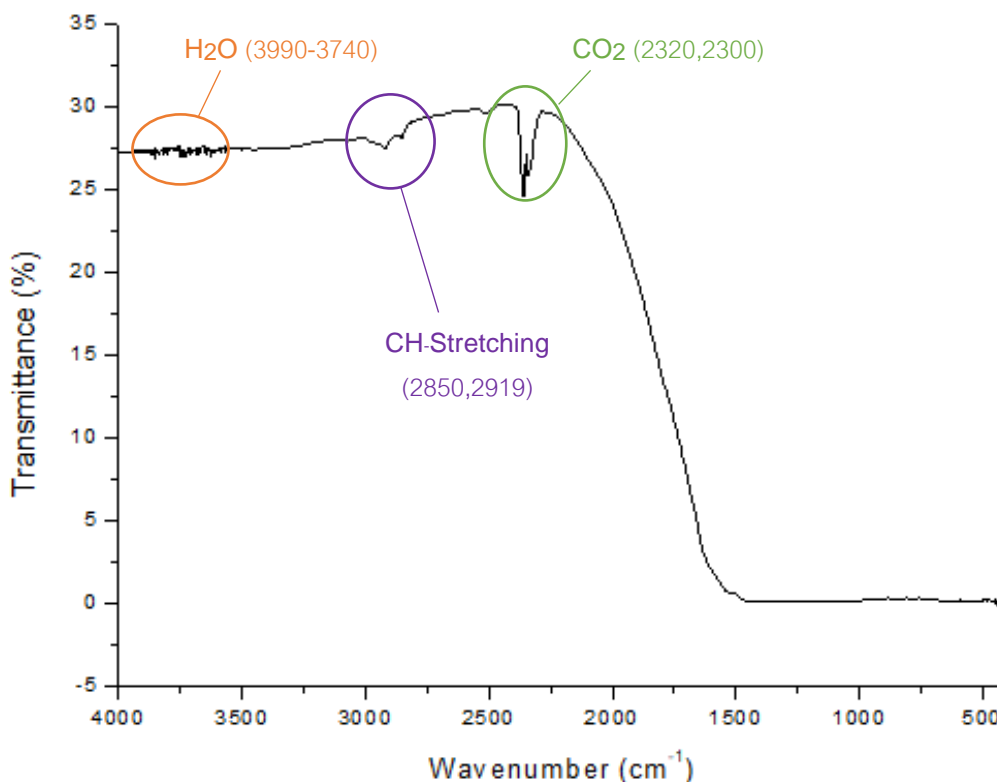
### 4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

ลักษณะทั่วไปของการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) ที่พบในพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม แสดงการดูดกลืนของ  $\text{H}_2\text{O}$  จากความชื้นในอากาศ ในช่วงประมาณ  $3740 - 3990 \text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ( $\text{CO}_2$ ) ที่ตำแหน่ง  $2341$  และ  $2358 \text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนของ C-H Stretching ที่ตำแหน่งประมาณ  $2850$ ,  $2919$  และ  $2958 \text{ cm}^{-1}$  อันเนื่องมาจากความสกปรกของสารไฮโดรคาร์บอนบนผิว หรือภายในรอยแตก ซึ่งสามารถพบลักษณะการดูดกลืนที่กล่าวมานี้ได้ในทุกแหล่งพลอย ถือเป็น การดูดกลืนทั่วไป ดังรูปที่ 4.3.1 ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ OH groups ที่เกิดจาก O-H Stretching ของอนุมูลไฮดรอกซิลอิสระ (free OH) ที่ตำแหน่ง  $3620$  และ  $3697 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 4.3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านและความยาวคลื่นจากเครื่อง FTIR ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ (NH10)

ลักษณะทั่วไปของการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) ที่พบในพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ แสดงการดูดกลืนของ  $\text{H}_2\text{O}$  จากความชื้นในอากาศในช่วงประมาณ  $3740 - 3990 \text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ( $\text{CO}_2$ ) ที่ตำแหน่ง  $2341$  และ  $2358 \text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนของ C-H Stretching ที่ตำแหน่งประมาณ  $2850$  และ  $2919 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ OH groups ได้ไม่ชัดเจน



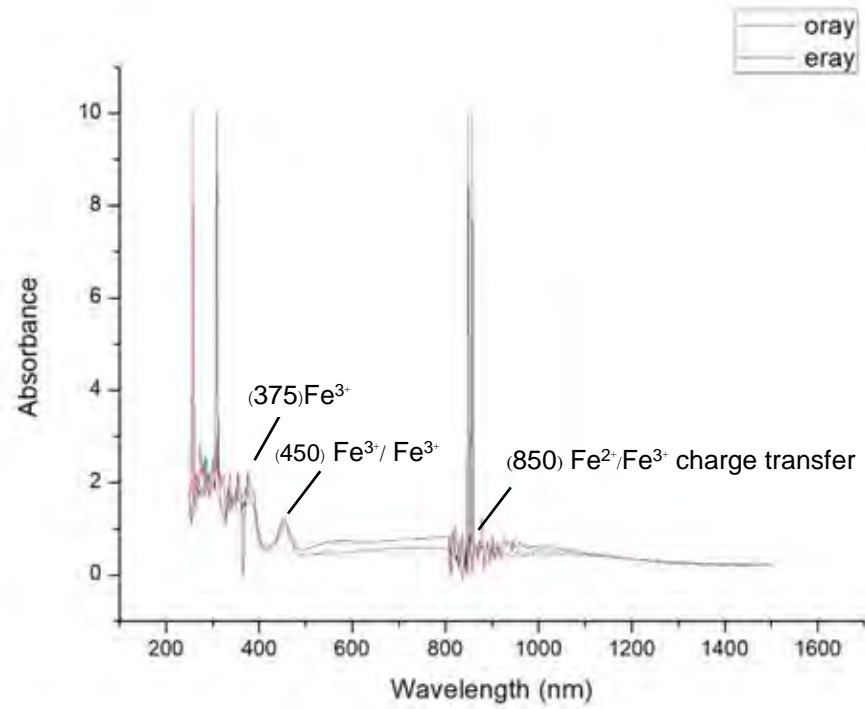
รูปที่ 4.3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านและความยาวคลื่นจากเครื่อง FTIR ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (SVT4)

#### 4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR

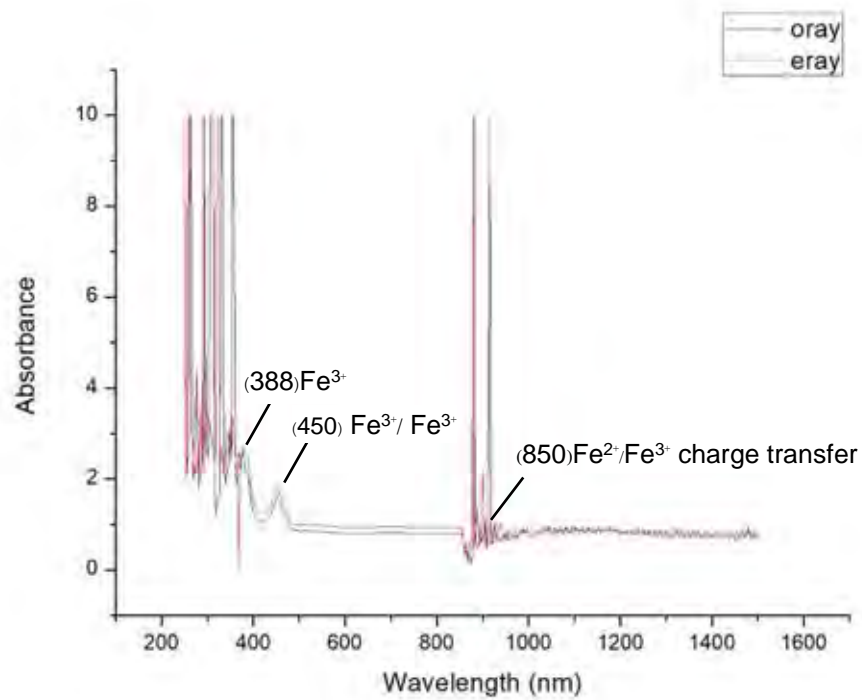
ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ (รูปที่ 4.4.1) และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม (รูปที่ 4.4.2)

ผลการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม คือ พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จะมีโทนสีที่สว่างกว่าพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ โดยแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 388 nm แสดงถึงองค์ประกอบของ  $\text{Fe}^{3+}$  ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 450 nm แสดงการดูดกลืนของ  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$  ช่วงความยาวคลื่น 550-700 nm แสดงถึงองค์ประกอบ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$  intervalence charge transfer และที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 850 nm แสดงถึงองค์ประกอบของ  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  charge transfer





รูปที่ 4.4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างๆและความยาวคลื่นจากเครื่อง UV-VIS-NIR ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ (NH1)



รูปที่ 4.4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างๆและความยาวคลื่นจากเครื่อง UV-VIS-NIR ของพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (HT\_SVT3)

#### 4.5 องค์ประกอบทางเคมี

- ผลวิเคราะห์โดย EPMA

แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมการสารเบริลเลียม จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม มีองค์ประกอบหลักคือ  $Al_2O_3$  และได้เลือกวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ โดยสรุปผลการวิเคราะห์ EPMA ของพอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ ในตารางที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์ EPMA ของพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ

$SiO_2$ (Mass%)	$Al_2O_3$ (Mass%)	$CaO$ (Mass%)	$TiO_2$ (Mass%)	$FeO$ (Mass%)	$MgO$ (Mass%)
0 - 0.072 (0.030)	95.493 - 98.911 (97.640)	0 - 0.034 (0.007)	0 - 0.038 (0.013)	1.126 - 1.648 (1.403)	0 - 0.013 (0.001)

$K_2O$ (Mass%)	$Cr_2O_3$ (Mass%)	$V_2O_3$ (Mass%)	$Ga_2O_3$ (Mass%)	$MnO$ (Mass%)
0 - 0.016 (0.004)	0 - 0.056 (0.010)	0 - 0.023 (0.006)	0 - 0.181 (0.075)	0 - 0.023 (0.007)

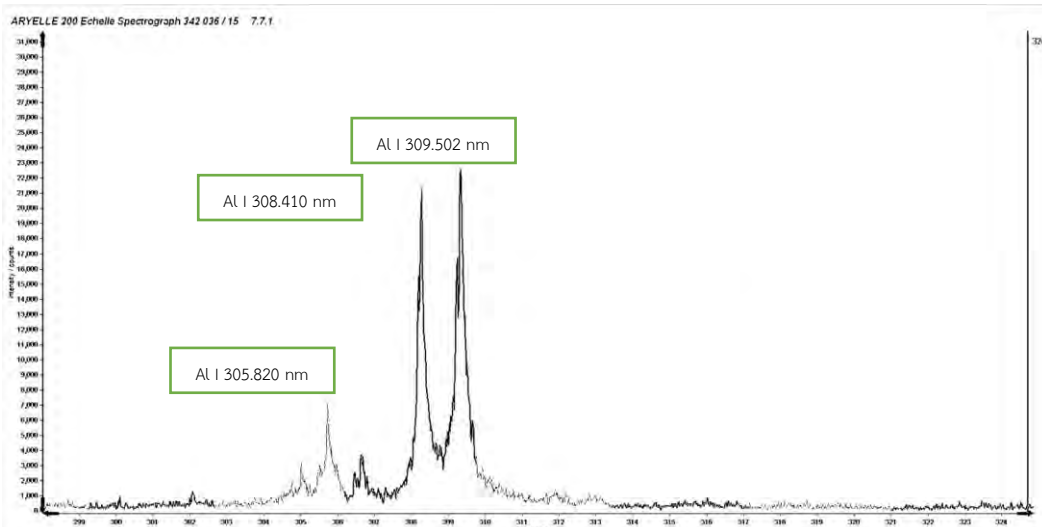
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม

$SiO_2$ (Mass%)	$Al_2O_3$ (Mass%)	$CaO$ (Mass%)	$TiO_2$ (Mass%)	$FeO$ (Mass%)	$MgO$ (Mass%)
0 - 0.064 (0.021)	95.161 - 98.677 (97.407)	0 - 0.018 (0.005)	0 - 0.046 (0.010)	1.151 - 1.784 (1.397)	0 - 0.017 (0.001)

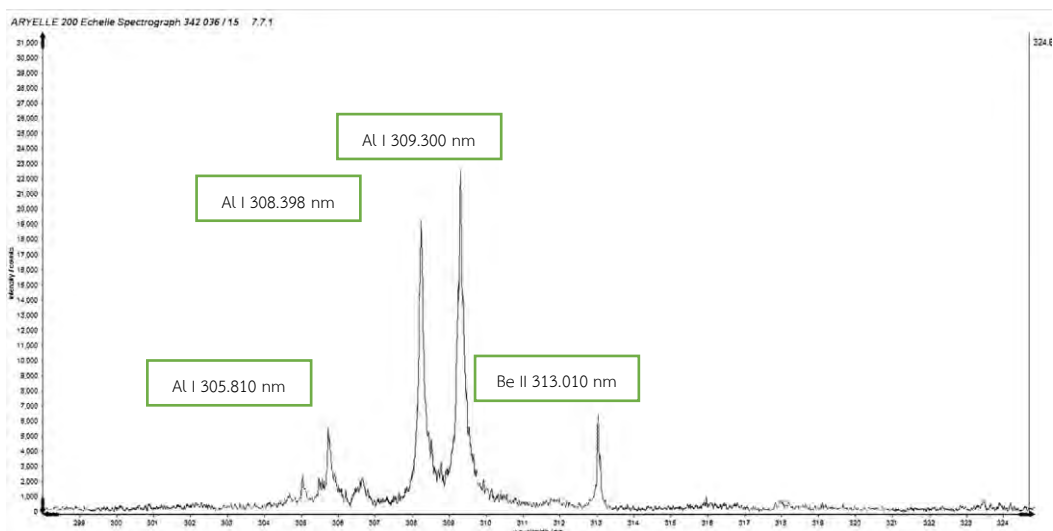
$K_2O$ (Mass%)	$Cr_2O_3$ (Mass%)	$V_2O_3$ (Mass%)	$Ga_2O_3$ (Mass%)	$MnO$ (Mass%)
0 - 0.011 (0.002)	0 - 0.048 (0.016)	0 - 0.035 (0.010)	0 - 0.121 (0.040)	0 - 0.029 (0.007)

- ผลวิเคราะห์โดย LIBS

วิเคราะห์หาธาตุเบริลเลียม ที่เจือปนในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติไม่พบการเจือปนของธาตุเบริลเลียม (Be) ภายในตัวอย่าง (รูปที่ 4.5.1) ซึ่งแตกต่างจากพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งพบการเจือปนของธาตุเบริลเลียม (Be) ที่ความยาวคลื่น 313.010 nm (รูปที่ 4.5.2)



รูปที่ 4.5.1 สรุปลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS ของพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม



รูปที่ 4.5.2 สรุปลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS พลอยแซปไฟร์สีเหลืองจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม

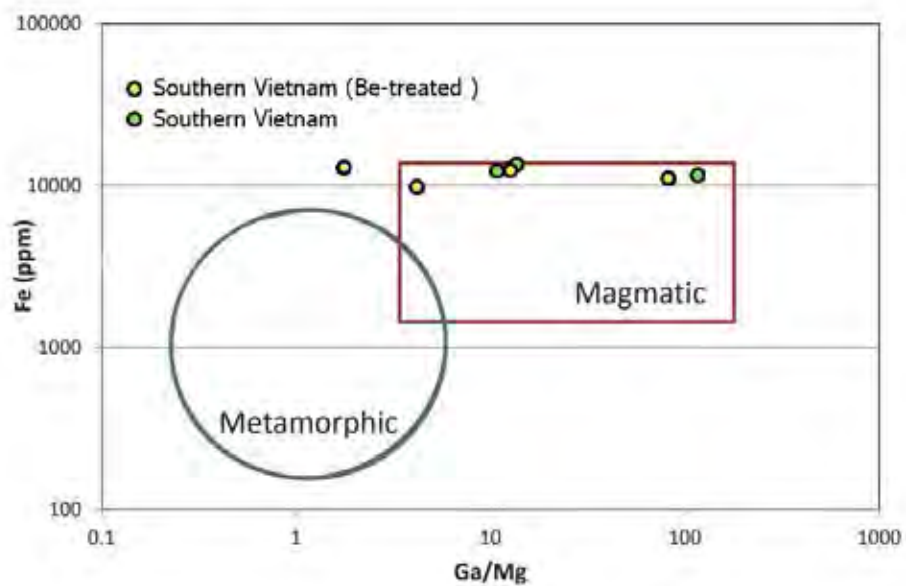
## บทที่ 5

### อภิปรายผล และสรุปผล

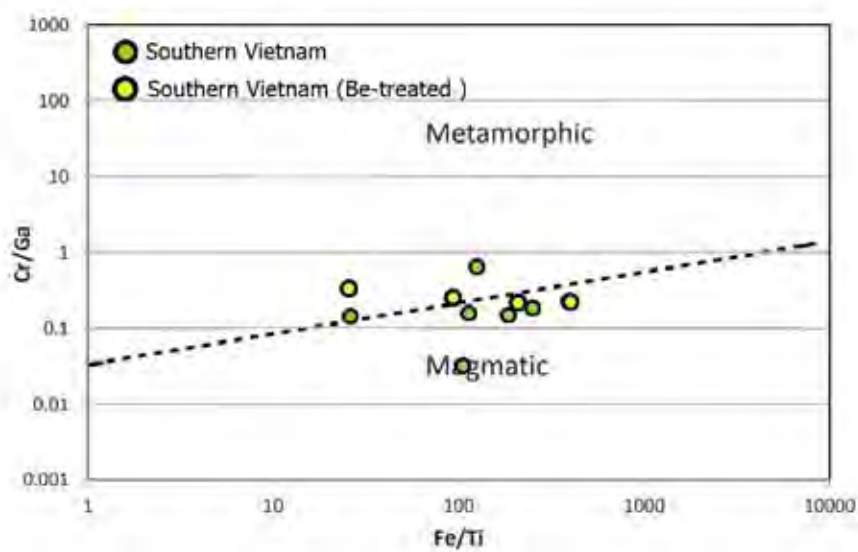
จากการศึกษาตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากแหล่งทางตอนใต้ ของประเทศเวียดนาม ทั้ง 32 เม็ด พบว่าตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ โดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมมีคุณภาพค่อนข้างต่ำ เนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น เนื่องจากการมีรอยแตก และพบ มลทินภายในกระจายตัวอยู่ในเนื้อพลอย

ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงอยู่ในช่วงปกติ ของพลอยแซปไฟร์ทั่วไปคือ ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.800-4.149 ค่าดัชนีหักเหอยู่ 1.762-1.780 ค่าไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) อยู่ระหว่าง 0.007-0.009 และการเรืองแสงภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์ โดยไม่เรืองแสงที่ความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว โดยมลทินที่พบโดยมากเป็นมลทินผลึกแร่ และมลทิน อื่นๆที่พบ ได้แก่ มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal), มลทินผลึกแร่ซ้อนภายใน (two-phase inclusion), มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก (growth line) และมลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ (fingerprint) และ ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางแสงอยู่ในช่วงปกติของพลอยแซปไฟร์ทั่วไปคือ ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.800-4.00 ค่าดัชนี หักเหอยู่ที่ 1.760-1.780 ค่าไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) อยู่ระหว่าง 0.005-0.009 และการเรืองแสงภายใต้ แสงฟลูออเรสเซนส์ โดยไม่เรืองแสงที่ความยาวคลื่นสั้นและความยาวคลื่นยาว โดยมลทินที่พบโดยมากเป็น มลทินผลึกแร่ และมลทินอื่นๆที่พบ ได้แก่ มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal), มลทินแถบการเจริญเติบโต ของผลึก (growth line), มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ (fingerprint), มลทินผลึกแร่หลอมละลาย และ มลทินที่มีลักษณะคล้ายเส้นด้ายหรือท่อกระจายตัวกันบางบริเวณในเนื้อพลอย

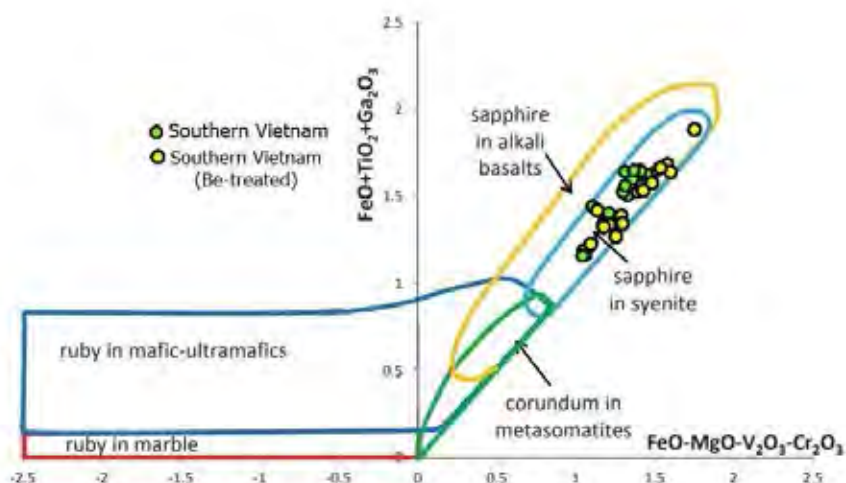
ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและ ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากเครื่อง EPMA พบว่า มีแนวโน้มของธาตุองค์ประกอบหลักของพลอยแซปไฟร์ทั้งสองกลุ่มเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ  $Al_2O_3$  ซึ่งเป็น องค์ประกอบทางเคมีของคอร์รันดัมโดยทั่วไป ส่วนธาตุร่องรอยที่มีปริมาณรองลงมาคือ FeO ส่วนธาตุร่องรอย อื่นๆที่พบน้อยมาก ได้แก่  $Ga_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $V_2O_5$ ,  $K_2O$  และ  $MgO$  จากผลของ EPMA ตามลำดับ รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์โดยใช้ความเข้มข้นของ Fe และ Ga/Mg (Peucat et al., 2007) จะเห็นได้ว่าตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ทำการศึกษาสัมพันธ์กับการกำเนิดโดย หินบะซอลต์ (magmatic) รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์โดยใช้ อัตราส่วนของ Cr/Ga และ Fe/Ti (Sutherland et al., 1998) รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์ โดยใช้  $FeO + TiO_2 + Ga_2O_3$  และ  $FeO-Cr_2O_3-MgO-V_2O_5$  (Giuliani et al., 2014)



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟรโดยใช้ความเข้มข้นของ Fe และ Ga/Mg (Peucat et al., 2007)



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟรโดยใช้ อัตราส่วนของ Cr/Ga และ Fe/Ti (Sutherland et al., 1998)



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแซปไฟร์

โดยใช้  $\text{FeO} + \text{TiO}_2 + \text{Ga}_2\text{O}_3$  และ  $\text{FeO}-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{V}_2\text{O}_5$  (Giuliani et al., 2014)

ซึ่งจากข้อมูลการวิเคราะห์ข้างต้น สนับสนุนว่าตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามในการศึกษาครั้งนี้ มีความสัมพันธ์กับการปะทุของหินอัลคาไลบะซอลต์ที่เป็นตัวพาพลอยแซปไฟร์มาจากหินต้นกำเนิดภายใต้เปลือกโลกที่เกิดจากการตกผลึกในหินหนืด (magmatic type) มากกว่าในหินแปร (metamorphic type) ซึ่งหินหนืดต้นกำเนิดอาจมีลักษณะคล้ายกับหินไซอีไนต์ (Syenite)

สำหรับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์หลังการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม มีการเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะทางกายภาพและทางเคมี สรุปได้ ในตารางที่ 5.1 มลทินที่พบในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมมลทินชนิดเดียวกันอาจมีลักษณะรูปร่างมลทินคล้ายหรือแตกต่างกัน และพบว่ามลทินบางชนิดพบได้เฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติหรือพบได้เฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมเท่านั้น โดยมลทินที่พบได้เฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติคือ มลทินผลึกแร่อ่อนภายใน (two-phase inclusion) ในส่วนของมลทินที่พบได้เฉพาะในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมคือ มลทินผลึกแร่หลอมละลายซึ่งเกิดจากการหลอมละลายของผลึกแร่ภายในพลอย อันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนสูงที่ใช้ในการเผาพลอย และพบมลทินที่เรียงตัวลักษณะคล้ายเส้นด้ายกระจายตัวบางบริเวณในเนื้อพลอย มลทินที่พบร่วมในพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติและพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมคือ มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ (fingerprint) ลักษณะรูปร่างของมลทินคล้ายรูปวงรีหรือวงกลมพบในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติมี ซึ่งแตกต่างจากรูปร่างมลทินที่พบในพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งมีรูปร่างของมลทินแผ่กระจายเป็นวงกว้างไม่ปรากฏรูปร่างที่แน่ชัดของมลทินและดูมีความซับซ้อนกว่ามลทินที่พบในพลอยแซปไฟร์สีเขียวอม

เหลืองธรรมชาติ มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal) เป็นมลทินที่เกิดจากการเย็นตัวตามผลึกเกิดช่องว่างในเนื้อพอลอยตามลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งมีลักษณะรูปร่างมลทินคล้ายกัน

จากการศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองธรรมชาติ และตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากแหล่งทางตอนใต้ ของประเทศเวียดนาม ปรากฏว่าสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างพอลอยทั้งสองกลุ่ม มีความแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายถึงสีที่เกิดขึ้นของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ทั้งสองกลุ่มได้ คุณสมบัติการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองธรรมชาติ แสดงยอดการดูดกลืนของ  $Fe^{3+}$  ที่ความยาวคลื่น 388 nm แสดงยอดการดูดกลืนของ  $Fe^{3+}/Fe^{3+}$  ช่วงความยาวคลื่นที่ 450 nm และ แสดงการดูดกลืนของ  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  intervalence charge transfer ที่ความยาวคลื่น 550-700 nm ส่งผลให้ตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ธรรมชาติจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามมีสีเขียวมเหลือง หลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพพบว่าการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR แสดงยอดการดูดกลืน  $Fe^{3+}$  ที่ความยาวคลื่น 450 nm สูงขึ้นและแสดงการดูดกลืน  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  น้อยลงที่ความยาวคลื่น 450-700 nm แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก  $Fe^{2+}$  ไปเป็น  $Fe^{3+}$  มากขึ้น ทำให้สีเขียวมเหลืองที่เกิดจาก  $Fe^{3+}$  และ intervalence charge Transfer ของ  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  กลายเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น (พิสุทธอนันท์ et al., 2551)

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุเบริลเลียมด้วยเลเซอร์อินดิวซ์เบรกดาวน์สเปกโตรสโกปี (LIBS) ไม่พบธาตุเบริลเลียมในตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองธรรมชาติในเนื้อพอลอย แต่พบธาตุเบริลเลียมในตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ซึ่งค่าที่วิเคราะห์ได้ในแต่ละตำแหน่งนั้นมีค่าแตกต่างกันอาจเกิดจากบริเวณพื้นผิวของพอลอยแซปไฟร์ที่สัมผัสกับเบริลเลียมออกไซด์แตกต่างกัน

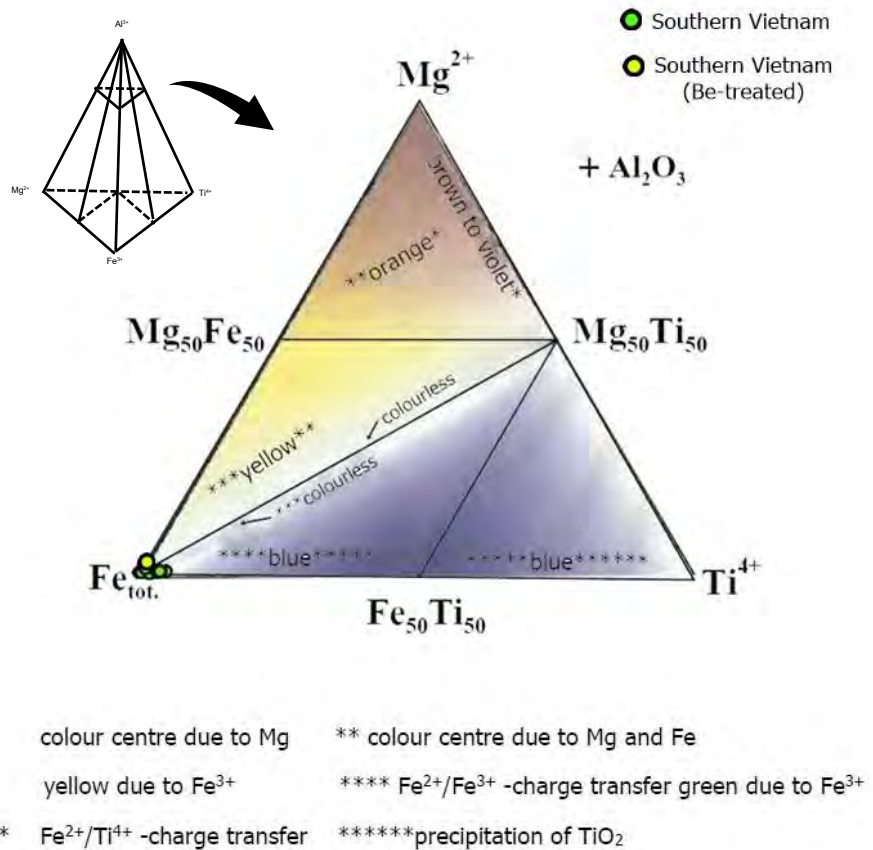
การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด ของตัวอย่างพอลอยแซปไฟร์สีเขียวมเหลืองธรรมชาติและพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม โดยเครื่อง FTIR แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ  $H_2O$ ,  $CO_2$ , CH-Stretching หลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพแสดงการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดพบว่าการดูดกลืน OH Group ที่ตำแหน่ง 3620 และ  $3697\text{ cm}^{-1}$  และ การดูดกลืน CH - Stretching ที่ตำแหน่ง 2850 และ  $2915\text{ cm}^{-1}$  ไม่เด่นชัด ไม่พบลักษณะการตกท้องช้างบริเวณช่วงการดูดกลืน OH Group (อินทโสภา et al., 2545)

ตารางที่ 5.1 สรุปลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังจากการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม

สี	เขียนอมเหลืองเปลี่ยนเป็นเหลือง
มลทิน	เกิดการหลอมละลายบางส่วนของแร่ที่เป็นมลทินภายใน อีกทั้งยังพบการแห้งกรังของของเหลวภายในมลทิน และพบมลทินที่มีรูปร่างคล้ายท่อหรือสปริงขดไปมา
การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด	ไม่พบการตกห้องข้างบริเวณช่วงการดูดกลืน OH group และแสดงการดูดกลืน CH-Stretching ที่ตำแหน่ง 2850 และ 2915 $\text{cm}^{-1}$ ที่ไม่เด่นชัด
การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงตามองเห็น และช่วงใกล้อินฟราเรด	แสดงยอดการดูดกลืน $\text{Fe}^{3+}$ ที่ความยาวคลื่น 450 nm สูงขึ้นและแสดงการดูดกลืน $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ น้อยลงที่ความยาวคลื่น 450-700 nm
การวิเคราะห์ธาตุเบริลเลียม	พบธาตุเบริลเลียมในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ที่ตำแหน่ง 313.010 nm

การเกิดสีเหลืองในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม สามารถอธิบายได้จาก รูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์รูปเปลี่ยนสีด้านของธาตุร่องรอยในระบบ Al-Fe-Mg-Ti (Häger, 2001) จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุร่องรอยต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในโครงสร้างของพลอยกับสาเหตุของการเกิดสีเหลืองในตัวอย่างพลอยดังกล่าว พบว่ามีการแพร่ของธาตุเบริลเลียม จากภายนอกเข้าไปในโครงสร้างของคอร์รันดัม และสีเหลืองนั้นเกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียรมีสาเหตุมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างธาตุเบริลเลียมและแมกนีเซียม (Be+Mg) นั้นต้องมีส่วนเหลือจากที่ธาตุทั้งสองไปรวมตัวเป็น  $\text{MgTiO}_3$  และ  $\text{BeTiO}_3$  Cluster หรือก็คือ  $(\text{Be}+\text{Mg}) > \text{Ti}$  จึงเกิดสีเหลือง (พิสุทธอนนท์ et al., 2551) เนื่องจากธาตุ Be ไม่สามารถวิเคราะห์เชิงปริมาณได้จาก EPMA และ LIBS จึงเป็นข้อจำกัดสำหรับการแปลความหมายและวิเคราะห์ผล การศึกษาการเกิดสีเหลืองที่ชัดเจนของพลอยแซปไฟร์ในครั้งนี้ อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์ด้วย LIBS ของตัวอย่างที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแสดงให้เห็นชัดเจนว่ามี Be ในตัวอย่างเหล่านี้





รูปที่ 5.4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์รูปเปลี่ยนสีด้านของธาตุร่องรอยในระบบ Al-Fe-Mg-Ti (Häger, 2001)

จากข้อมูลทั้งหมดที่วิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า พอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติทางตอนใต้ของประเทศเวียดนามที่มีการกำเนิดสัมพันธ์กับหินอัลคาไลโนบะซอลต์ เมื่อผ่านการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งลักษณะทางกายภาพพบว่าหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพทำให้เกิดสีเหลือง มลทินมีลักษณะรูปร่างแตกต่างไปจากเดิมโดยเฉพาะมลทินที่ประกอบด้วยของเหลวเนื่องมาจากความร้อนสูงที่ใช้ในการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม และมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยตรวจสอบพบธาตุเบริลเลียมในตัวอย่างพอลอย จากการตรวจสอบคุณสมบัติการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR พบว่ามีการดูดกลืน  $Fe^{3+}$  เพิ่มมากขึ้นและ  $Fe^{2+}/Ti^{4+}$  ต่ำลง เกิดจากการเผาในสภาวะออกซิไดซ์ ซึ่งทำให้เกิดการออกซิไดซ์ ของ  $Fe^{2+}$  ไปเป็น  $Fe^{3+}$  และ คุณสมบัติการดูดกลืนแสงช่วงอินฟราเรด พบว่าแสดงการดูดกลืน OH group ได้ไม่เด่นชัด สาเหตุของการเกิดสีเหลืองหลังการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องมาจากการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม เนื่องจาก  $Be^{2+}$  เข้าไปแทนที่  $Al^{3+}$  ในโครงสร้างของคอร์รัมด์ัม ( Emmett, et. al. 2003: 98-102 ) ศูนย์กลางสี่ที่เสถียรมีสาเหตุมาจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างธาตุเบริลเลียมและแมกนีเซียม ( $Be+Mg$ ) นั้นต้องมีส่วนเหลือจากที่ธาตุทั้งสองไปรวมตัวเป็น  $MgTiO_3$  และ  $BeTiO_3$  Cluster คือ  $(Be+Mg) > Ti$  (พิสุทธอนันท์ et al., 2551)

## เอกสารอ้างอิง

- วิสุทธิ พิสุทธอานนท์., พรสวาท วัฒนกุล., วิลาวลัย อติชาติ., Tobias Häger., ชนินยา สมบุญ., กฤตยา ปัทมาลัย., ทนง ลีลาวัดนสุข. 2547. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการวิจัยการศึกษาตัวบ่งชี้ลักษณะของพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนหรือรังสี ปีที่3" กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- วิสุทธิ พิสุทธอานนท์., พรสวาท วัฒนกุล., ชนินยา สมบุญ., ชาญ ศานติตานนท์., นารวี สุเสวี. 2551. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการวิจัยการวิจัยด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเชิงลึกของวัสดุอัญมณี : ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอรัันดัม" กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- สุพร อินทโสภา., วิลาวลัย อติชาติ., วิสุทธิ พิสุทธอานนท์., บุญทวี ศรีประเสริฐ. 2545. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการศึกษามลทินในพลอยคอรัันดัมเพื่อการจัดแบ่งแหล่งกำเนิดและมาตรฐาน." กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี.
- Fritsch, E., and Rossman G. "An Update on Color in Gems. Part 2: Colors Involving Multiple Atoms and Color Centers." *Gems & Gemology*, no. 24(1) (1988): 3-15.
- G. Giuliani, D. Ohnenstetter, A.E. Fallick, L. Groat, J. Fagan The geology and genesis of gem corundum deposits L.A. Groat (Ed.), *Geology of Gem Deposits*, Mineralogical Association of Canada, Short Course Series 44, Tucson, USA (2014), pp. 29-112
- Haroarson, B.S. 2014. Structural geology of the western branch of the east African rift: Tectonics, Volcanology and geothermal activity. *Geothermal Resources*.
- Huong, Le Thi-Thu, Tobias Häger, Wolfgang Hofmeister, Christoph Hauzenberger, Dietmar Schwarz, Pham Van Long, Ursula Wehmeister, Nguyen Ngoc Khoi, and Nguy Tuyet Nhung. "Gemstones from Vietnam: An Update." *Gems & Gemology* 48, no. 3 (September 1, 2012): 158–7 <https://doi.org/10.5741/GEMS.48.3.158>.
- Peucat JJ, Ruffault P, Fritch E, Bouhnik-Le-Coz M, Simonet C, Lasnier B (2007) Ga/Mg ratio as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires. *Lithos* 98: 261–274
- Pisutha-Armond, V., Hager T., Wathanakul P., and Atichat W. "Yellow and brown Coloration in beryllium-treated sapphires." *Journal of Gemmology*, 29(2) (2004): 77-103.
- Smith, Christopher P., Robert C. Kammeding, Alice S. Keller, and Adolf Peretti.

“Kenneth V, Scarratt, Nguyen Dang Khoa, and Saverio Repetto.” GEMS & GEMOLOGY, 1995.

Sutherland F.L; Schwarz D; Jobbins E.A; Coenraads, R.R; Webb G.. 1998. Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: a comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields. *Journal of Gemmology*. 26. (2): 65-85.

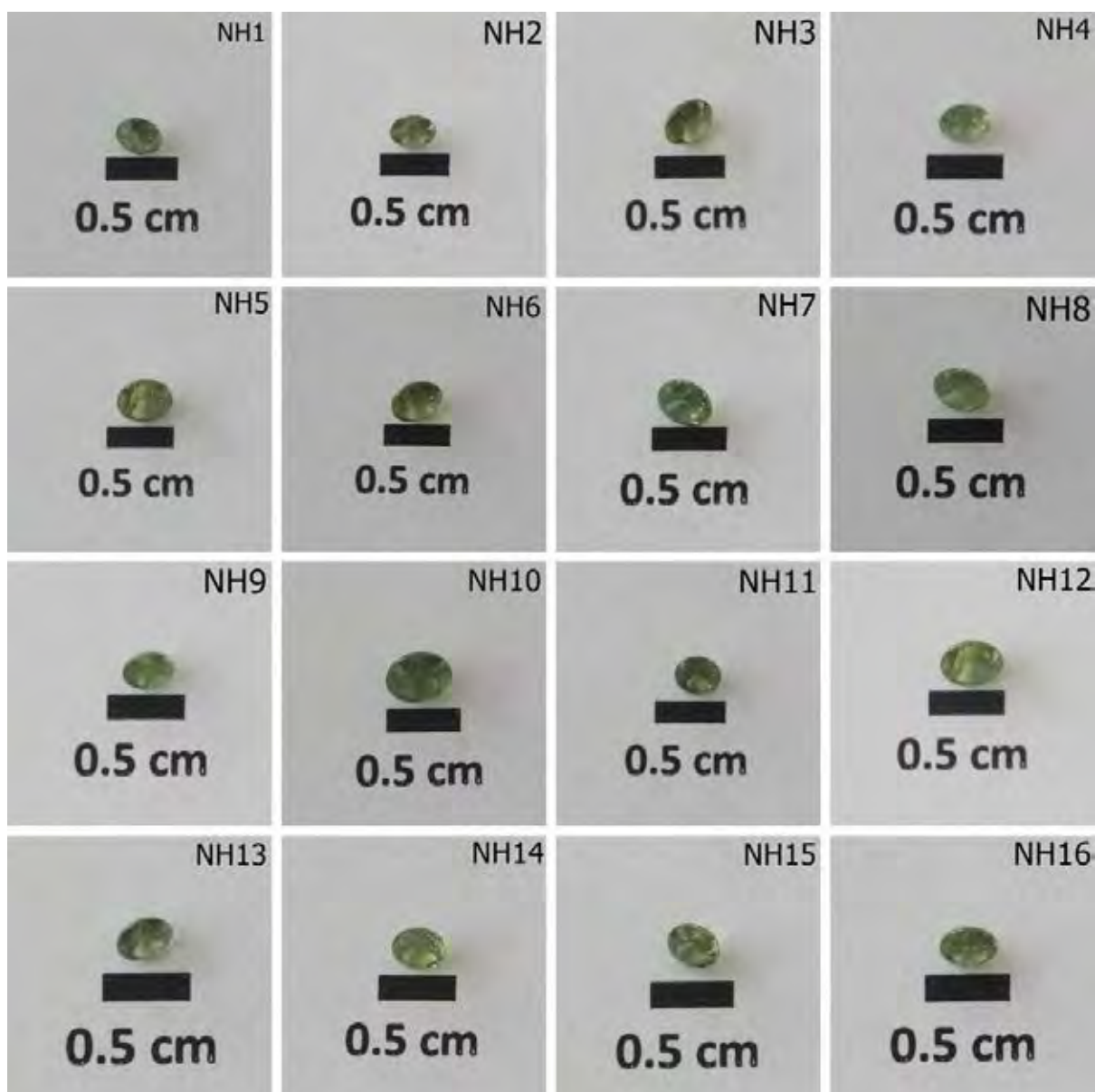
Themelis. T. *The heat treated of Ruby and Sapphires*. USA: GemLab Inc, 1992.

*Beryllium-treated rubies and sapphires*. Los Angeles: A & T Publishing, 2003.

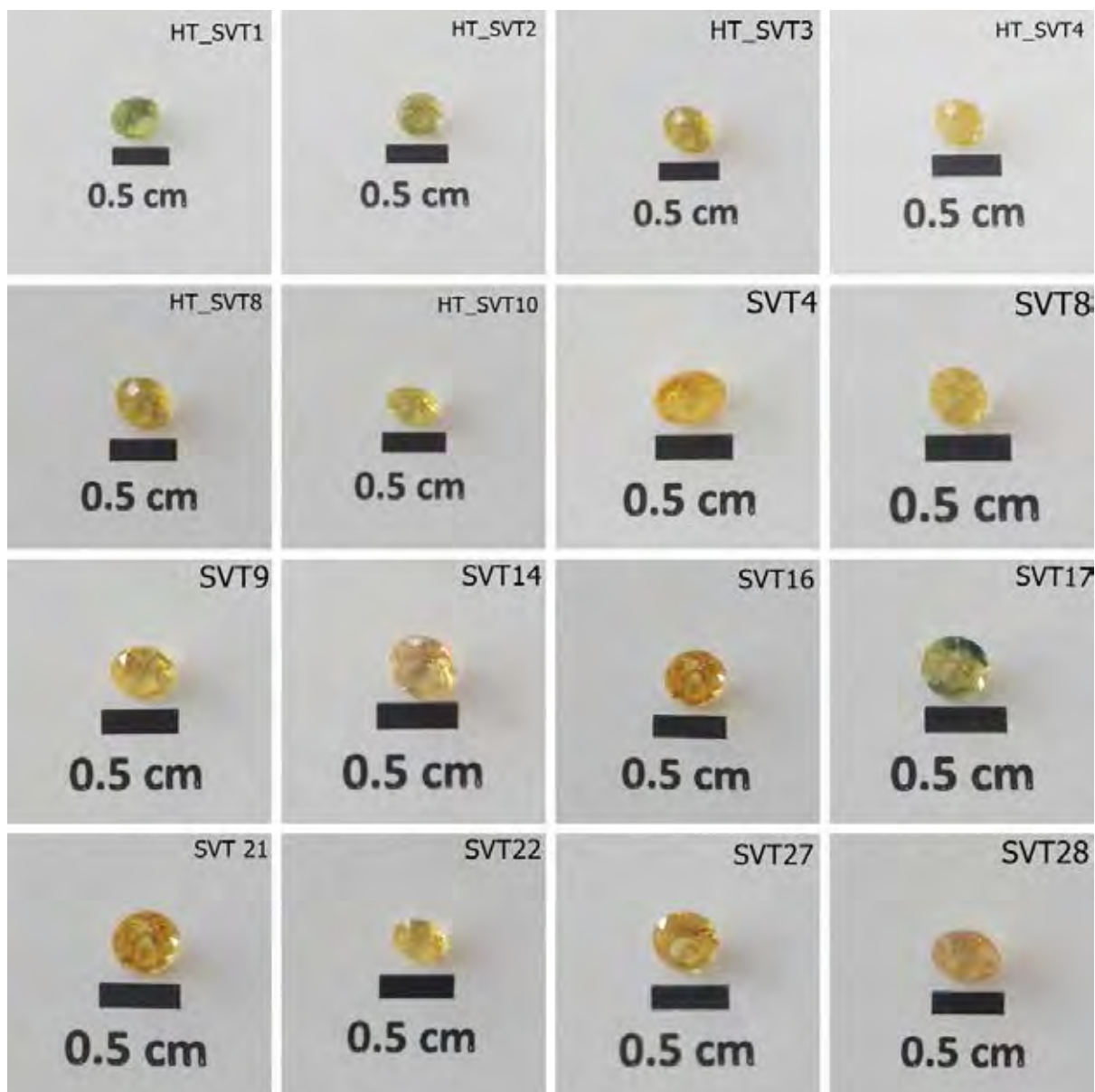
## ภาคผนวก ก

ภาพตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวมหาเศรษฐี และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการ  
เผาพร้อมกับสารเบริลเลียม ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์  
จากแหล่งทางตอนใต้ ประเทศเวียดนาม

ภาพตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม



ภาพตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม  
จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม



ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ  
จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม

Sample	Color	Transparency	Weight (ct)	SG (g/cm <sup>3</sup> )	RI		Birefringence	Fluorescence	
					n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>		LW	SW
NH1	Yellowish Green	Translucent	0.1845	3.90	1.770	1.762	0.008	Inert	Inert
NH2	Yellowish Green	Translucent	0.3370	4.06	1.772	1.765	0.007	Inert	Inert
NH3	Yellowish Green	Translucent	0.1590	3.83	1.775	1.767	0.008	Inert	Inert
NH4	Yellowish Green	Translucent	0.2990	3.84	1.775	1.768	0.007	Inert	Inert
NH5	Yellowish Green	Translucent	0.1760	3.74	1.770	1.765	0.005	Inert	Inert
NH6	Yellowish Green	Translucent	0.3300	3.93	1.779	1.772	0.007	Inert	Inert
NH7	Yellowish Green	Translucent	0.0775	4.13	1.780	1.772	0.008	Inert	Inert
NH8	Yellowish Green	Translucent	0.1900	3.80	1.777	1.771	0.006	Inert	Inert
NH9	Yellowish Green	Translucent	0.2740	3.80	1.770	1.762	0.008	Inert	Inert
NH10	Yellowish Green	Translucent	0.2530	4.05	1.780	1.772	0.008	Inert	Inert
NH11	Yellowish Green	Translucent	0.1490	4.05	1.773	1.765	0.008	Inert	Inert
NH12	Yellowish Green	Translucent	0.1560	4.00	1.774	1.768	0.006	Inert	Inert
NH13	Yellowish Green	Translucent	0.1370	3.97	1.774	1.766	0.008	Inert	Inert
NH14	Yellowish Green	Translucent	0.1750	4.02	1.771	1.762	0.009	Inert	Inert
NH15	Yellowish Green	Translucent	0.1775	3.90	1.775	1.767	0.008	Inert	Inert
NH16	Yellowish Green	Translucent	0.1770	3.90	1.775	1.767	0.008	Inert	Inert

ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดย  
การเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม จากตอนใต้ของประเทศเวียดนาม

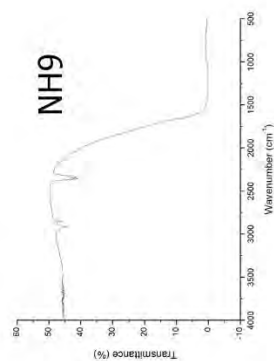
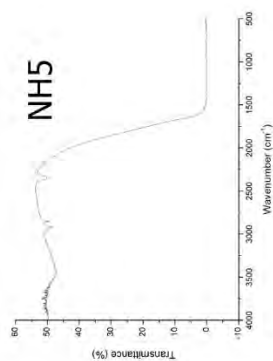
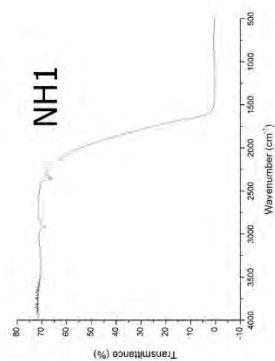
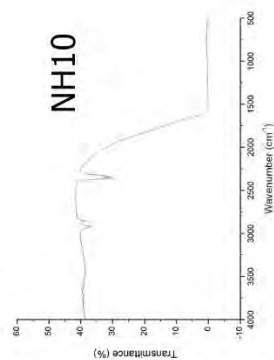
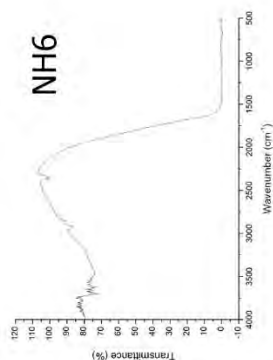
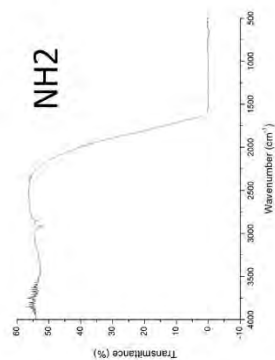
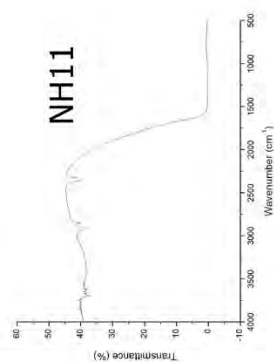
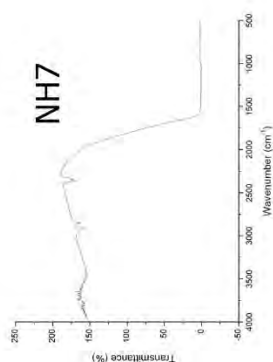
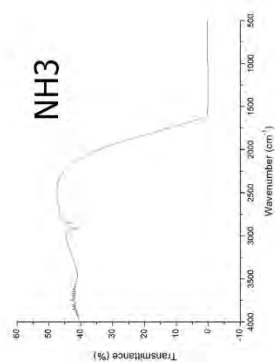
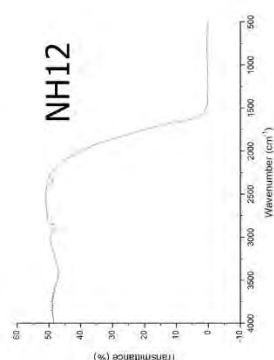
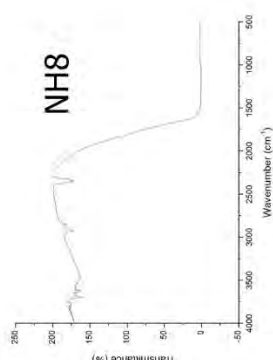
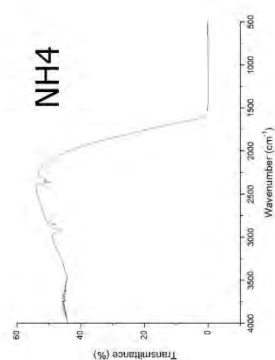
Sample	Color	Transparency	Weight (ct)	SG (g/cm <sup>3</sup> )	RI		Birefringence	Fluorescence	
					n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>		LW	SW
HT-SVT1	Yellow	Translucent	0.1720	3.81	1.774	1.768	0.006	Inert	Inert
HT-SVT2	Yellow	Translucent	0.3555	3.95	1.769	1.760	0.009	Inert	Inert
HT-SVT3	Yellow	Translucent	0.2332	3.92	1.775	1.769	0.006	Inert	Inert
HT-SVT4	Yellow	Translucent	0.3320	3.90	1.780	1.775	0.005	Inert	Inert
HT-SVT8	Yellow	Translucent	0.2310	4.10	1.772	1.763	0.009	Inert	Inert
HT-SVT10	Yellow	Translucent	0.2200	4.05	1.776	1.700	0.006	Inert	Inert
SVT4	Yellow	Translucent	0.2626	3.88	1.781	1.776	0.005	Inert	Inert
SVT8	Yellow	Translucent	0.2410	3.92	1.775	1.770	0.005	Inert	Inert
SVT9	Yellow	Translucent	0.1320	3.96	1.774	1.767	0.007	Inert	Inert
SVT14	Yellow	Translucent	0.1680	4.01	1.775	1.770	0.005	Inert	Inert
SVT16	Yellow	Translucent	0.1772	3.89	1.770	1.762	0.008	Inert	Inert
SVT17	Yellow	Translucent	0.3102	3.99	1.774	1.768	0.006	Inert	Inert
SVT21	Yellow	Translucent	0.1504	3.95	1.780	1.775	0.005	Inert	Inert
SVT22	Yellow	Translucent	0.3200	4.04	1.775	1.770	0.005	Inert	Inert
SVT27	Yellow	Translucent	0.2710	3.93	1.772	1.763	0.009	Inert	Inert
SVT28	Yellow	Translucent	0.1442	3.94	1.779	1.770	0.009	Inert	Inert

## ภาคผนวก ข

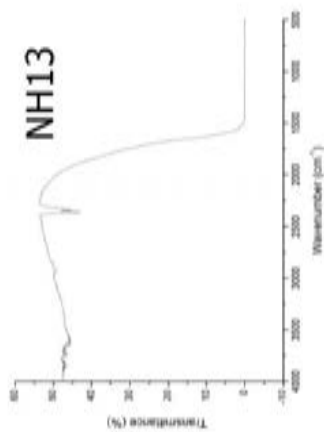
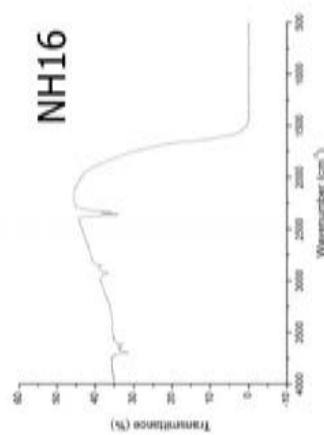
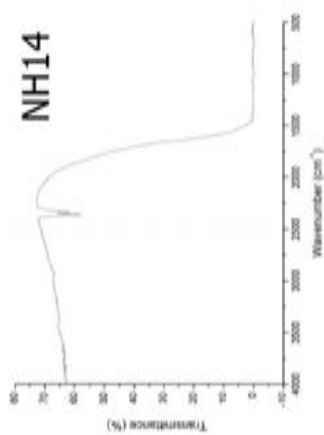
ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)  
พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง  
คุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม



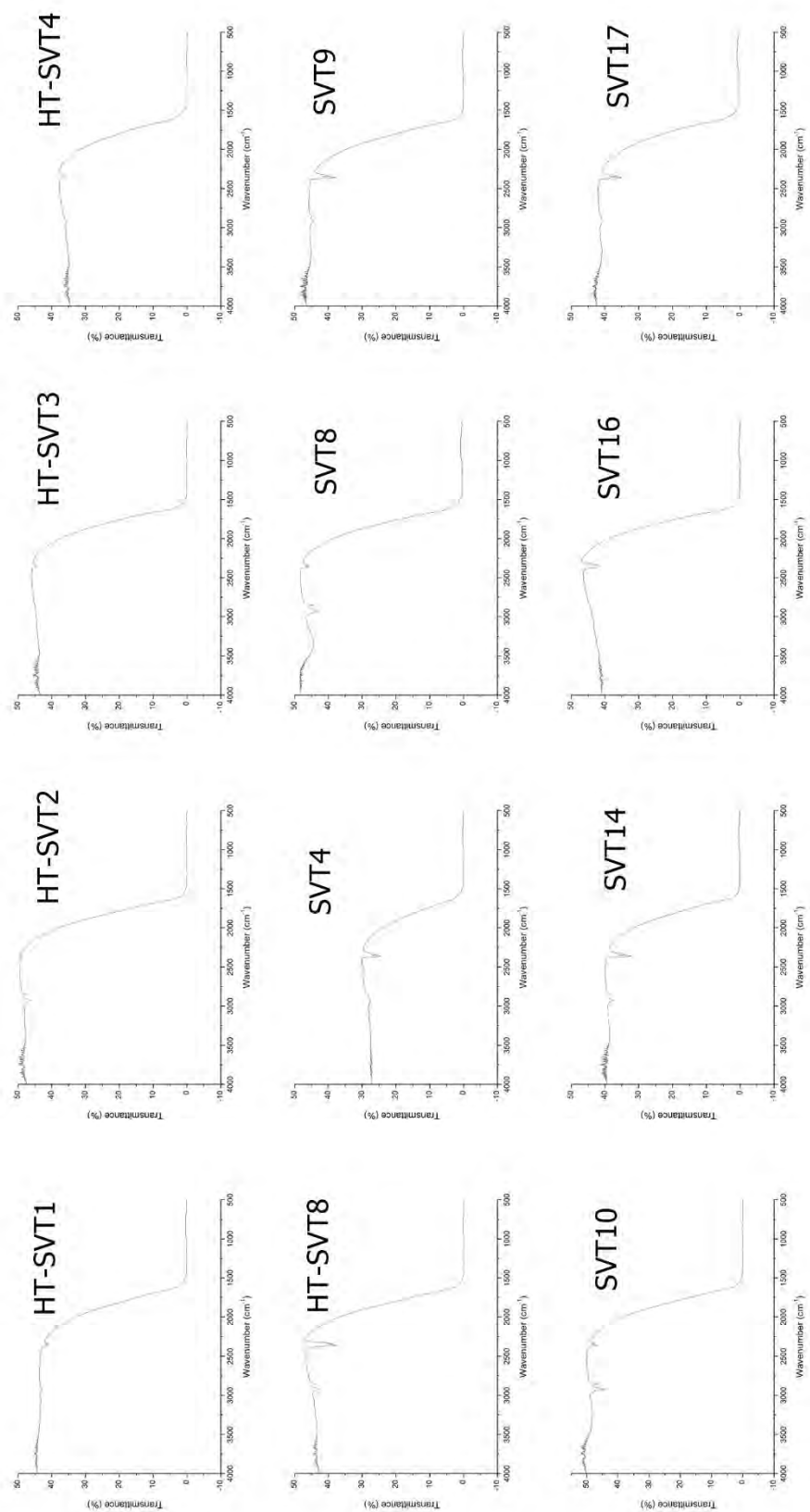
ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)  
พอลิเอทิลีนโพรพิลีนไฮดรอกซีเมทิลเอทิลอะครีเลต



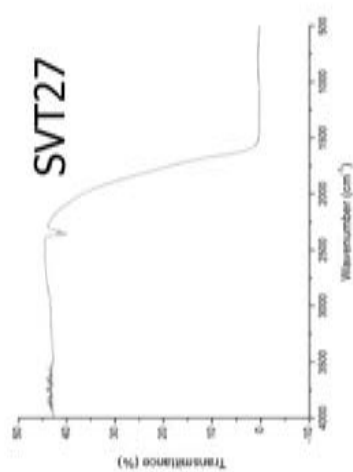
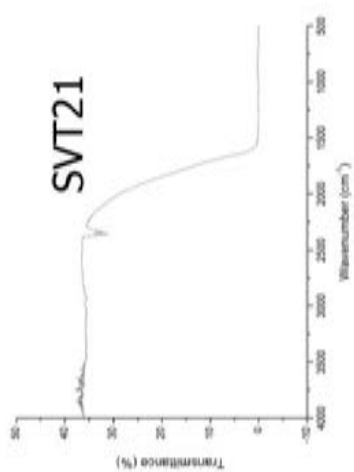
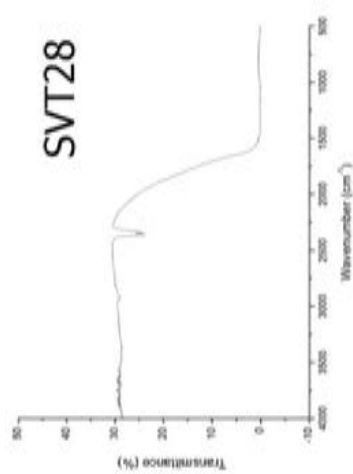
ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)  
พอลิเอทิลีนโพรพิลีนไฮดรอกซีเมทิลเอทิลอะครีเลต



ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)  
พอลิเอชพีไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม



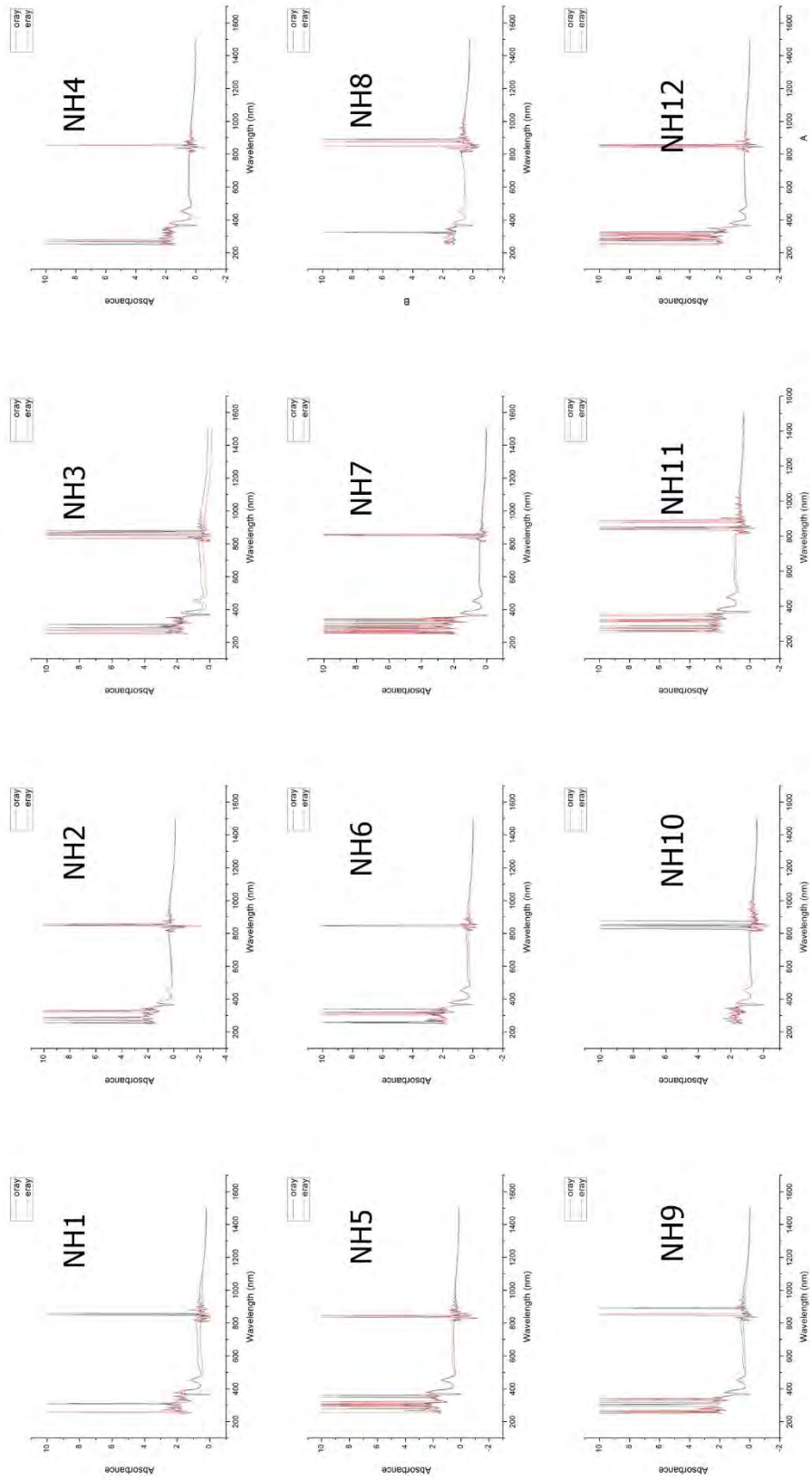
ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)  
พอลอยเอสเตอร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบรลเลียม



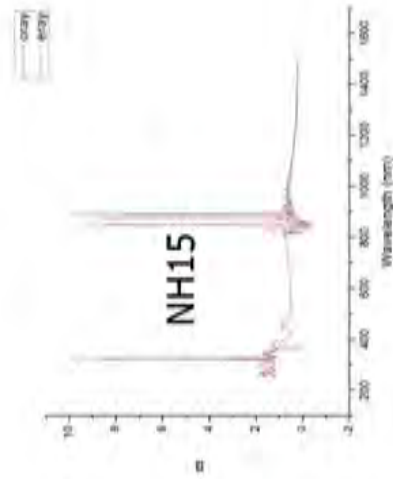
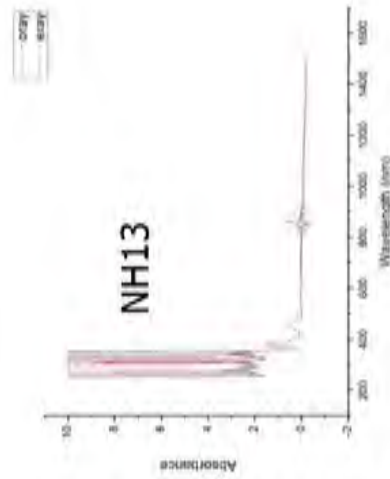
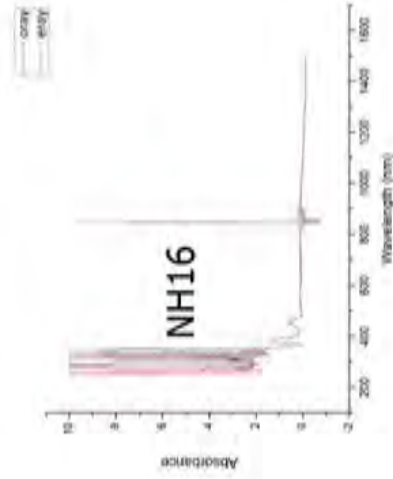
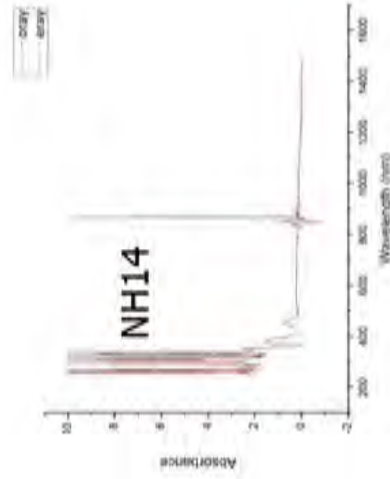
## ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR  
พอลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพอลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง  
คุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม

ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR  
พอลิเอทไพลีนที่เชื่อมด้วยไฮดรอกซีอะคริลิก



ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR  
พอลิเมอร์ซีอีวอมเหล็องธรรมชาติ



## ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ และพลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุง  
คุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียมจากแหล่งทางตอนใต้ของประเทศเวียดนาม  
ด้วย EPMA และ LIBS



## ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EPMA

## พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ

Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Total
NH1-1	0.003	97.838	0	0	1.648	0.01	0.012	0	0.01	0.007	0.01	99.538
NH1-2	0.058	97.319	0.011	0.016	1.493	0	0	0	0.008	0.093	0	98.998
NH1-3	0.017	95.493	0.014	0	1.545	0.003	0.001	0.004	0.008	0.089	0.005	97.179
NH3-1	0.033	96.874	0.004	0	1.509	0	0.014	0.056	0	0.079	0	98.569
NH3-2	0.014	96.875	0.006	0.007	1.428	0.013	0.01	0.036	0.005	0.181	0.021	98.596
NH3-3	0.072	97.798	0.004	0.033	1.379	0	0	0.004	0	0.002	0	99.292
NH4-1	0.069	97.415	0	0.026	1.483	0	0.001	0	0.007	0.109	0.009	99.119
NH4-2	0.028	97.302	0.002	0.013	1.44	0	0	0	0.002	0.1	0	98.887
NH4-3	0	97.469	0	0.014	1.548	0	0	0.048	0.011	0.058	0.008	99.156
NH5-1	0.022	98.765	0.034	0.024	1.484	0.004	0.006	0	0.012	0	0	100.351
NH5-2	0	97.324	0.002	0.017	1.497	0	0	0	0	0.114	0.019	98.973
NH5-3	0.036	97.623	0.015	0.005	1.47	0	0.003	0.012	0.005	0.049	0	99.218
NH9-1	0.014	97.799	0.01	0.022	1.298	0	0.003	0	0	0	0.015	99.161
NH9-2	0.047	97.845	0	0.015	1.33	0	0	0.004	0	0.019	0.007	99.267
NH9-3	0.033	95.747	0	0.014	1.389	0.001	0.016	0	0.013	0.153	0	97.366
NH14-1	0.008	97.454	0	0	1.405	0	0	0.028	0	0.084	0.019	98.998
NH14-2	0.025	97.372	0.017	0.021	1.34	0	0	0	0.006	0.053	0	98.834
NH14-3	0	97.946	0.016	0.02	1.442	0	0	0	0.009	0.079	0.021	99.533
NH12-1	0.085	98.243	0	0.015	1.221	0	0.016	0.012	0.003	0.155	0	99.75
NH12-2	0.016	98.313	0.013	0	1.196	0	0.001	0.008	0.008	0.056	0	99.611
NH12-3	0.055	98.911	0.013	0.003	1.126	0	0.01	0	0.011	0.046	0	100.175
NH10-1	0.03	98.978	0	0.038	1.285	0	0	0.012	0.023	0.072	0.03	100.468
NH10-2	0.014	98.369	0	0	1.326	0	0	0.024	0	0.104	0	99.837
NH10-3	0.044	98.283	0.022	0	1.385	0	0.011	0	0.004	0.111	0.007	99.867

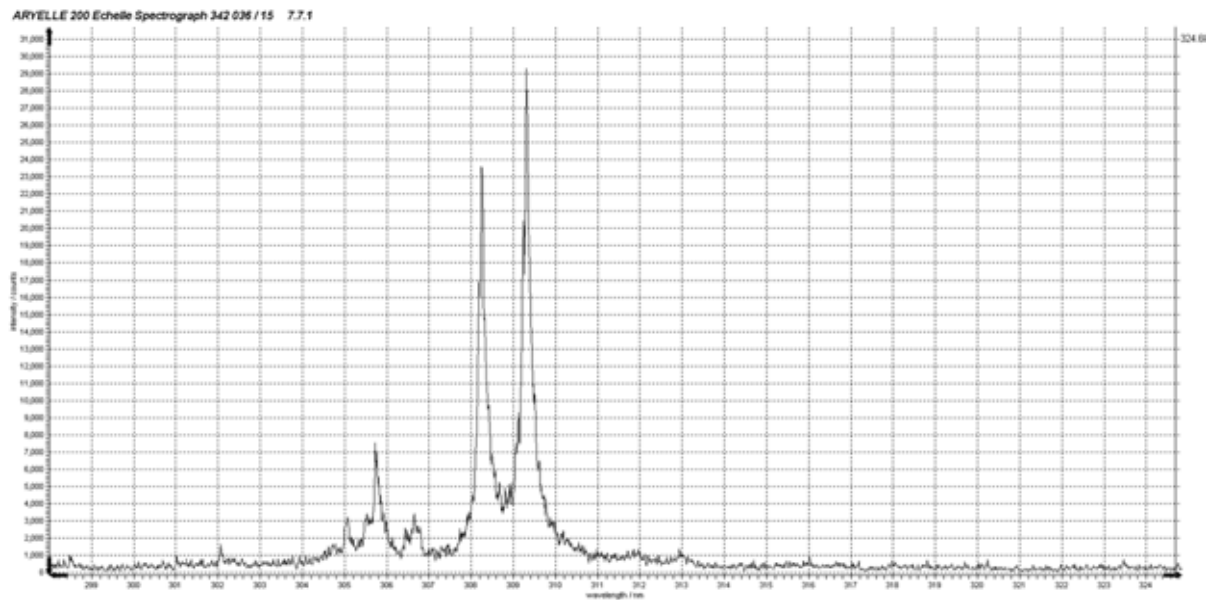
## ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EPMA

พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียน

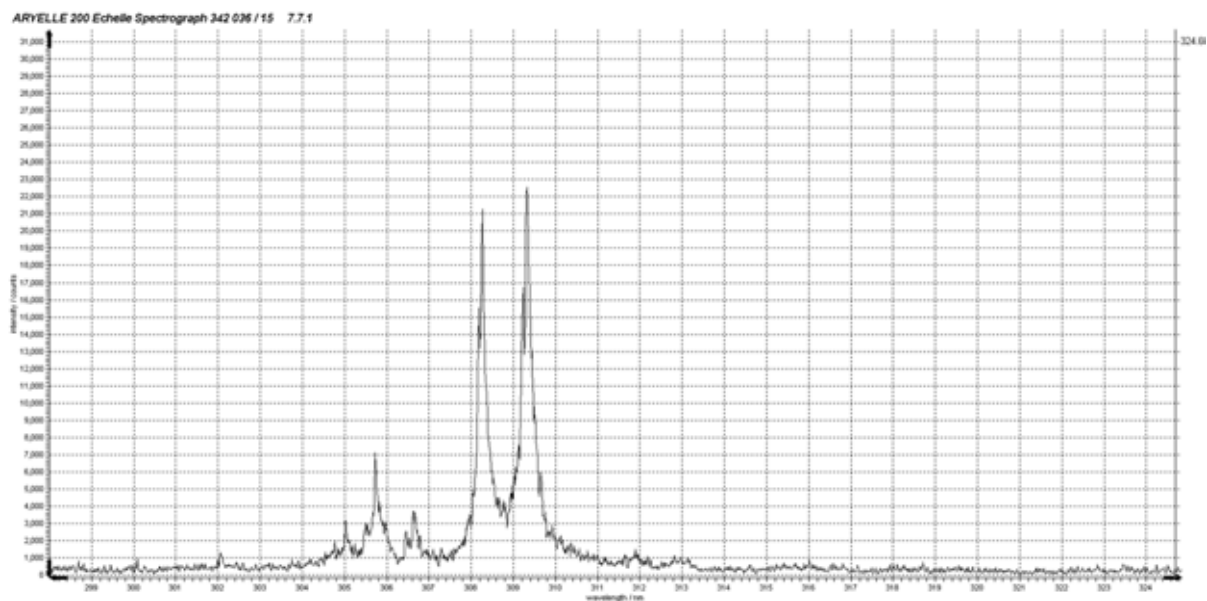
Sample	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	FeO	MgO	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Total
HT-SVT8-1	0.014	97.935	0	0	1.784	0	0	0	0	0.066	0.008	99.807
HT-SVT8-2	0.028	97.77	0.009	0	1.599	0	0	0.016	0	0.106	0.005	99.533
HT-SVT8-3	0.056	97.902	0.007	0	1.526	0	0	0.045	0.035	0.047	0.007	99.625
SVT4-1	0	97.88	0.004	0.006	1.555	0.017	0.01	0.012	0	0.038	0.023	99.545
SVT4-2	0	97.019	0	0.045	1.545	0	0.006	0	0.01	0.04	0	98.665
SVT4-3	0.022	97.756	0	0	1.517	0.004	0.005	0	0.026	0.07	0	99.4
HT-SVT3-1	0.064	97.666	0.008	0	1.331	0	0	0	0	0	0.029	99.098
HT-SVT3-2	0.011	97.445	0	0.005	1.269	0	0	0	0	0.035	0.019	98.784
HT-SVT3-3	0.008	96.602	0	0.003	1.37	0.001	0.011	0.024	0.005	0.07	0	98.094
HT-SVT1-1	0	95.161	0.015	0.008	1.34	0	0	0.032	0.005	0	0	96.561
HT-SVT1-2	0.039	97.896	0.011	0.015	1.359	0	0	0	0.008	0	0	99.328
HT-SVT1-3	0.019	97.941	0.001	0	1.408	0	0	0	0.033	0.035	0	99.437
SVT22-1	0.011	97.088	0.013	0.015	1.327	0	0	0	0.01	0.002	0	98.466
SVT22-2	0	97.955	0.018	0	1.369	0.007	0	0.044	0.007	0.04	0	99.44
SVT22-3	0.014	97.051	0	0.005	1.379	0	0	0	0.016	0.033	0.019	98.517
SVT14-1	0.006	97.204	0.004	0.022	1.401	0	0	0.048	0.021	0	0	98.706
SVT14-2	0.05	97.386	0.006	0	1.392	0	0.007	0.028	0	0	0	98.869
SVT14-3	0.025	97.023	0	0.018	1.358	0	0.006	0.04	0.001	0.105	0.017	98.593
HT-SVT10-1	0.025	97.444	0.011	0.038	1.195	0	0.002	0.048	0.022	0.121	0	98.906
HT-SVT10-2	0.05	97.905	0	0	1.159	0	0	0.012	0.021	0	0.003	99.15
SVT9-1	0	97.145	0	0	1.388	0	0.009	0.036	0.012	0	0	98.59
SVT9-2	0.025	97.845	0.005	0.015	1.402	0	0	0	0	0.112	0.023	99.427
SVT9-3	0.039	96.066	0.012	0.046	1.401	0	0	0	0	0	0.006	97.57
HT-SVT10-3	0	98.677	0.007	0.009	1.151	0	0	0	0.001	0.042	0	99.887

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS  
พลอยแซปไฟร์สีเขียวอมเหลืองธรรมชาติ

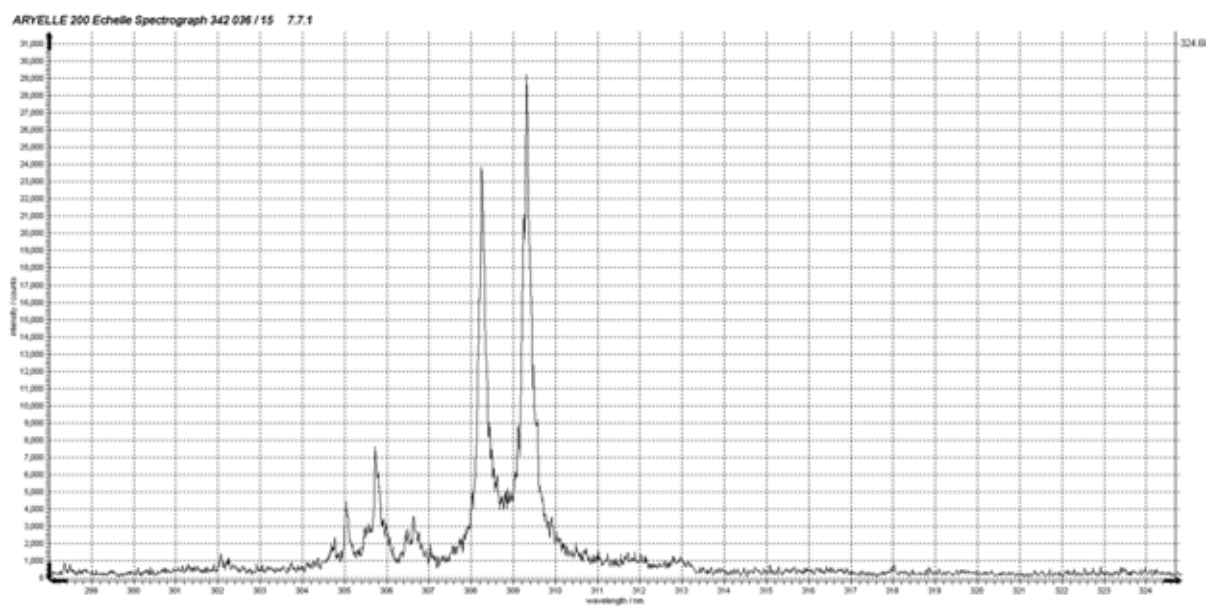
NH4



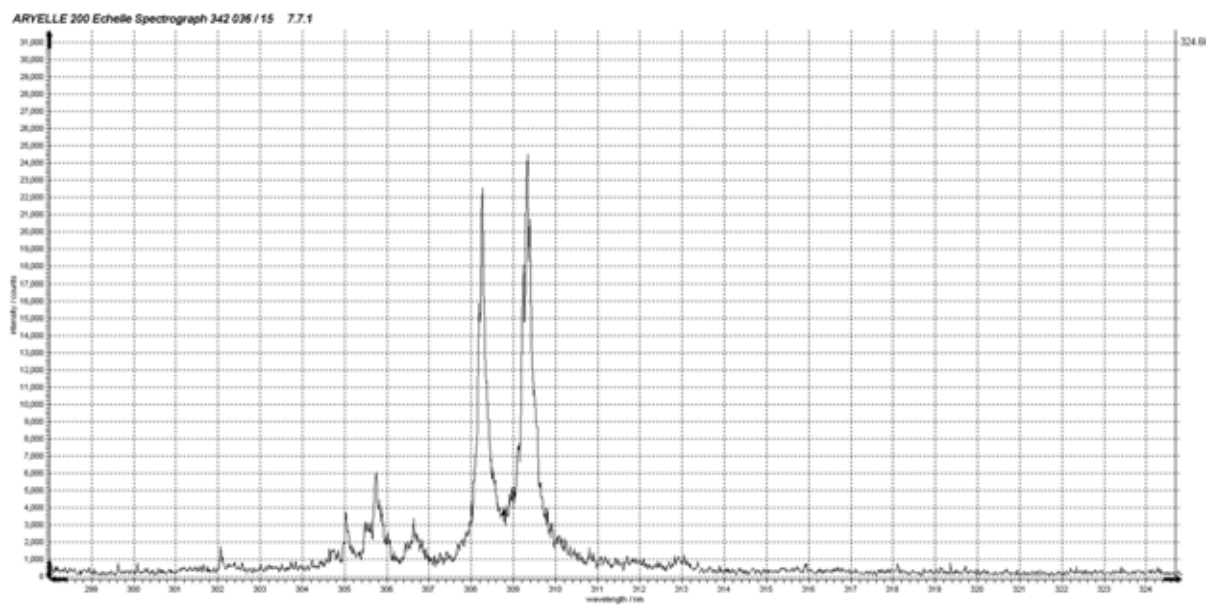
NH9



NH10

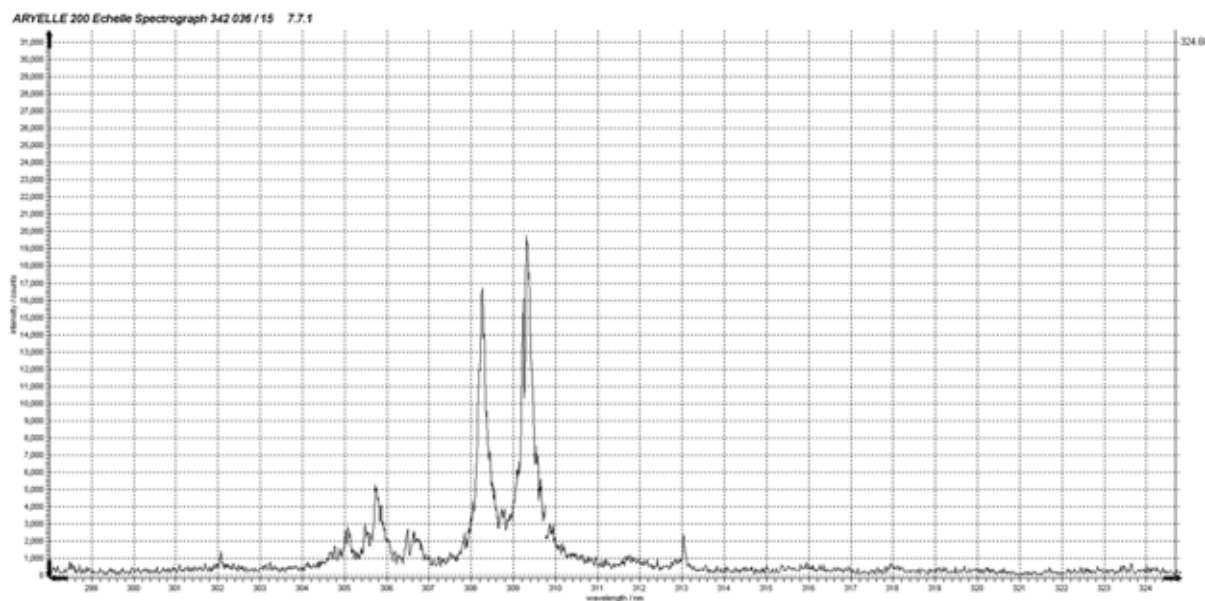


NH12

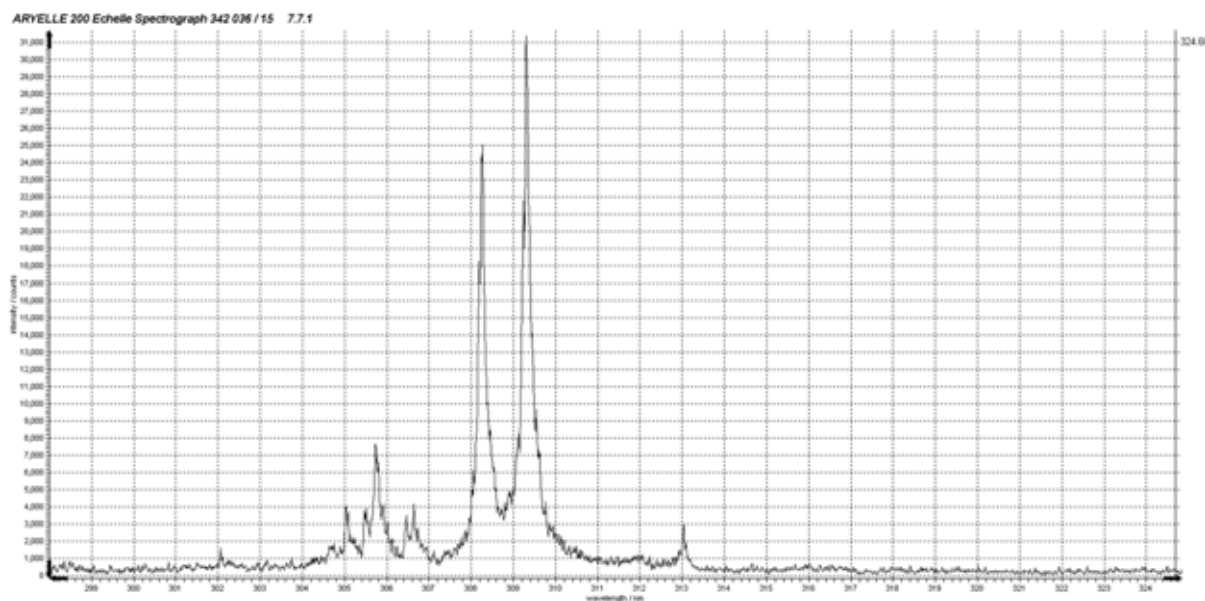


ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย LIBS  
พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาพร้อมกับสารเบริลเลียม

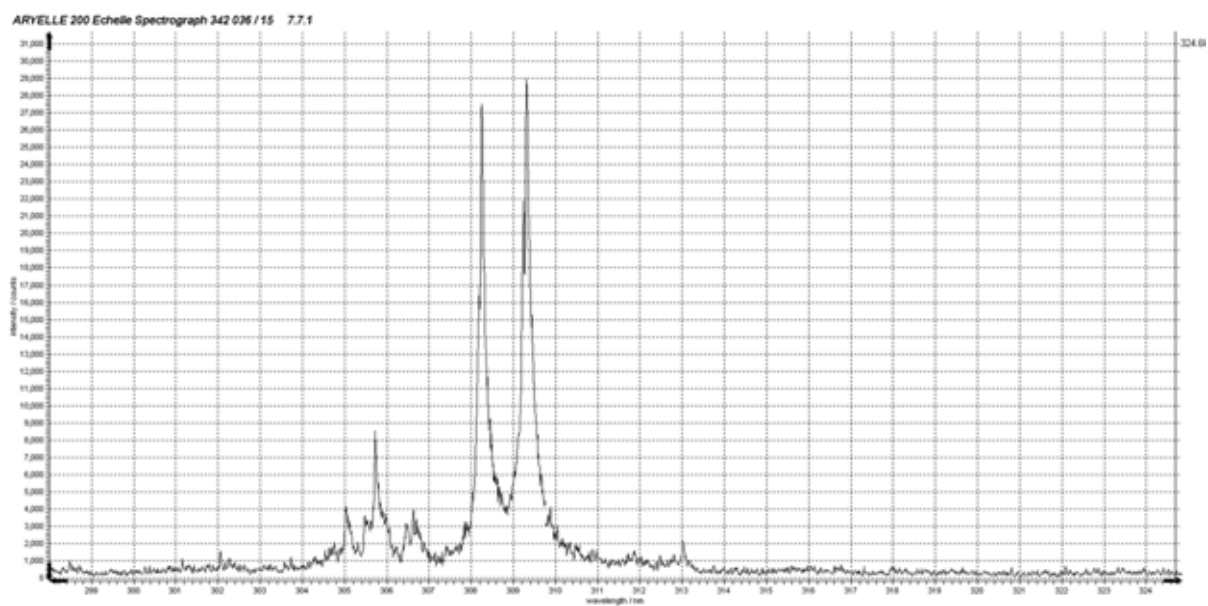
HT\_SVT1



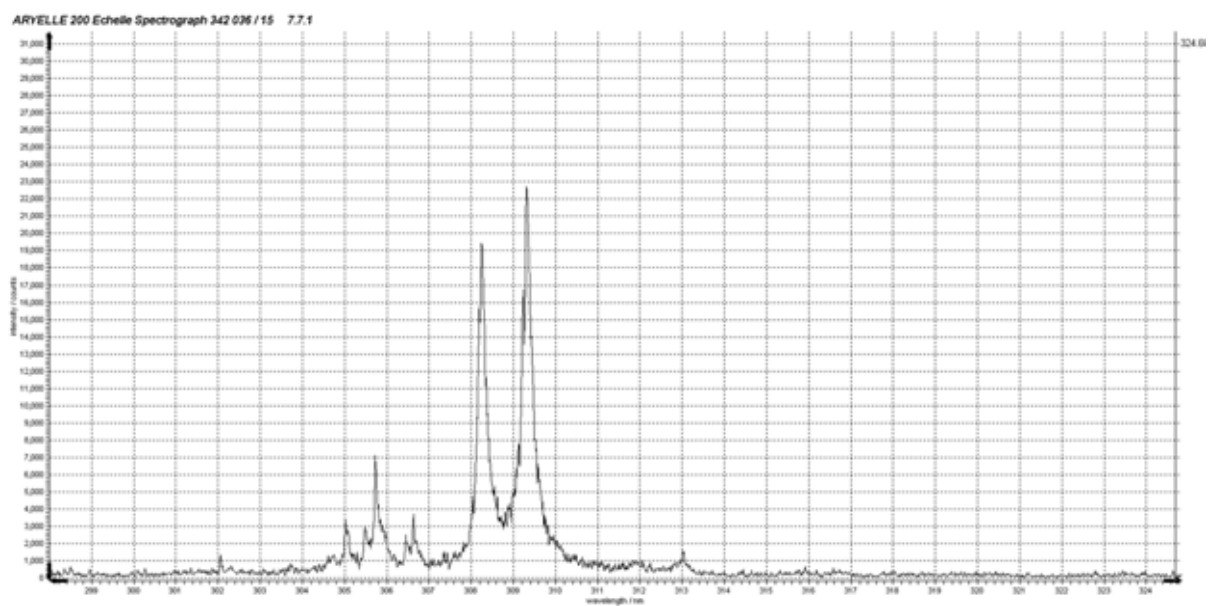
HT\_SVT2



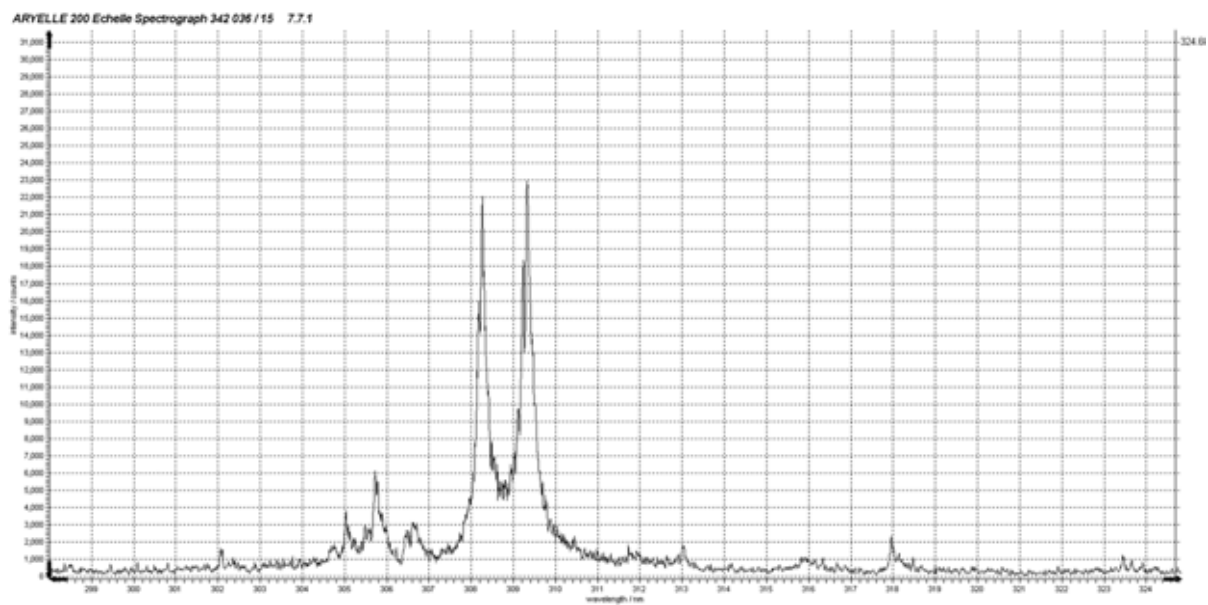
HT\_SVT3



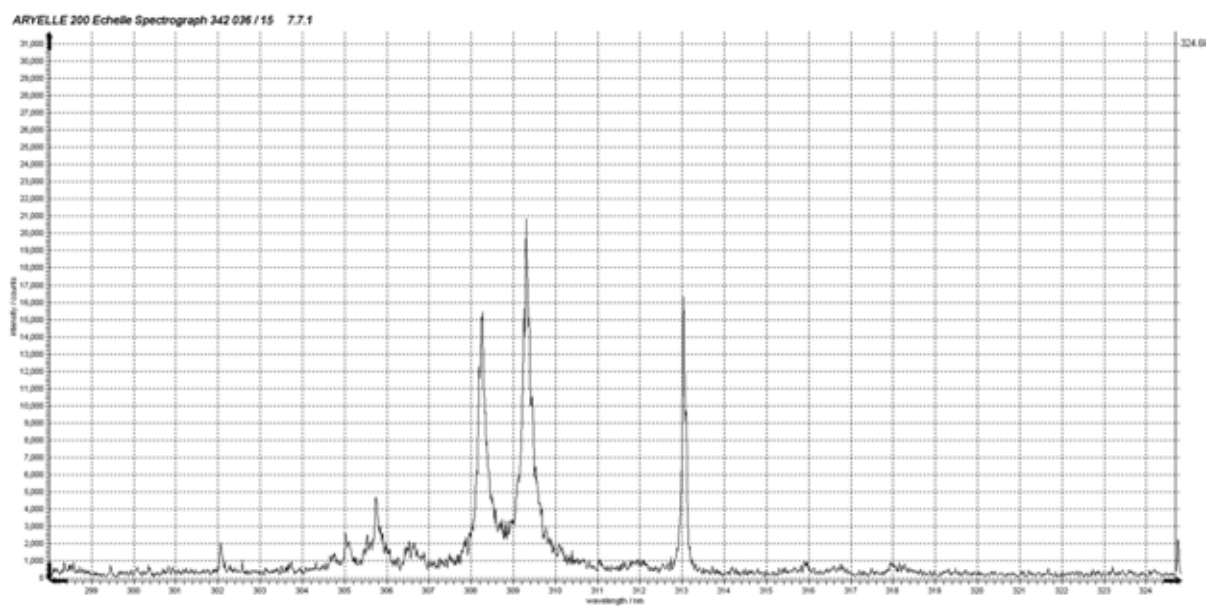
HT\_SVT4



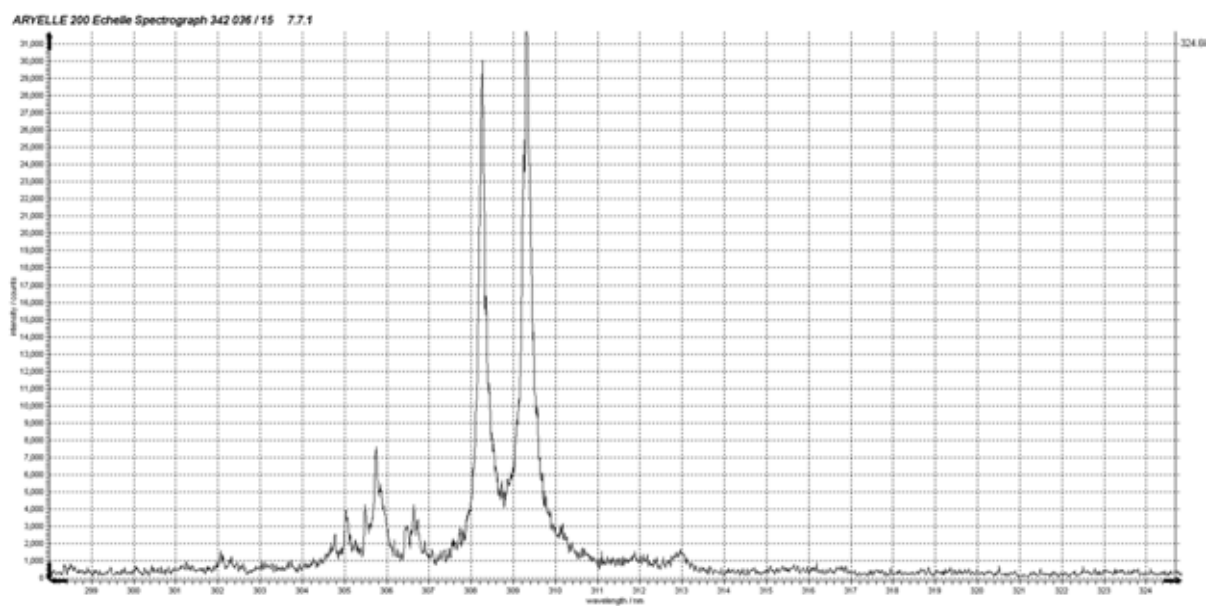
HT\_SVT8



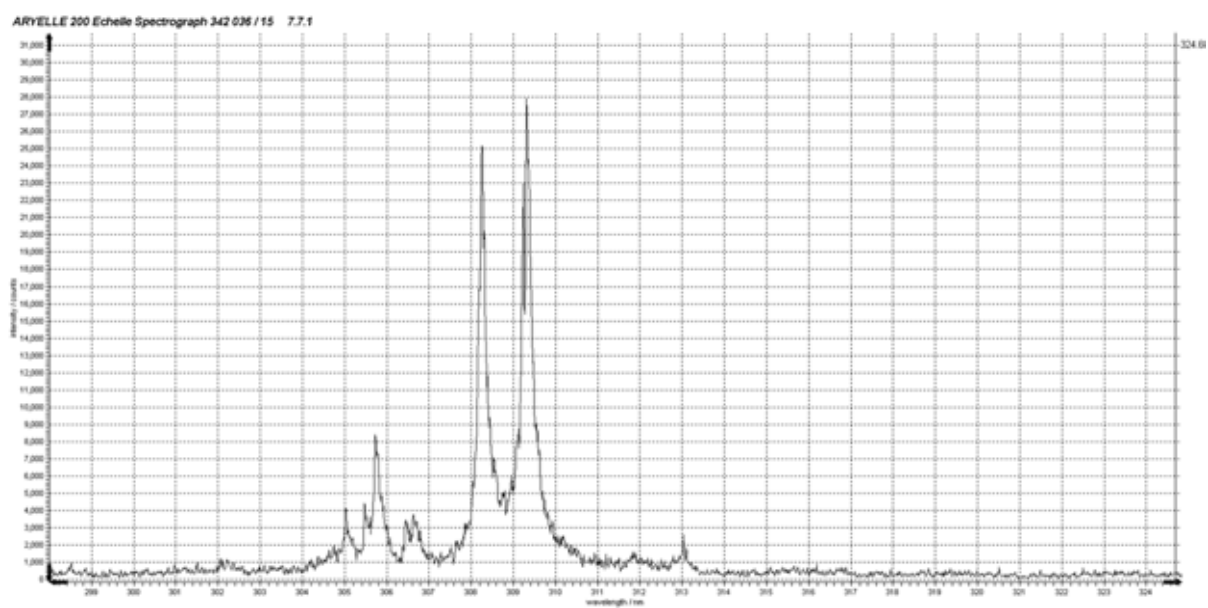
HT\_SVT10



SVT4

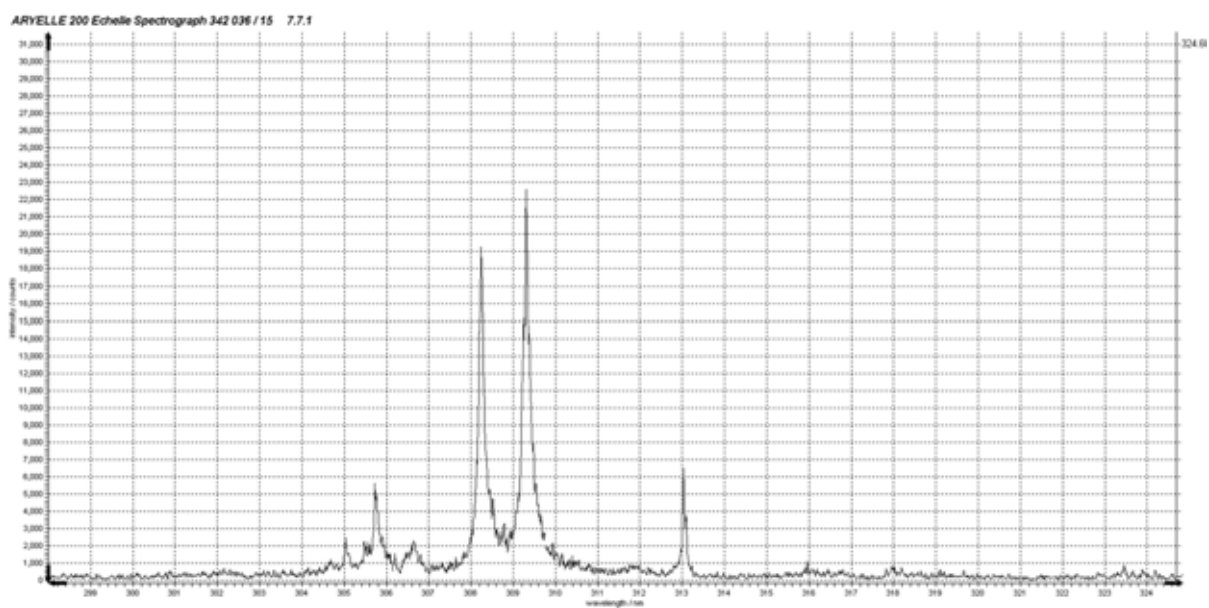


SVT8

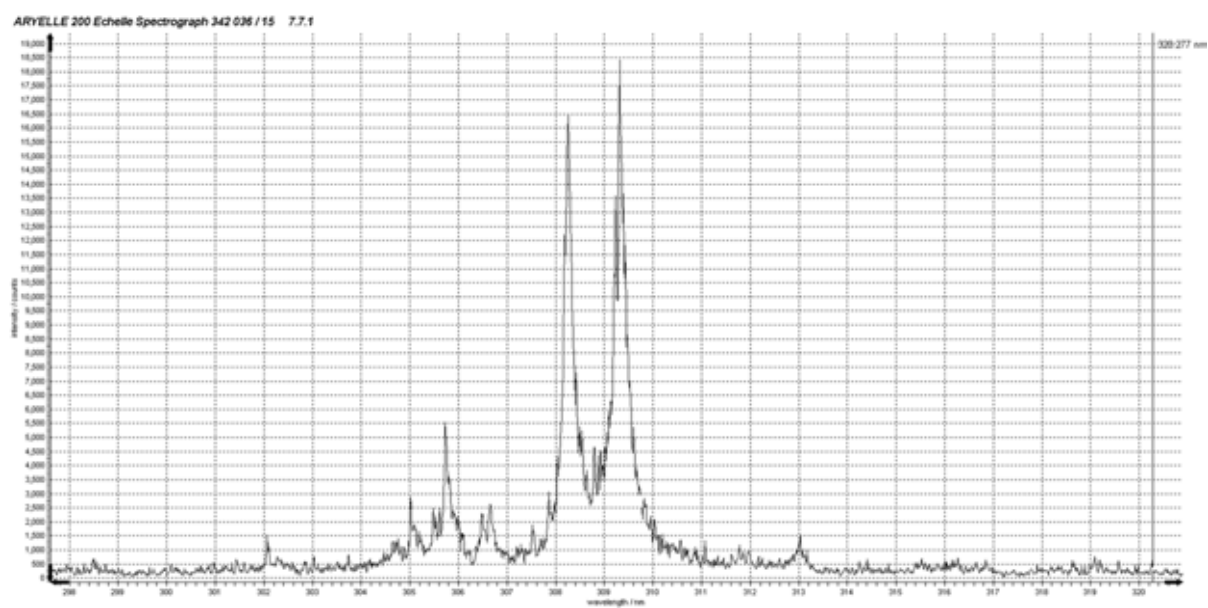




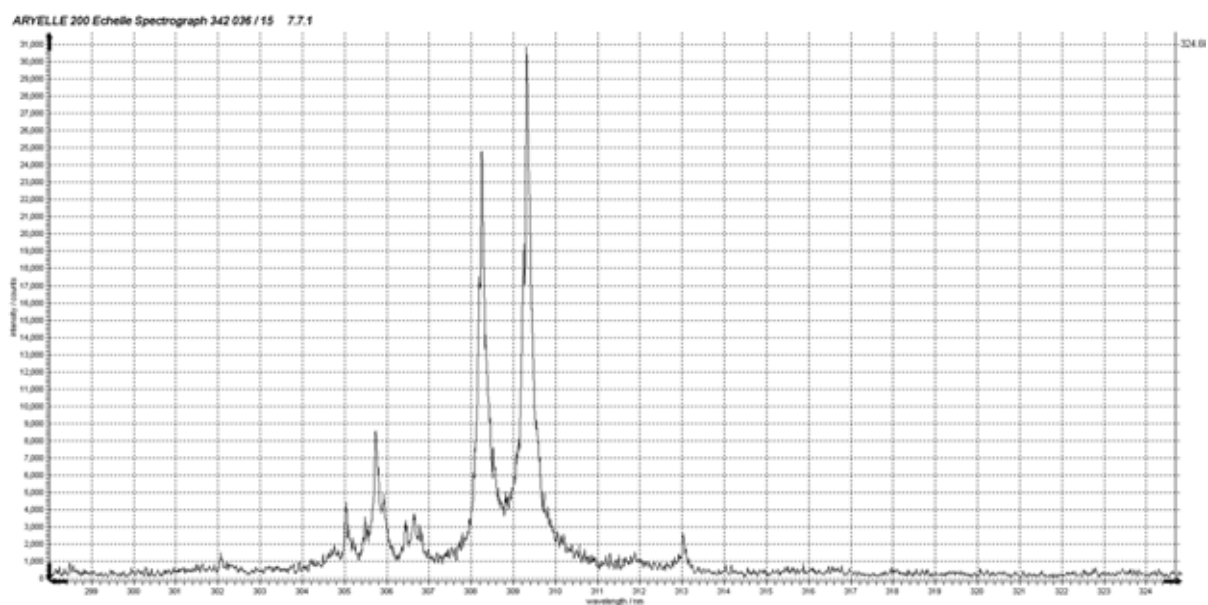
SVT9



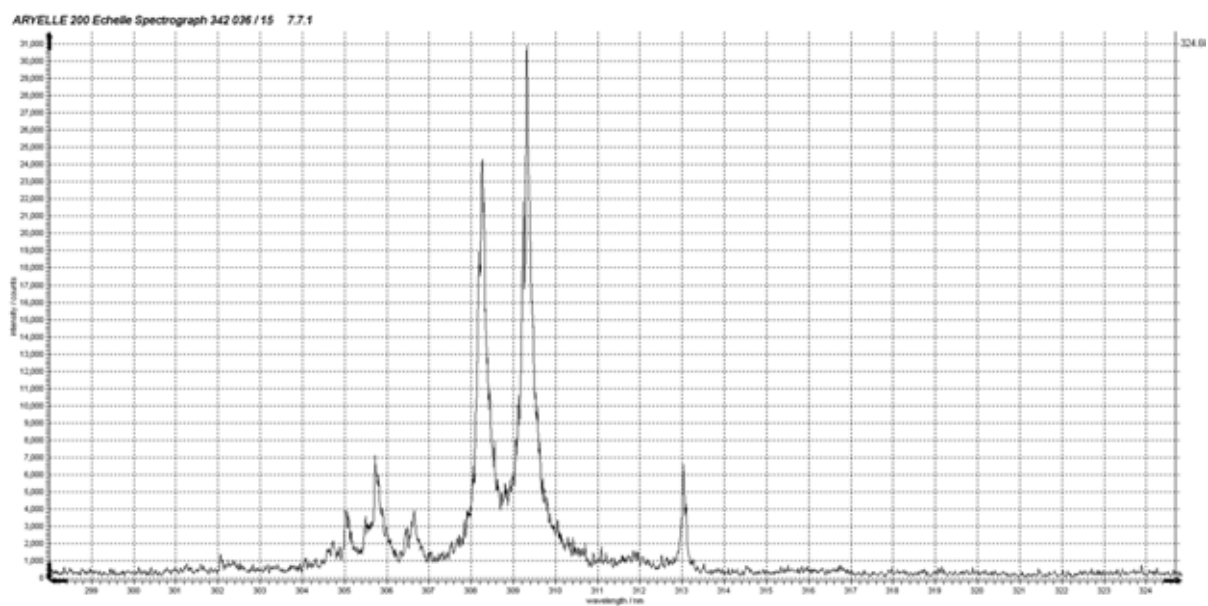
SVT14



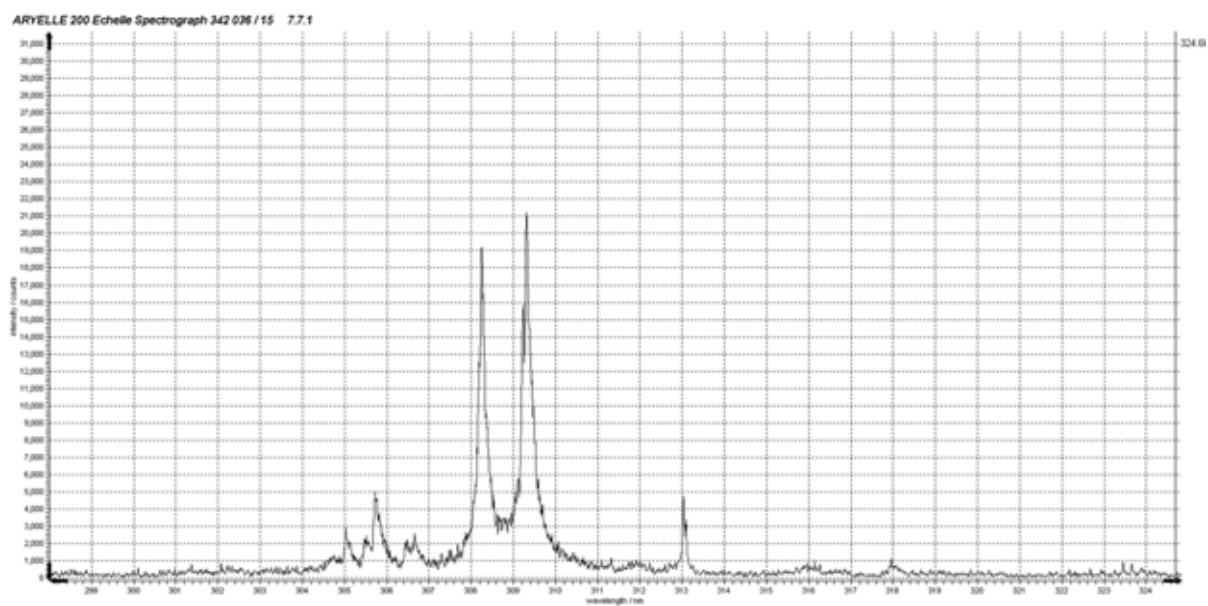
SVT16



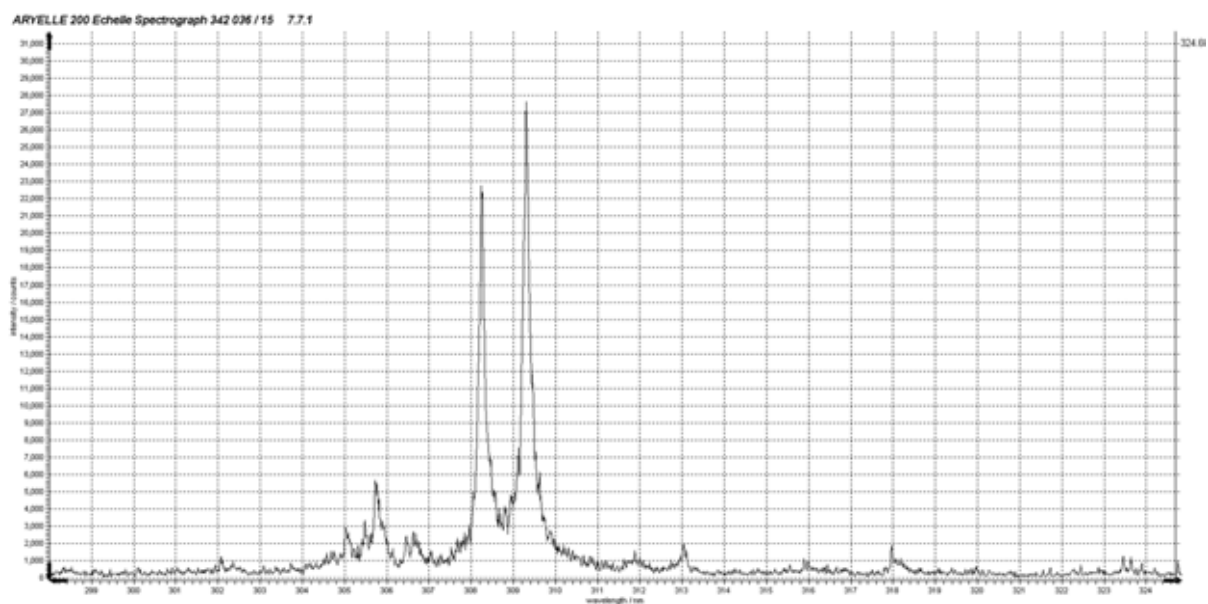
SVT17



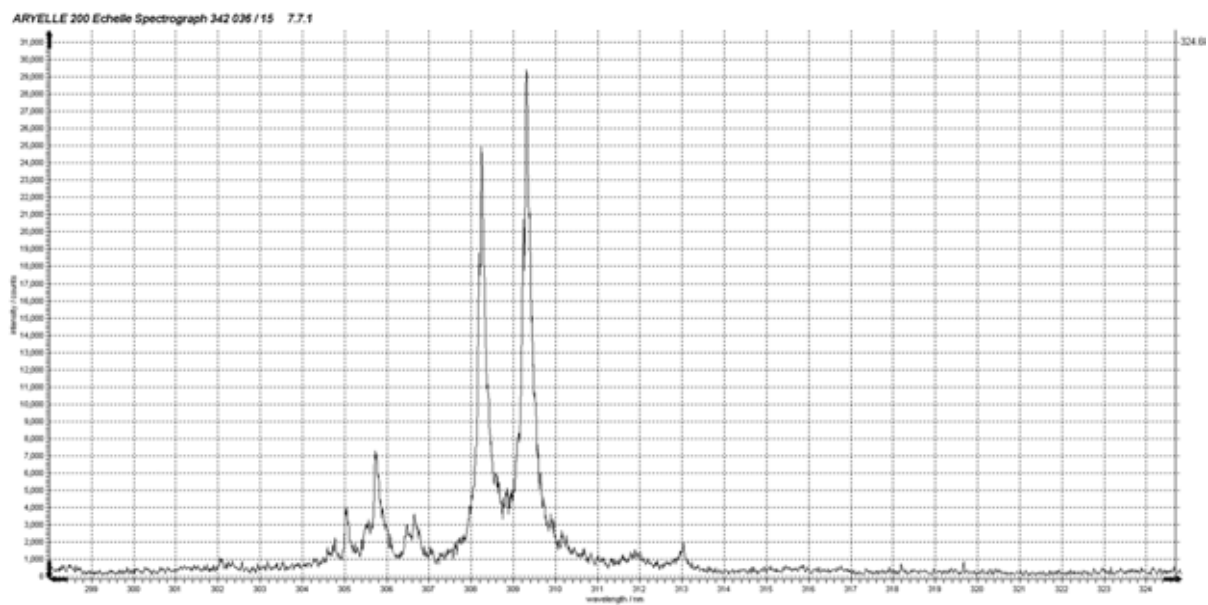
SVT21



SVT22



SVT27



SVT28

