

ธาตุร่องรอยของกลุ่มพลอยแซปไฟร์ จากแหล่งหินบะซอลต์ในภูมิภาคเอเชีย
ตะวันออกเฉียงใต้กับความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดเริ่มต้น

นางสาว ณพรินทร์ ชำนาญกิจจา

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

TRACE ELEMENTS OF SAPPHIRES FROM BASALTIC LOCALITIES IN
SE ASIA AND THEIR RELATION TO THE INITIAL FORMATIONS

NOPPARIN CHAMNANKITJA

A Report in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science
Department of Geology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2013

วันที่ส่ง

วันที่อนุมัติ

.....

(รศ. ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ชาตुर์รอรอยของกลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ จากแหล่งหินบะซอลต์ในภูมิภาคเอเชีย
ตะวันออกเฉียงใต้ กับความสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดเริ่มต้น

ณพรินทร์ ชำนาญกิจจา¹

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
โทรศัพท์: 08-6011-5568, E-mail address: noppasom@hotmail.com

การวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีของชาตुर์รอรอยของกลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ด้วยเครื่องมือ Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) สามารถใช้เพื่อศึกษาแหล่งกำเนิดเริ่มต้นของพลอยแชนป์ไฟร์ได้ ตัวอย่างพลอยแชนป์ไฟร์จำนวน 4 แหล่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ แหล่งจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย แหล่งไพลิน ในประเทศกัมพูชา แหล่งห้วยทราย ในประเทศลาว และแหล่งเกียเจีย ในประเทศเวียดนาม ได้ถูกนำมาศึกษาเพื่อแบ่งแยกต้นกำเนิดของการเกิดพลอยที่ถูกพาขึ้นมาด้วยหินอัลคาไลบะซอลต์ ระหว่างการกำเนิดพลอยแบบสัมพันธ์กับกระบวนการ ตกผลึกของแมกมา และ กระบวนการแปรสภาพ

กลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมา มีความเข้มข้นของธาตุเหล็ก (Fe) อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (2900-11,000 ppm) ธาตุแกดเลียม (Ga) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูง (110-190 ppm) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ (8-60 ppm) ธาตุไทเทเนียม (Ti) ต่ำ ธาตุวานาเดียม (V) (>100 ppm) และ ธาตุโครเมียม (Cr) ในระดับต่ำ (8-10 ppm) อัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) มีค่าสูง อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกดเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) และ อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกดเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) มีค่ากระจายมากตามปริมาณของธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr) ส่วนกลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ มีความเข้มข้นของธาตุเหล็ก (Fe) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ (<4,000 ppm) ธาตุแกดเลียม (Ga) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับกลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกแมกมา ธาตุแมกนีเซียม (Mg) อยู่ในระดับต่ำ (5-15 ppm) ธาตุไทเทเนียม (Ti) สูง ธาตุวานาเดียม (V) อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง และธาตุโครเมียม (Cr) ในระดับต่ำเช่นเดียวกับกลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมา อัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) มีค่ากระจาย อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกดเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) และอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกดเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) มีค่ากระจายมากตามปริมาณของธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr) เช่นกัน

คำสำคัญ: LA-ICP-MS; ชาตुर์รอรอย; กลุ่มตัวอย่างพลอยที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกของแมกมา; กลุ่มพลอยแชนป์ไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ

TRACE ELEMENTS OF SAPPHIRES FROM BASALTIC LOCALITIES IN SE ASIA AND THEIR RELATION TO THE INITIAL FORMATIONS

Nopparin Chamnankitja¹

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University;

Tel: 08-6011-5568, E-mail address: noppasom@hotmail.com

Abstract: Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) was applied to study the initial source formations by using trace elements analysis of sapphires with four different sources from basaltic localities in Southeast Asia such as Phrae in Thailand, Pailin in Cambodia, Huai Sai in Laos and Gia Nghia in Vietnam. The LA-ICP-MS analysis was used for identifying between magmatic and metamorphic sapphire found in alkali basalts. Magmatic sapphires are commonly medium-rich in Iron (Fe) (2900-11,000 ppm), medium to low in Magnesium (Mg) (8-60 ppm), low in Titanium (Ti), high in Vanadium (V) (>100 ppm) and Chromium (Cr) are low (8-10 ppm). These trace elements contents lead to high Fe/Ti. Ga/V and Ga/Cr ratio diagram are very varied related to V and Cr contents. Metamorphic sapphires are low in Iron (Fe) (<4,000 ppm), medium to high in Gallium (Ga) as similar to magmatic sapphires, low in Magnesium (Mg) (5-15 ppm), high in Titanium (Ti), low to medium in Vanadium (V) and Chromium (Cr) are low as similar to magmatic sapphires. Fe/Ti ratio diagram are varied. Ga/V and Ga/Cr ratio diagram are varied as well related to V and Cr contents.

Keywords: LA - ICP-MS; Trace elements; Magmatic sapphires; Metamorphic sapphires

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาที่ดีในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาและอบรมสั่งสอน และขอขอบพระคุณคณะบุคลากรทุกท่านที่ได้ให้ช่วยเหลือและคำแนะนำในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาวธิดารัตน์ เมืองไทย เจ้าหน้าที่ประจำเครื่องมือ LA-ICP-MS ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ(องค์การมหาชน) ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำารวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS

ขอขอบคุณเพื่อนๆ GEO 54 ทุกคนที่ให้กำลังใจ และคอยช่วยเหลือตลอดเวลา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ ที่สนับสนุน และให้กำลังใจในการเรียนและการศึกษา รวมทั้งการดำเนินชีวิตตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
หัวข้อภาษาไทย	ก
หัวข้อภาษาอังกฤษ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ข้อความเบื้องต้น	2
1.2 นิยามปัญหา	3
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 สมมติฐาน	4
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.6 เอกสารงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย	7
2.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	8
2.2 ระเบียบวิธีวิจัย	8
2.3 เครื่องมือวิเคราะห์	10
บทที่ 3 ผลการศึกษา	12
3.1 ลักษณะ และการจัดกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์	13
3.2 ลักษณะพลอยแซปไฟร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์	16
3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีธาตุร่องรอยของพลอยแซปไฟร์ ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	19
บทที่ 4 อภิปรายและสรุปผลการศึกษา	26
4.1 ความเข้มข้นของธาตุร่องรอยของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่ สัมพันธ์กับ แหล่งกำเนิดเริ่มต้น	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 สรุปผลการศึกษา	37
เอกสารอ้างอิง	๓

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.3.1	องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของธาตุร่องรอย (ppm) ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง โดยเครื่องมือ LA-ICP-MS	20

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1.1	แผนที่การกระจายตัวของซีโนโซอิกบะซอลต์ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และจุดเก็บตัวอย่าง ได้แก่ แหล่งแพร่ ประเทศไทย ห้วยทราย ประเทศลาว ไพลิน ประเทศกัมพูชา และ เกียเจีย ประเทศเวียดนาม (ปรับปรุงจาก Barr and Macdonald, 1981)	3
2.1.1	ผังวิธีการศึกษางานวิจัย	8
2.3.1	กล้องจุลทรรศน์อณูมณีที่เชื่อมต่อกับกล้องถ่ายภาพ และ คอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกภาพของตัวอย่าง ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอณูมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	10
2.3.2	Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7500 Series ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอณูมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	11
3.1.1	ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งห้วยทราย (HS) ประเทศลาว (a, b,c) ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งเกียเจีย (GN) ประเทศเวียดนาม (d, e, f)	14
3.2.1	ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a) และ แถบสีเส้นตรง (b,c,d)	16
3.2.2	ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a,b,d) และพบลักษณะปรากฏมลทินรูปผลึกโปร่งแสง (c,d)	17
3.2.3	ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปเส้นตรง (a,c) และ พบลักษณะปรากฏมลทินรูปผลึกโปร่งแสงและมลทินทึบแสง (b,d)	18
3.2.4	ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a) และ แถบสีไร้ระบบ (b) และลักษณะปรากฏของมลทินรูปผลึกโปร่งแสง (a,b)	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.3.1	องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของธาตุร่องรอย (ppm) ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	21
3.3.2	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแกดเลียม (Ga) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	22
3.3.3	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแมกนีเซียม (Mg) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	22
3.3.4	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุไทเทเนียม (Ti) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	23
3.3.5	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุวานาเดียม (V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	23
3.3.6	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุโครเมียม (Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	24
3.3.7	กราฟปริมาณระหว่างอัตราส่วนปริมาณของธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณของธาตุแกดเลียม (Ga/V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	24
3.3.8	กราฟปริมาณระหว่างอัตราส่วนปริมาณของธาตุเหล็กต่อ ธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณของธาตุแกดเลียมธาตุโครเมียม (Ga/Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด	25
4.1.1	องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุร่องรอย (ppm) ของกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกของแมกมา (a) และกลุ่มตัวอย่างพลอยที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ (b)	29
4.1.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกดเลียมต่อแมกนีเซียม (Ga/Mg) และปริมาณธาตุเหล็ก(Fe) ของพลอยแซปไฟร์จากแหล่งบ่อพลอยที่สามารถบ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดเริ่มต้นได้ โดยอ้างอิงกราฟของ Peucat et al. (2007)	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.1.3	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแกลเลียม (Ga) ของ พลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	30
4.1.4	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแมกนีเซียม (Mg) ของ พลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	31
4.1.5	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุไทเทเนียม (Ti) ของ พลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	31
4.1.6	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุวานาเดียม (V) ของ พลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มแหล่ง	32
4.1.7	กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุโครเมียม (Cr) ของ พลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	32
4.1.8	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับธาตุแกลเลียม (Ga) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	34
4.1.9	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับธาตุแมกนีเซียม (Mg) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	34
4.1.10	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับธาตุวานาเดียม (V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	35
4.1.11	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับธาตุโครเมียม (Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	35
4.1.12	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุแกลเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง	36
4.1.13	กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุแกลเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) ของพลอย	36

บทที่ 1

บทนำ

- 1.1 ข้อความเบื้องต้น
- 1.2 นิยามปัญหา
- 1.3 วัตถุประสงค์
- 1.4 สมมติฐาน
- 1.5 ขอบเขตงานวิจัย
- 1.6 เอกสารงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 1

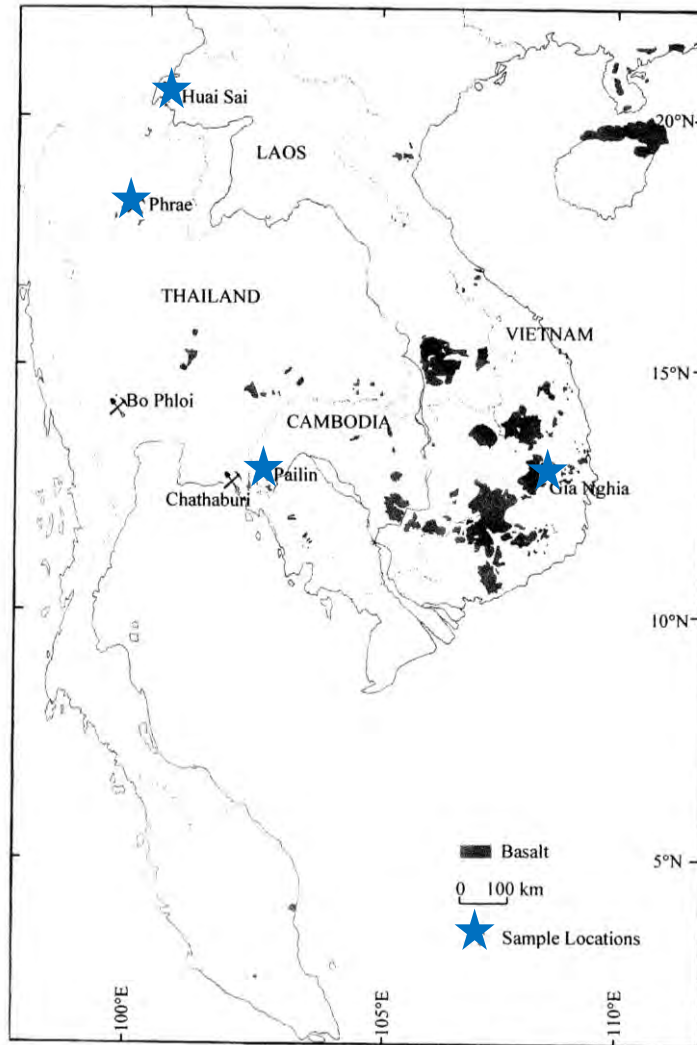
บทนำ

1.1 ข้อความเบื้องต้น

แหล่งพลอยคอร์ันดัมที่สำคัญในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นมีชื่อเสียงหลายแหล่ง และมักจะสัมพันธ์กับการประทุของหินบะซอลต์ยุคซีโนโซอิก โดยเฉพาะแหล่งพลอยแซปไฟร์ซึ่งมีชื่อเสียงในตลาดโลก แหล่งพลอยที่ถูกคัดเลือกสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ แหล่งจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย แหล่งไพลิน ในประเทศกัมพูชา แหล่งห้วยทราย ในประเทศลาว และแหล่งเกียเจีย ในประเทศเวียดนาม

แหล่งพลอยในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เหล่านี้ถูกพาขึ้นมาสู่ผิวโลกโดยกระบวนการประทุของหินบะซอลต์ในมหายุคซีโนโซอิก ซึ่งคาดว่าน่าจะมีการสัมพันธ์กับหินอัลตราไลบะซอลต์ ส่วนใหญ่มีกระบวนการสะสมตัวของพลอยแซปไฟร์ เป็นการสะสมตัวโดยกระบวนการทางน้ำ และการสะสมตัวตามไหล่เขา และจากการหาอายุของหินบะซอลต์ที่แหล่งแพร่ โดยวิธี K/Ar ได้อายุ 5.64 ± 0.28 ล้านปี (Barr and McDonald, 1981) แหล่งห้วยทราย โดยวิธี K/Ar ได้อายุ 1.74 ± 0.18 ล้านปี (Barr and McDonald, 1981) แหล่งไพลิน โดยวิธี K/Ar ได้อายุ 1.09 ± 0.13 ล้านปี (Barr and McDonald, 1981) และแหล่งเกียเจีย 0.4-8 ล้านปี (Garnier, 2005)

การศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแร่ ของแร่มลทิน และธาตุร่องรอยของพลอยแซปไฟร์นั้น จะสามารถทำให้ทราบถึงข้อมูลการเกิดพลอยและธาตุตัวแปรที่บ่งบอกสภาวะการเกิดของพลอยที่แน่ชัดขึ้น เช่น สภาวะแวดล้อมทางเคมี และทางกายภาพ ขณะการเกิดพลอย รวมทั้งกระบวนการการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาของแหล่งเหล่านี้ได้



รูปที่ 1.1.1 แผนที่การกระจายตัวของซีโนโซอิกบะซอลต์ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ แหล่งแพร่ ประเทศไทย ห้วยทราย ประเทศลาว ไพลิน ประเทศกัมพูชา และ เกียเจีย ประเทศเวียดนาม (ปรับปรุงจาก Barr and Macdonald, 1981)

1.2 นิยามปัญหา

จากการศึกษาพลอยแซปไฟร์ ในแหล่งหินบะซอลต์ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ แหล่งจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย แหล่งไพลิน ในประเทศกัมพูชา แหล่งห้วยทราย ในประเทศลาว และแหล่งเกียเจีย ในประเทศเวียดนาม ในการศึกษาครั้งนี้ ทราบว่าพลอยเหล่านี้ ถูกพาขึ้นมาที่หินต้นกำเนิด โดยการปะทุของหินอัลตราโลบะซอลต์ แล้วเกิดการผุพังอยู่กับที่ เนื่องจากความไม่เสถียรของตัวหินบะซอลต์เอง จากนั้นจึงเกิดการพัดพาโดยกระบวนการทางน้ำมาสะสมตัวในชั้นกรวด เกิดเป็นแหล่งพลอยขนาดใหญ่ขึ้น แต่ต้นกำเนิดเริ่มต้นของพลอย

แชปไฟร์เหล่านี้ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเกิดมาจากกระบวนการใด ดังนั้นการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี จากธาตุร่องรอยที่อยู่ในเนื้อพลอยสามารถอาจบ่งบอกได้ถึง สภาพขณะเกิดพลอย และอาจนำไปสู่การทำความเข้าใจถึงกระบวนการกำเนิดพลอย ของแหล่งแชปไฟร์ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และแหล่งที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์อื่นๆ ได้

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะทางธรณีเคมีธาตุร่องรอยของพลอยแชปไฟร์ กับความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดพลอยแชปไฟร์ จากแหล่งหินบะซอลต์ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

1.4 สมมติฐาน

องค์ประกอบธาตุร่องรอยของพลอยแชปไฟร์จากแหล่งหินบะซอลต์ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สามารถบ่งบอกแหล่งกำเนิดเริ่มต้นได้

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาลักษณะทางธรณีเคมีของธาตุร่องรอยของพลอยแชปไฟร์ ด้วยเครื่องมือ Laser Ablation – Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณธาตุร่องรอยที่เป็นองค์ประกอบ โดยเน้นที่เนื้อพลอย และ โชนนิ่งที่ปรากฏในเนื้อพลอยเป็นหลัก ซึ่งอาจใช้อภิปรายและสรุปผล นำข้อมูลทั้งหมดมารวบรวม สรุปผลสุดท้ายของงานวิจัย และเตรียมนำเสนอผลงานของโครงการต่อไป

1.6 เอกสารงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แหล่งพลอยที่ถูกคัดเลือกสำหรับการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ แหล่งจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย แหล่งไพลิน ในประเทศกัมพูชา แหล่งห้วยทราย ในประเทศลาว และแหล่งเกียเจีย ในประเทศเวียดนาม เคยมีการศึกษา วิจัยในหลายๆ ด้าน ทั้งการศึกษาคุณภาพของพลอย การศึกษาหินให้พลอย และการศึกษาทางด้านการสะสมตัว รวมทั้งวิวัฒนาการของธรณีแปรสัณฐานของพื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับกำเนิดแหล่งเหล่านี้

Khamloet (2011) ได้ศึกษามลทินแร่ในพลอยแซปไฟร์ ในแหล่งที่มีความสัมพันธ์กับ หินบะซอลต์ บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากแหล่งบ่อพลอยจังหวัด กาญจนบุรี พบว่ามีมลทินที่หลากหลาย และคล้ายคลึงกันในภูมิภาคนี้ จากความหลากหลาย นั้นจึงได้จำแนกพลอยแซปไฟร์จากหินบะซอลต์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มสัมพันธ์กับ หินเฟลสิกอัลคาไลสูง และกลุ่มที่เกิดจากระบวนการแปรสัณฐาน ซึ่งบ่งบอกว่าการกำเนิด ในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน และข้อมูลที่ได้ จึงถือว่าเป็นหลักฐานใหม่ที่บ่งชี้ว่าพลอยแซปไฟร์ จากแหล่งบ่อพลอยน่าจะมีกำเนิด 2 รูปแบบ คือ รูปแบบแรกมีความสัมพันธ์กับการตกผลึกใน สภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับแมกมาชนิดเฟลสิกที่มีองค์ประกอบอัลคาไลสูง ในบริเวณ เปลือกโลกตอนล่าง ซึ่งมีหลักฐานปรากฏจากการพบมลทินแร่กลุ่มเฟลสิก และจากธรณีเคมี ของธาตุร่องรอย และธาตุหายากในแร่เซอร์คอนที่เกิดร่วมกับพลอยแซปไฟร์ ส่วนรูปแบบที่ สองกำเนิดมาจากบริเวณเปลือกโลกที่ถูกแปรสัณฐานกับหินหลอมละลายปนเปื้อน จากการค้น ตัวของหินบะซอลต์ในบริเวณชั้นเนื้อโลกส่วนบนหรือชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง ซึ่งมี หลักฐานปรากฏจากการพบมลทินแร่ที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐาน และจากข้อมูลการ หาอายุโดย วิธียูเรเนียม-ตะกั่ว (U-Pb) ของมลทินแร่เซอร์คอน ให้อายุ 24 ± 0.9 ล้านปี และ จากข้อมูลการหาอายุ โดยใช้ วิธีทอริเรียม-ยูเรเนียม-ตะกั่ว (Th-U-Pb) ของมลทินแร่โมนา ไซต์ ให้อายุ 25-30 ล้านปี และ 42-45 ล้านปี ซึ่งอายุของมลทินแร่ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันอย่าง มากกับอายุช่วงเริ่มต้นของกระบวนการปะทุของหินภูเขาไฟบะซอลต์ ในมหาสมุทรอินโดจีน ของประเทศไทย ซึ่งเป็นเหตุผลสนับสนุนว่าการกำเนิดพลอยแซปไฟร์น่าจะเกิดขึ้นในช่วง ประวัติความร้อนเดียวกัน ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของการกำเนิดหินบะซอลต์มหาสมุทรอินโดจีนใน ประเทศไทย รวมทั้งในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ด้วย

Peucat *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของธาตุแกลเลียมต่อแมกนีเซียม (Ga/Mg) เพื่อแยกความแตกต่างระหว่าง พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินที่เกิดจากระบวนการทาง แมกมา และจากระบวนการแปรสภาพ โดยใช้ผลวิเคราะห์ Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) พบว่าส่วนใหญ่พลอยแซปไฟร์ที่พบใน หินอัลคาไลบะซอลต์ จากเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จีน และแอฟริกา จะมีความเข้มข้นของ ธาตุเหล็ก (Fe) อยู่ในระดับสูง (2,000-11,000 ppm) ความเข้มข้นของธาตุแกลเลียม (Ga) สูง (>140 ppm) มีความเข้มข้นของธาตุแมกนีเซียม (Mg) ต่ำ (<20 ppm) และมีอัตราส่วนของธาตุ แกลเลียมต่อแมกนีเซียมสูง (>10) แต่ในพลอยแซปไฟร์ที่เกิดจากการแปรสภาพ เช่น แหล่งโม กก ประเทศพม่า ประเทศศรีลังกา และแหล่งอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ พบว่ามีความ

เข้มข้นของธาตุเหล็กต่ำ (<3000 ppm) มีความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมต่ำ (<75 ppm) มีความเข้มข้นของธาตุแมกนีเซียมสูง (>20 ppm) และมีอัตราส่วนของธาตุแคลเซียมต่อแมกนีเซียมที่ค่อนข้างต่ำ (<10) ฟลอยแซปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดจากหินแมกมาชนิดบะซอลต์มีปริมาณของธาตุเหล็ก แคลเซียม และแมกนีเซียม ที่คล้ายกับฟลอยแซปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากหินแมกมาแรกเริ่ม ที่พบในหินชนิดไซอีไนต์ จากแหล่งคาร์บาตุลา ในประเทศเคนยา ซึ่ง บ่งบอกได้ว่าฟลอยที่กำเนิดมาจากหินแมกมานี้ น่าจะมาจากแหล่งกำเนิดแบบไซอีไนติก นอกจากนี้แล้ว ฟลอยแซปไฟร์ชนิดพลูมาไซต์ และฟลอยแซปไฟร์ชนิดหินแปรยังแสดง ธาตุร่องรอย ที่มีองค์ประกอบที่คล้ายกัน และจากการศึกษาในปัจจุบัน ยังพบว่าจากกระบวนการแปรสัณฐาน จะมีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง หินเมฟิก และหินอะซิติก ดังนั้นจึงพบว่าให้ฟลอยแซปไฟร์จึงมีปริมาณของธาตุเหล็กสูง และมีผลต่ออัตราส่วนของแคลเซียมต่อแมกนีเซียมมีค่าต่ำ

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

2.2 ระเบียบวิธีวิจัย

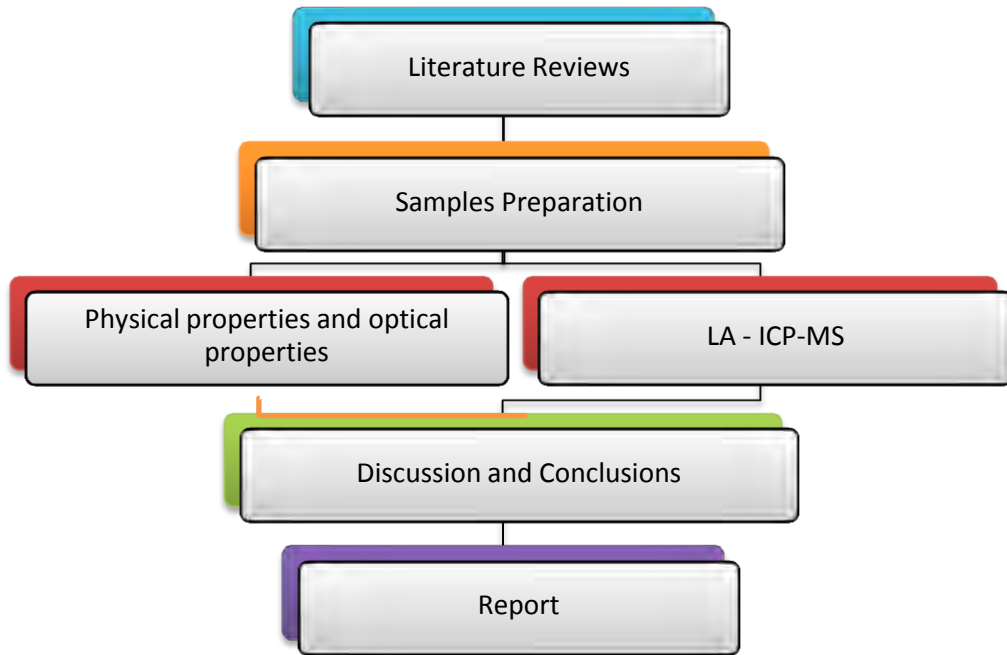
2.3 เครื่องมือวิเคราะห์

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังแผนผังรูปที่ 2.1.1 และมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.1.1 แผนผังการศึกษางานวิจัย

2.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1. รวบรวมข้อมูลและเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวกับงานวิจัย ประกอบด้วย งานวิจัยเก่าที่เกี่ยวข้องกับการศึกษามลทินที่ปรากฏในพลอยแซปไฟร์ การศึกษาตัวอย่างโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS ข้อมูลธรณีวิทยาในพื้นที่ของตัวอย่างที่ทำการศึกษาเพื่อให้ได้ทราบถึงลักษณะโดยรวมของพื้นที่และแนวทางปฏิบัติในการทำการวิจัย
2. คัดเลือกตัวอย่างพลอยที่จะนำมาวิเคราะห์ เพื่อพิจารณาคุณลักษณะทางกายภาพต่างๆ รวมถึงลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope) ก่อนการจัดแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามแหล่งของพลอยแซปไฟร์

3. วิเคราะห์เชิงปริมาณทางเคมีของธาตุร่องรอยที่ปรากฏในเนื้อพลอยแซปไฟร์ เพื่อหาปริมาณของธาตุร่องรอยที่มีองค์ประกอบสัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดเริ่มต้นของพลอยตามสมมติฐาน ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS ที่ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
4. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการศึกษาที่ได้จากห้องปฏิบัติการ มาวิเคราะห์ และแปลความหมาย
5. ตรวจสอบข้อมูลและการประมวลผล แก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น
6. อภิปรายและสรุปผล ว่าเป็นไปตามสมมติฐาน และเป็นไปตามผลการวิจัยก่อนหน้านี้ เพื่อรวบรวม ผลสรุปสุดท้ายของงานวิจัย
7. นำเสนองานวิจัย และจัดทำรูปเล่มรายงาน

2.3 เครื่องมือวิเคราะห์

เครื่องมือวิเคราะห์ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัยครั้งนี้ ประกอบด้วย

- กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope) (รูปที่ 2.3.1) เพื่อศึกษา ลักษณะภายในของพลอยโดยเฉพาะลักษณะของแร่มลทิน



รูปที่ 2.3.1 กล้องจุลทรรศน์อัญมณีที่เชื่อมต่อกับกล้องถ่ายภาพ และคอมพิวเตอร์เพื่อ บันทึกภาพของตัวอย่าง ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับ แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

- Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) (รูปที่ 2.3.2) คือ เครื่องมือที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีที่มีปริมาณต่ำ สามารถนำมาประยุกต์สำหรับการวิเคราะห์อัญมณี ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง หรือทำลายน้อยที่สุด สามารถวิเคราะห์ปริมาณ ของธาตุองค์ประกอบในปริมาณน้อยก็ตาม มีความถูกต้อง และความแม่นยำสูง

เครื่องมือ LA-ICP-MS ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญได้แก่ การชักตัวอย่าง (Sampling) การเสียดคร่อนด้วยเลเซอร์ (Laser ablation) และแตกตัวเป็นไอออนในพลาสมา และส่วนการวิเคราะห์มวล (Mass spectrometry) ซึ่งตัวอย่างจะถูกยิงด้วยเลเซอร์ที่มีพลังงานสูงบริเวณผิวหน้าของตัวอย่าง ที่ติดตั้งอยู่กับกล้องและจอภาพ (charge-coupled device ; CCD) สามารถระบุตำแหน่งที่ต้องการได้

พร้อมกับถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นไอออนในพลาสมาด้วยความร้อนสูงถึง 10,000 °c จากนั้นไอออนของธาตุแต่ละธาตุจะถูกนำพาไปด้วยก๊าซอาร์กอนไปยังเครื่องวิเคราะห์มวลต่อไป

เครื่องวิเคราะห์มวลจะทำการแยกไอออนสำหรับวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถแยกอนุภาคที่มีประจุตามอัตราส่วนมวลต่อประจุ (m/z) และถูกเครื่องมือตรวจวัดตามแถบสเปกตรัมที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นตัวบ่งบอกเฉพาะ และได้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณของแต่ละธาตุเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน



รูปที่ 2.3.2 *Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7500 Series ที่สถาบันวิจัยและพัฒนา อัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)*

บทที่ 3

ผลการศึกษา

- 3.1 ลักษณะ และการจัดกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์
- 3.2 ลักษณะพลอยแซปไฟร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์
- 3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีธาตุร่องรอยของ พลอยแซปไฟร์ ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

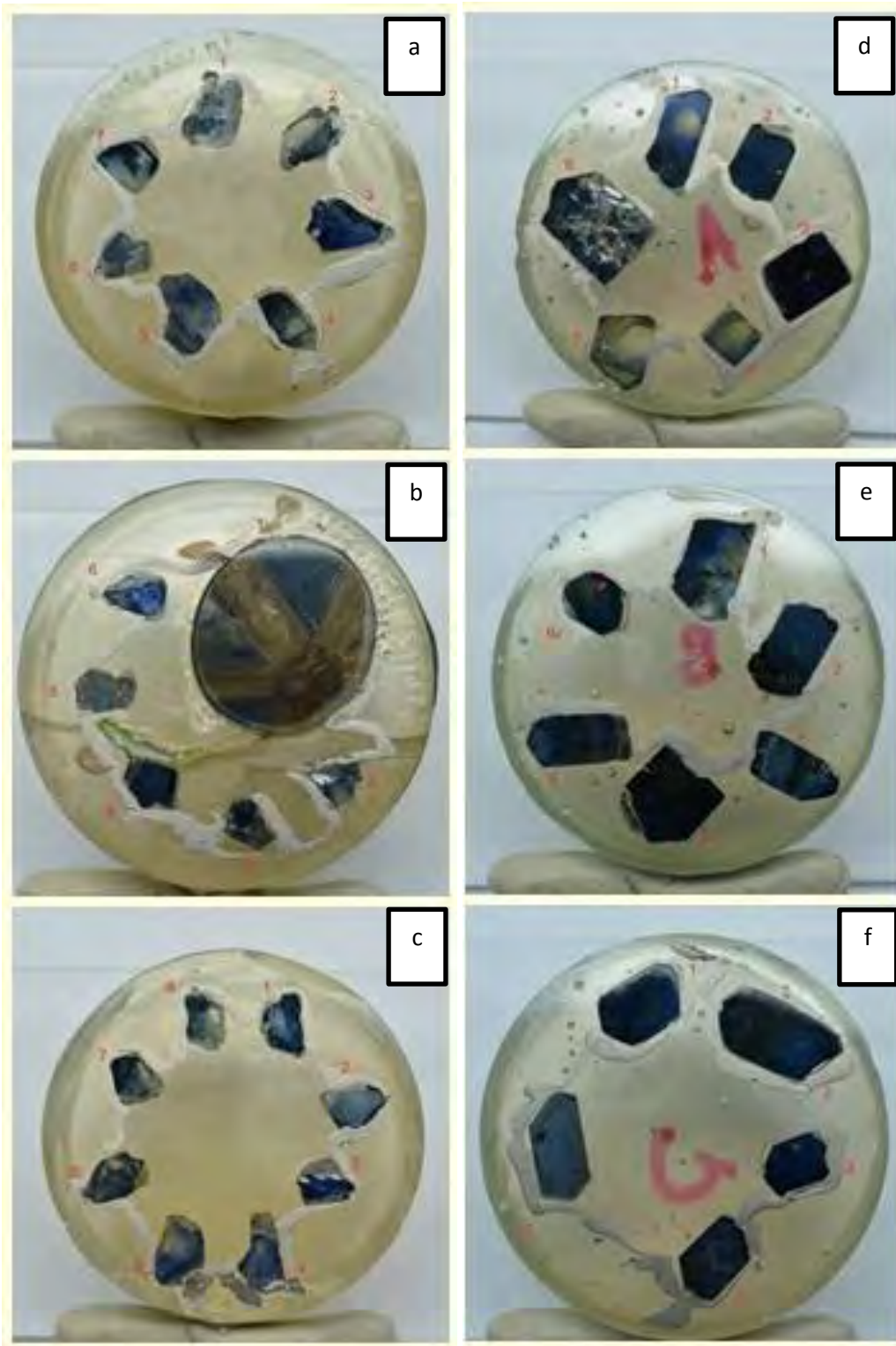
บทที่ 3

ผลการศึกษา

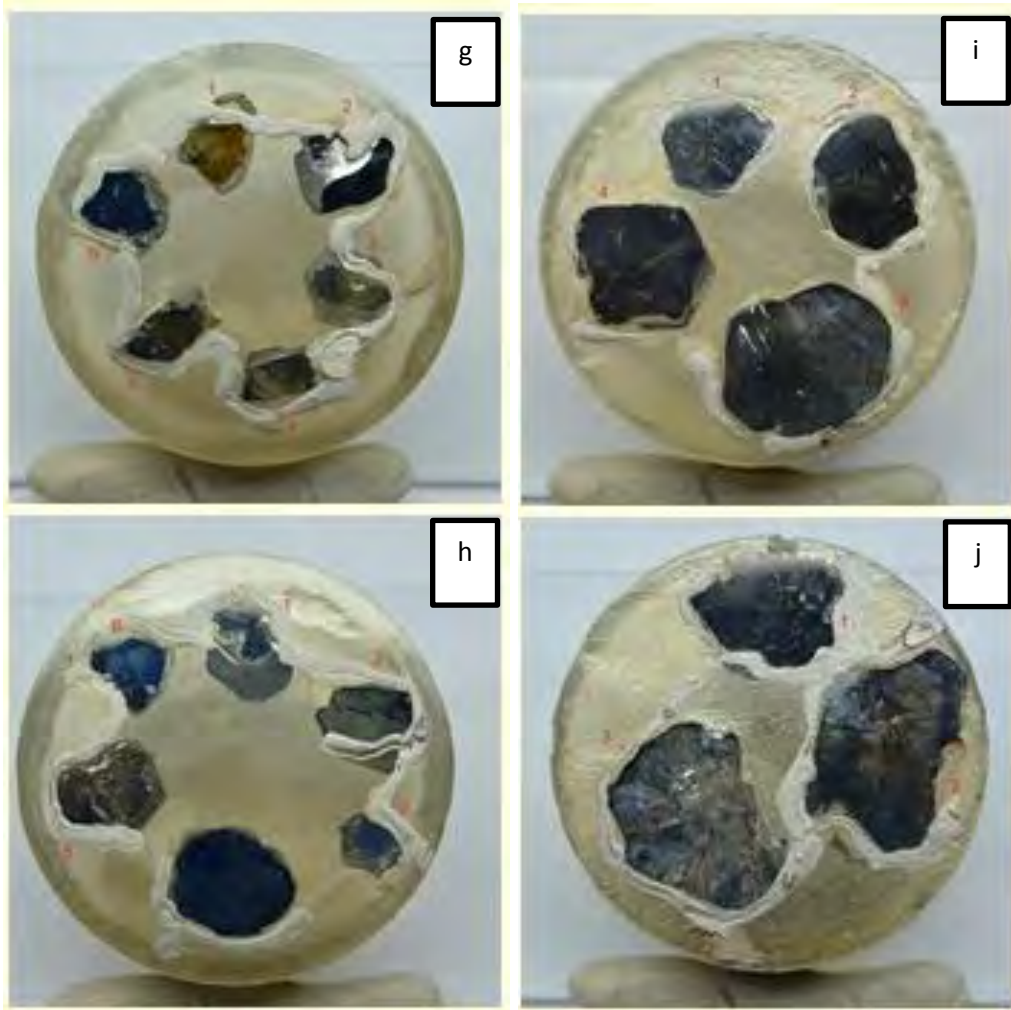
3.1 ลักษณะ และการจัดกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์

จากตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งหินบะซอลต์ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทั้งหมด 57 ตัวอย่าง โดยใช้แหล่งกำเนิดเป็นเกณฑ์ สามารถแบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งห้วยทราย (HS) ประเทศลาว
จำนวน 21 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.1 a, b, c)
2. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งเกียเจีย (GN) ประเทศเวียดนาม
จำนวน 17 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.1 d, e, f)
3. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งแพร์ (P) ประเทศไทย
จำนวน 12 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.1 g, h)
4. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งไพลิน (PL) ประเทศกัมพูชา
จำนวน 7 ตัวอย่าง (รูปที่ 3.1 i, j)



รูปที่ 3.1.1 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งห้วยทราย (HS) ประเทศลาว (a, b,c)
 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งเกียเจีย (GN) ประเทศเวียดนาม (d, e, f)



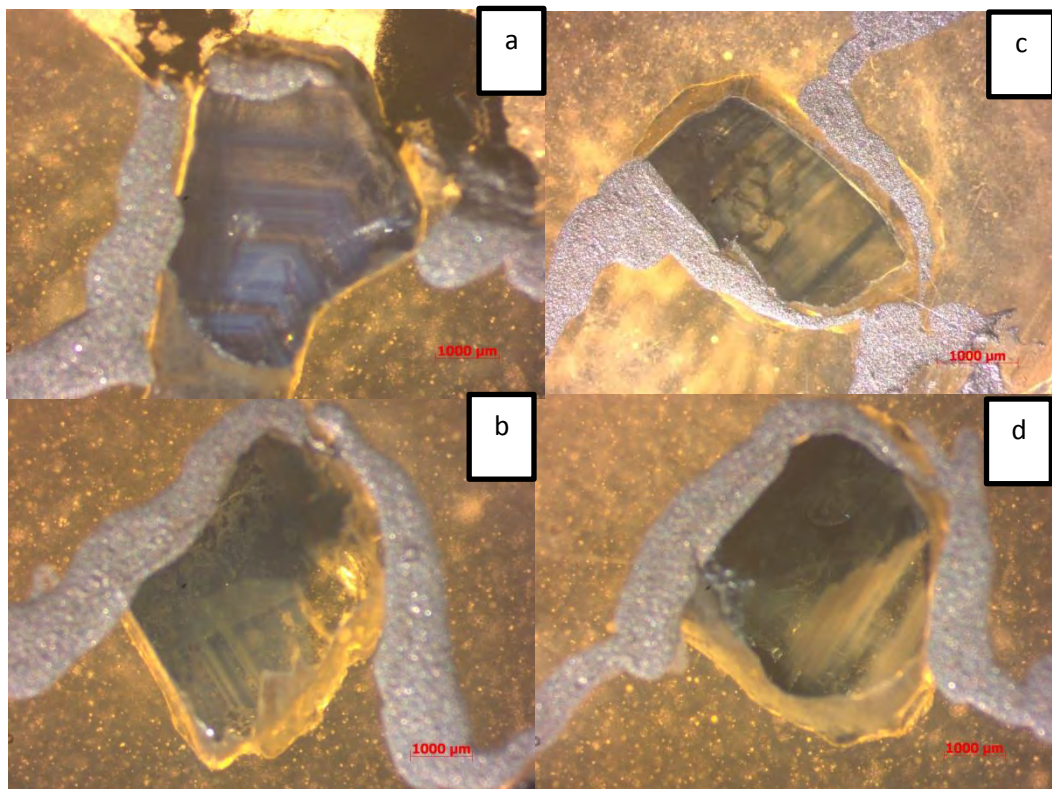
รูปที่ 3.1.1 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งแพร์ (P) ประเทศไทย (g, h)
ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์จากแหล่งไพลิน (PL) ประเทศกัมพูชา (i, j)

3.2 ลักษณะพลอยแซปไฟร์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์

จากการวิเคราะห์ลักษณะของโซนนิ่ง และมลทินภายในเนื้อพลอยภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological Microscope) พบว่าในเนื้อพลอยส่วนใหญ่ของแต่ละแหล่ง ปรากฏลักษณะของแถบสี (Color Zones) ซึ่งเป็นลักษณะที่น่าสนใจในการศึกษาครั้งนี้ จึงได้กำหนดจุดใน เนื้อพลอยแต่ละเม็ด ในบริเวณโซนนิ่ง และบริเวณข้างเคียง ในตัวอย่างละ 3-5 จุด เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของธาตुर่องรอย ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ต่อไป

1. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งห้วยทราย (HS) ประเทศลาว

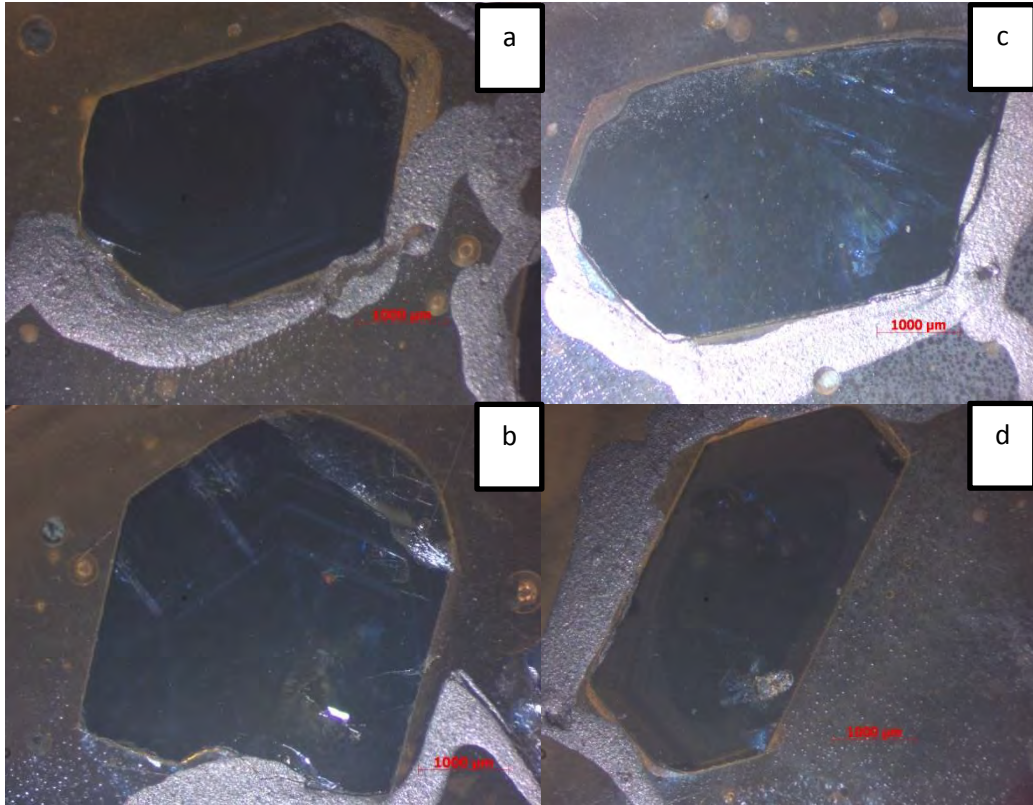
ปรากฏแถบสีภายในเนื้อพลอยแซปไฟร์ตามรูปผลึกธรรมชาติของกลุ่ม พบเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) (รูปที่ 3.2.1 a) และในบางตัวอย่างยังพบว่า มีการเกิดแถบสีเส้นตรง (รูปที่ 3.2.1 b,c,d)



รูปที่ 3.2.1 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a) และแถบสีเส้นตรง (b,c,d)

2. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งเกียเจีย (GN) ประเทศเวียดนาม

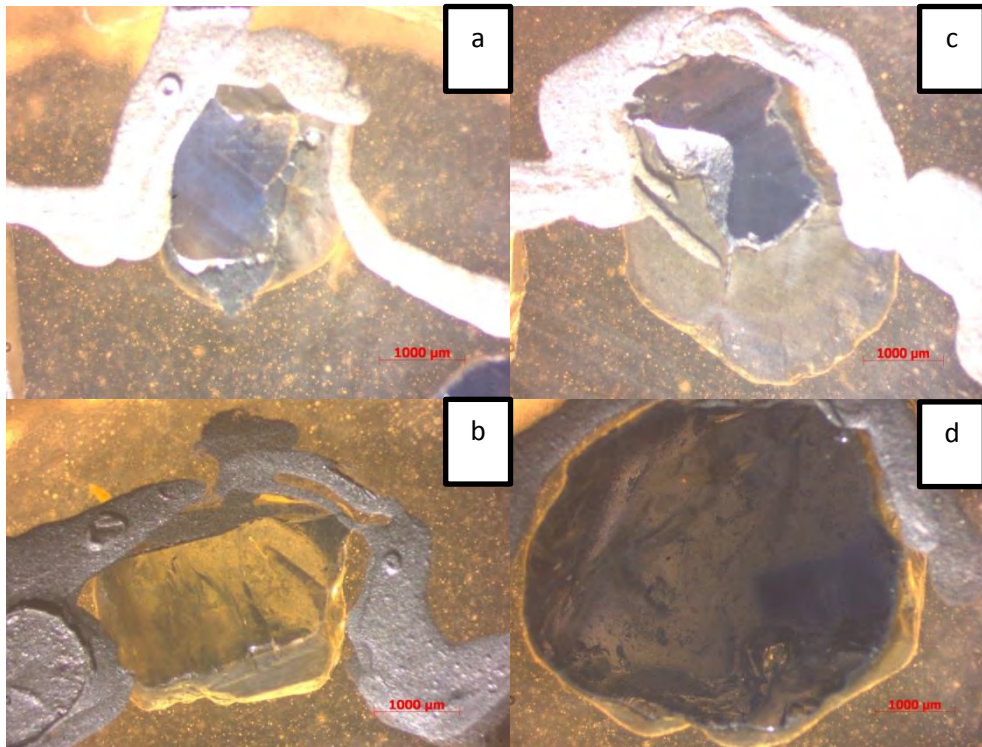
ปรากฏแถบสีภายในเนื้อพลอยแซปไฟร์ตามรูปผลึกธรรมชาติของกลุ่ม พบเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) (รูปที่ 3.2.2 a,b,d) และในบางตัวอย่างยังพบว่า มีมลทินรูปผลึกโปร่งแสง (รูปที่ 3.2.2 c,d)



รูปที่ 3.2.2 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a,b,d) และพบลักษณะปรากฏมลทินรูปผลึกโปร่งแสง (c,d)

3. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งเพชร (P) ประเทศไทย

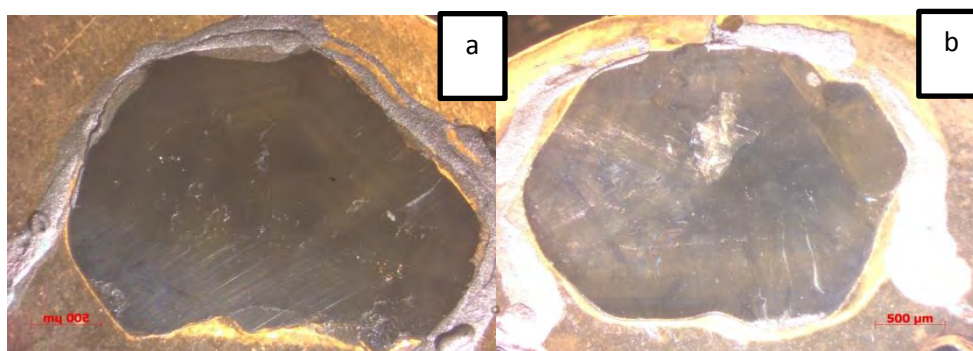
กลุ่มพลอยแซปไฟร์ปรากฏแถบสีเส้นตรงภายในเนื้อพลอยแซปไฟร์ (รูปที่ 3.2.3 a,c) และในบางตัวอย่างยังพบว่า มีมลทินรูปผลึก โปร่งแสงและมลทินทึบแสง (รูปที่ 3.2.3 b,d)



รูปที่ 3.2.3 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปเส้นตรง (a,c) และพบลักษณะปรากฏมลทินรูปผลึก โปร่งแสงและมลทินทึบแสง (b,d)

4. กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์จากแหล่งโพลิน (PL) ประเทศกัมพูชา

ปรากฏแถบสีภายในเนื้อพลอยแซปไฟร์ตามรูปผลึกธรรมชาติของกลุ่ม พบเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) (รูปที่ 3.2.4 a) และแถบสีแบบไร้ระบบ (รูปที่ 3.2.4 b) นอกจากนี้พบว่ามิมลทินรูปผลึกโปร่งแสงในเนื้อพลอย (รูปที่ 3.2.4 a,b)



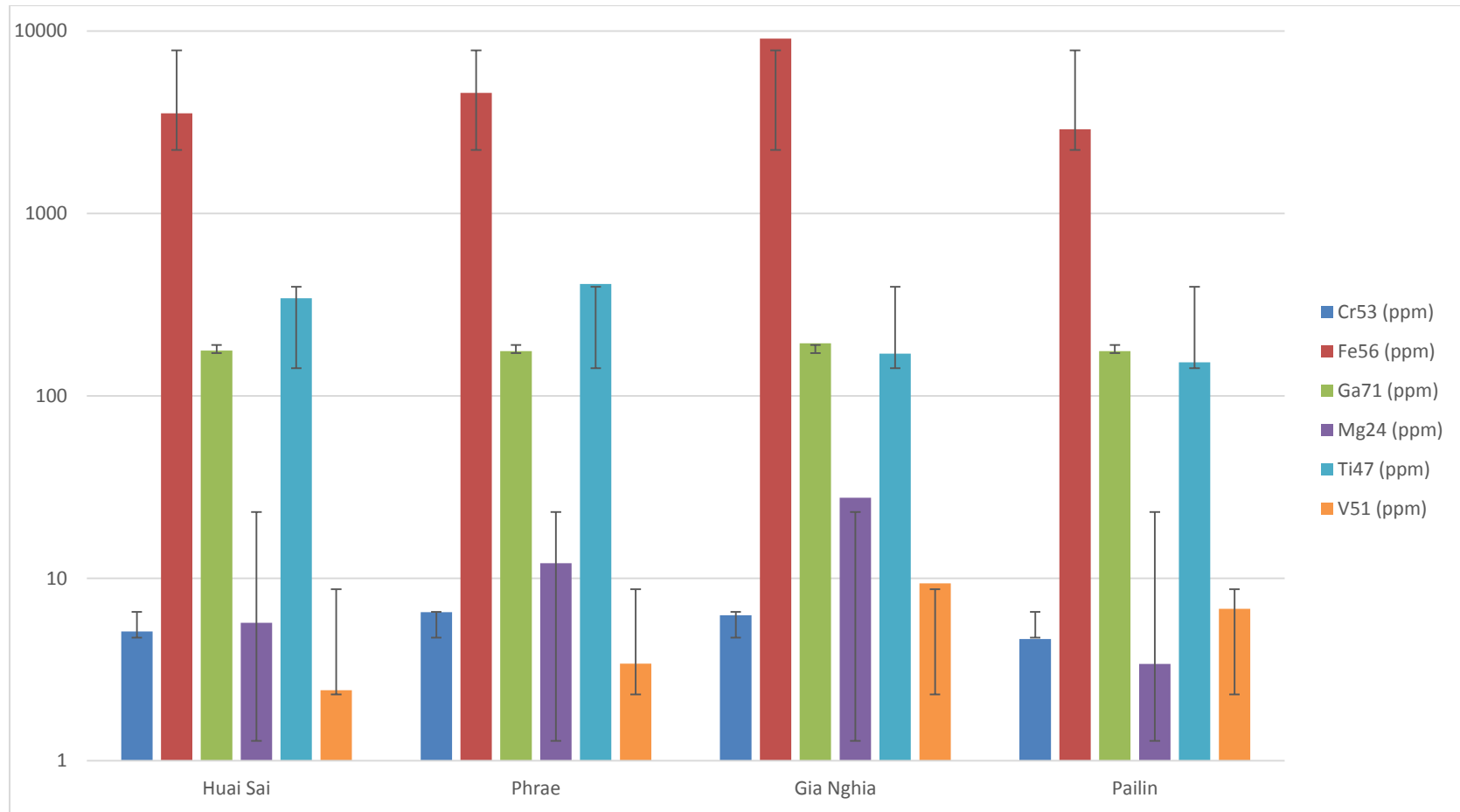
รูปที่ 3.2.4 ตัวอย่างกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่ปรากฏแถบสีรูปหกเหลี่ยม (a) และแถบสีไร้ระบบ (b) และลักษณะปรากฏของมิมลทินรูปผลึกโปร่งแสง (a,b)

3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีธาตุร่องรอยของพลอยแซปไฟร์ ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

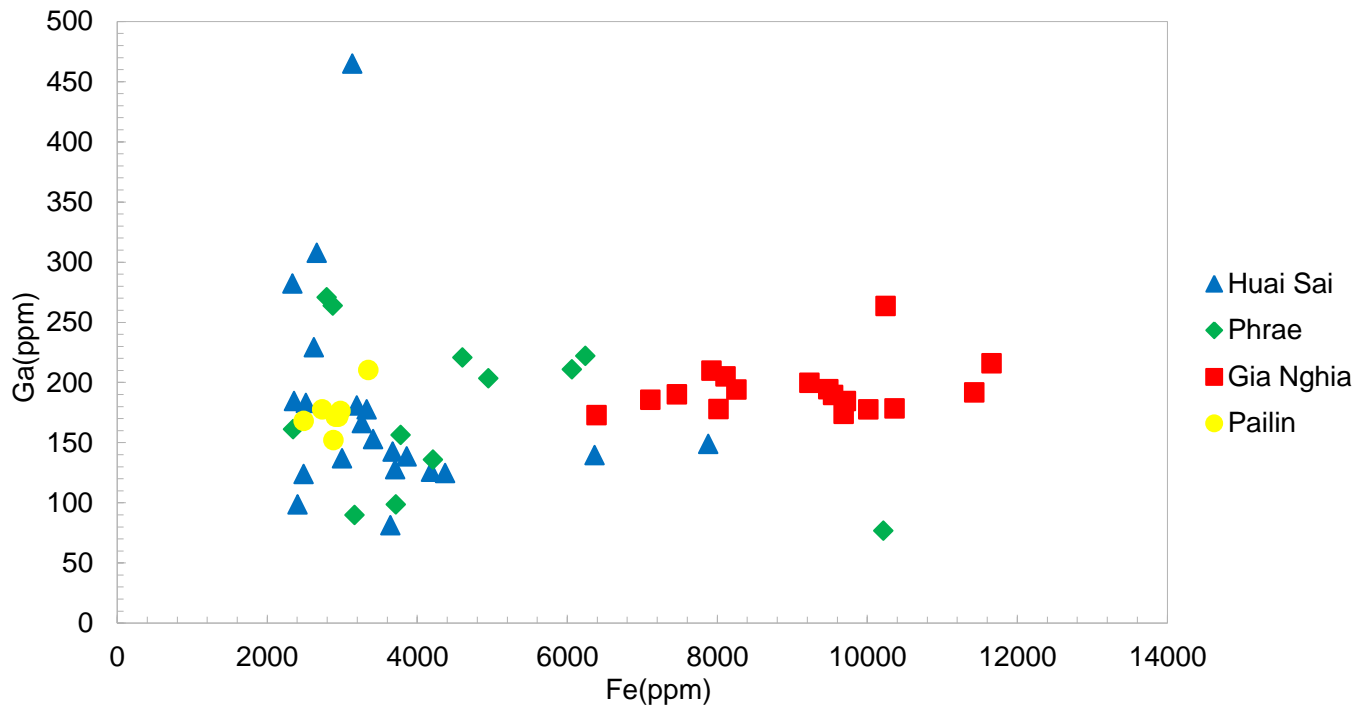
จากตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ทั้งหมด 4 กลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด จำนวน 57 ตัวอย่าง ที่ได้กำหนดจุดและวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีธาตุร่องรอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS รวมจำนวน 228 จุด ได้ข้อมูลแสดงปริมาณเชิงเคมีที่เป็นธาตุองค์ประกอบของพลอยแซปไฟร์ทั้งหมด ได้แก่ ธาตุองค์ประกอบหลัก ธาตุองค์ประกอบรอง และธาตุร่องรอย (ตารางที่ 3.3.1 และรูปภาพที่ 3.3.1) ซึ่งปริมาณของธาตุร่องรอย จะถูกนำมาวิเคราะห์ในการศึกษาครั้งนี้ โดยนำปริมาณของธาตุร่องรอยที่มีอิทธิพลให้เกิดเป็นมิมลทินสีในพลอยแซปไฟร์ ได้แก่ ธาตุเหล็ก (Fe) ธาตุแกลเลียม (Ga) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) ธาตุไทเทเนียม (Ti) ธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr) มาพล็อตกราฟ เพื่อดูแนวโน้มปริมาณธาตุของแต่ละกลุ่มพลอยสีต่างๆ ได้ดังนี้ (รูปที่ 3.3.2 - 3.3.8)

ตารางที่ 3.3.1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของธาตุร่องรอย (ppm) ของตัวอย่าง พลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง โดยเครื่องมือ LA-ICP-MS

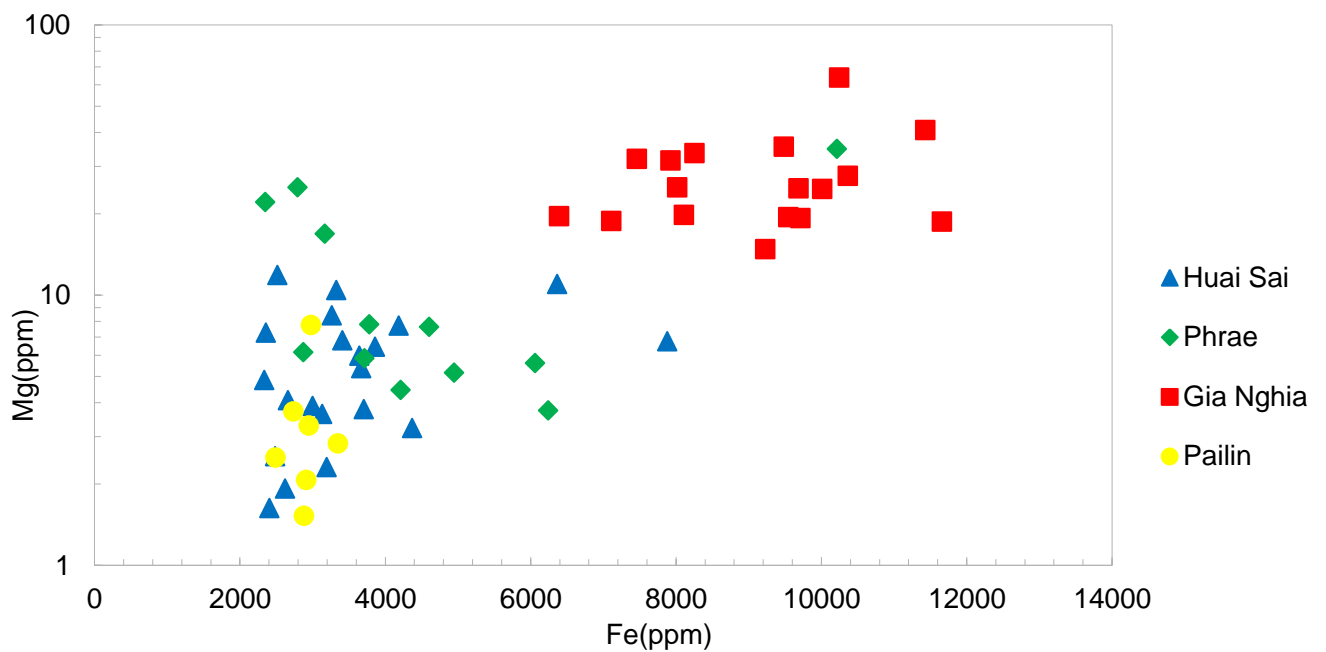
Sample	Phrae	Hai Sai	Pailin	Gia Nghia
Mg24 (ppm)				
AVERAGE	12.10	5.71	3.40	27.65
SD	10.17	2.99	2.26	11.79
Ti47 (ppm)				
AVERAGE	410.15	343.50	152.92	170.25
SD	302.91	251.43	59.56	66.08
V51 (ppm)				
AVERAGE	3.40	2.44	6.82	9.41
SD	5.31	2.69	1.84	6.03
Cr53 (ppm)				
AVERAGE	6.54	5.12	4.65	6.29
SD	0.76	1.00	0.34	1.50
Fe56 (ppm)				
AVERAGE	4579.29	3542.23	2890.64	9095.66
SD	2163.22	1354.93	285.18	1479.56
Ga71 (ppm)				
AVERAGE	175.86	177.06	176.00	194.41
SD	66.23	85.72	19.23	21.65



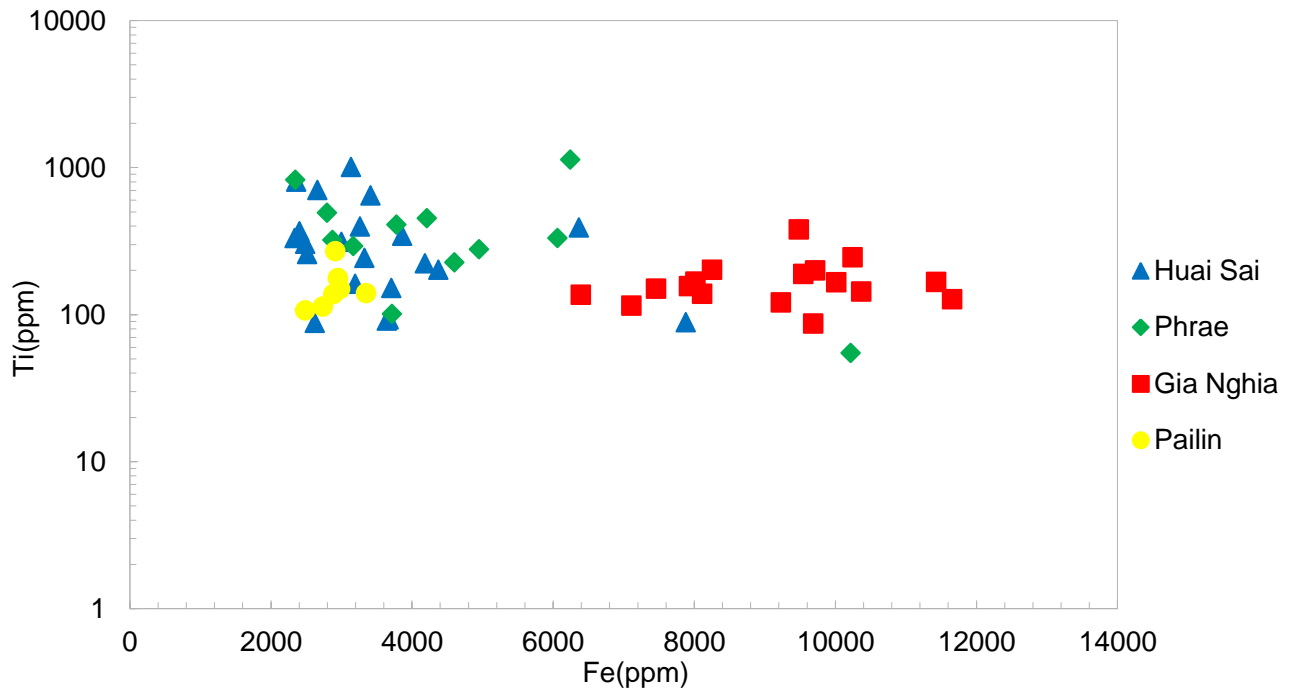
รูปที่ 3.3.1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของธาตุร่องรอย (ppm) ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



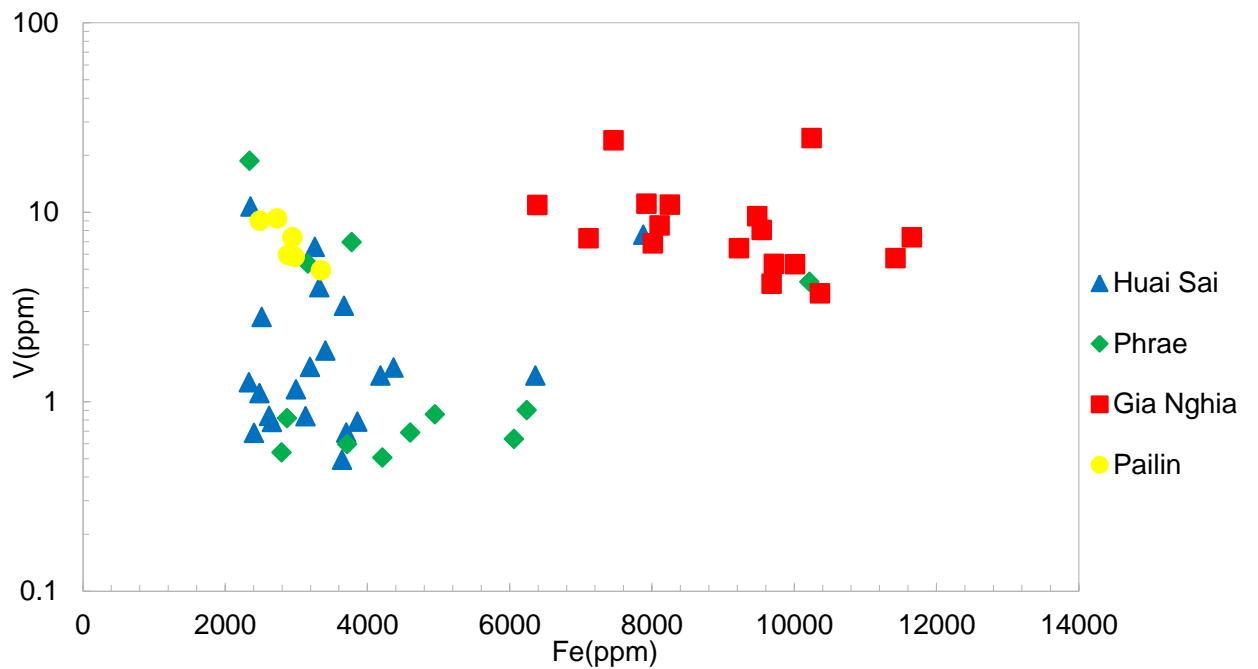
รูปที่ 3.3.2 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแกลเลียม (Ga) ของพลอย
แซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



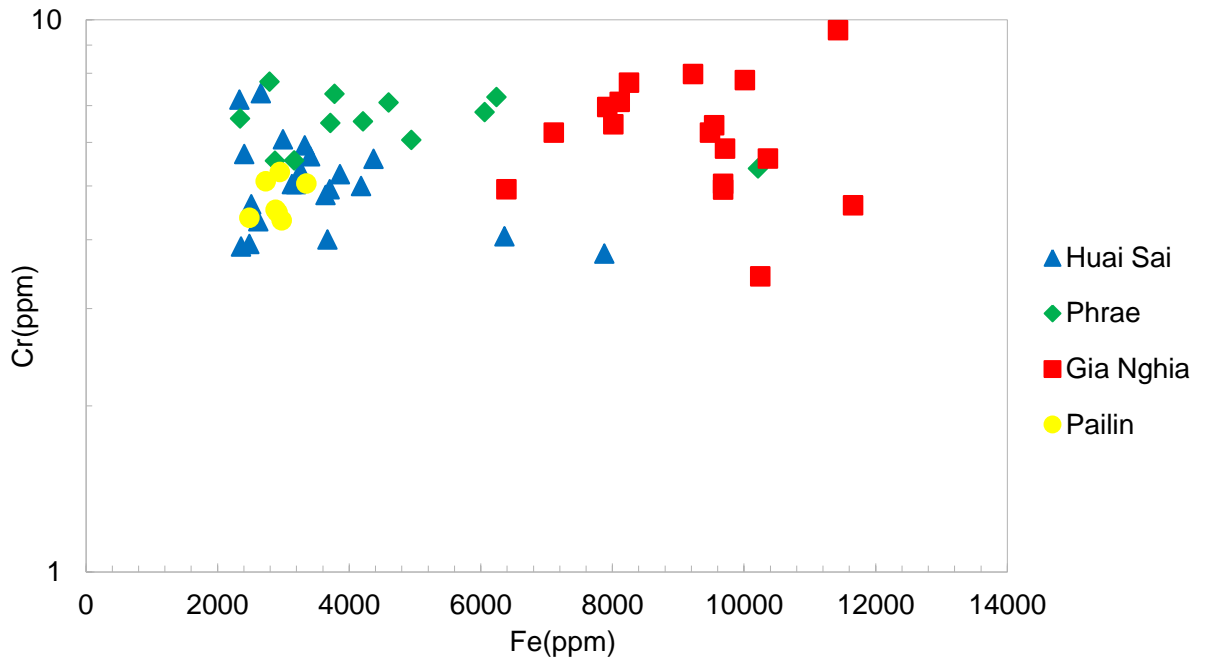
รูปที่ 3.3.3 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแมกนีเซียม (Mg) ของพลอย
แซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



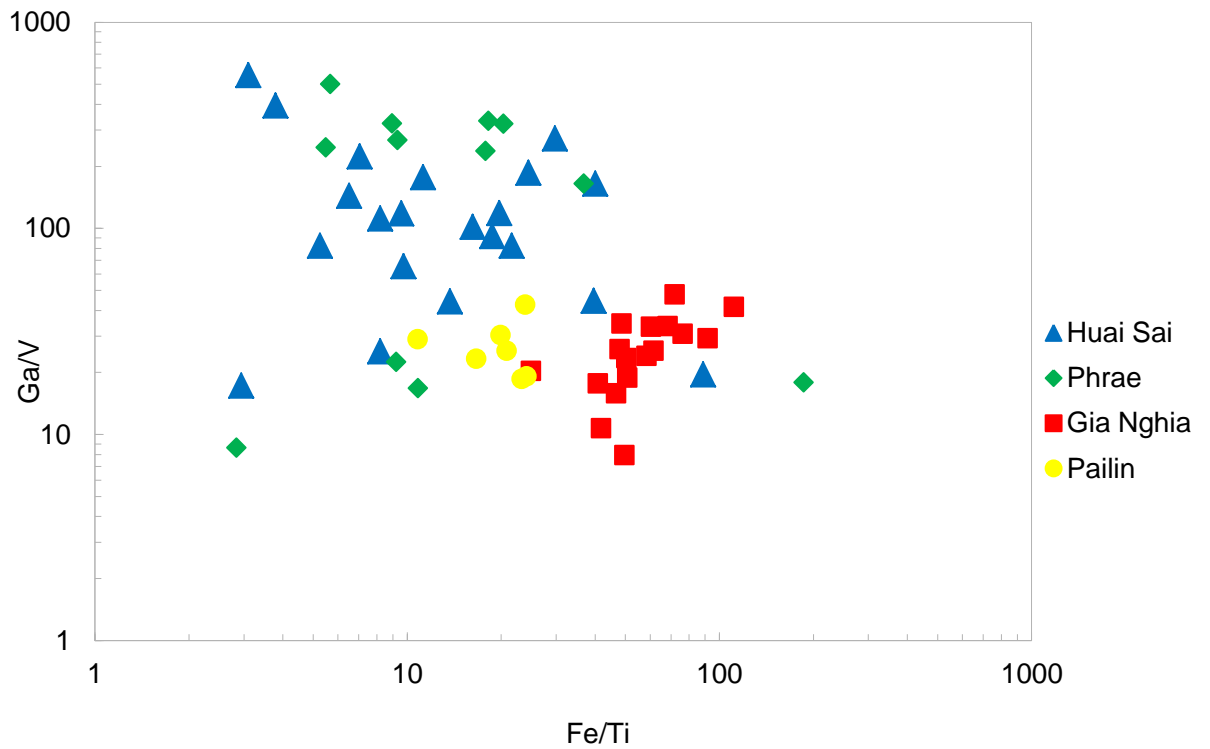
รูปที่ 3.3.4 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุไทเทเนียม (Ti) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



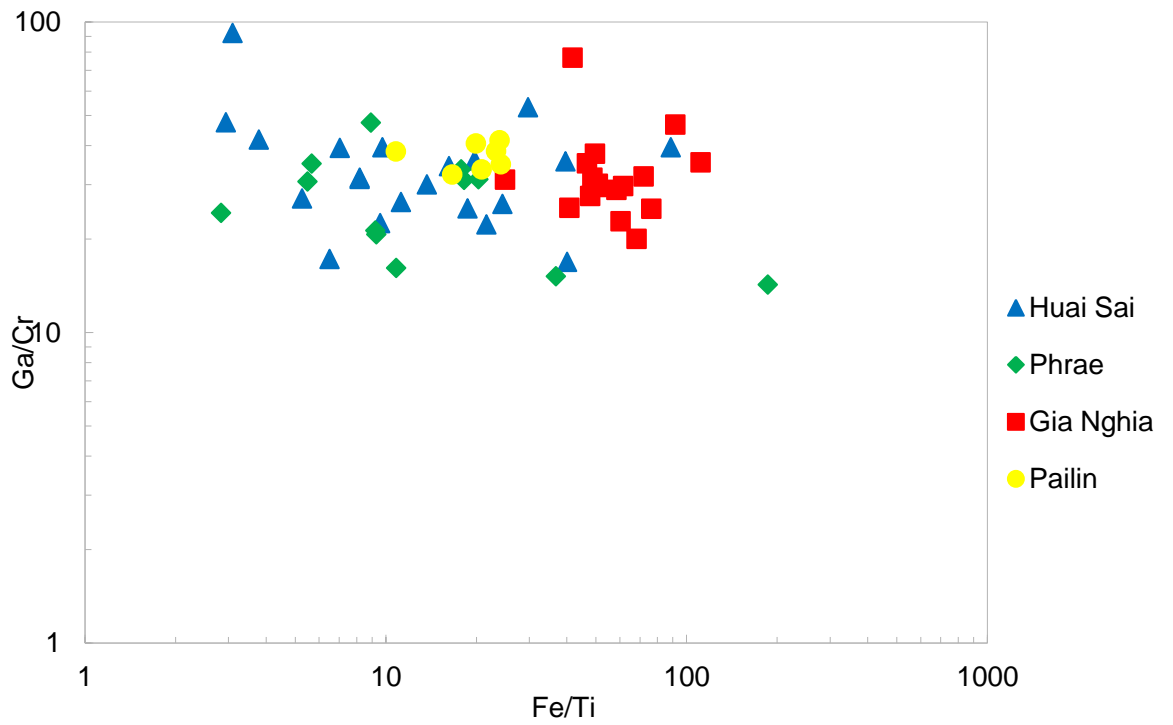
รูปที่ 3.3.5 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุวานาเดียม (V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



รูปที่ 3.3.6 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุโครเมียม (Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



รูปที่ 3.3.7 กราฟปริมาณระหว่างอัตราส่วนปริมาณของธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณของธาตุแกลเลียม (Ga/V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด



รูปที่ 3.3.8 กราฟปริมาณระหว่างอัตราส่วนปริมาณของธาตุเหล็กต่อ ธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับอัตราส่วนปริมาณของธาตุแกเลียมธาตุโครเมียม (Ga/Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละกลุ่มตามแหล่งต้นกำเนิด

บทที่ 4

อภิปรายและสรุปผลการศึกษา

- 4.1 ความเข้มข้นของธาตุรองรอยของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่
สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดเริ่มต้น
- 4.2 สรุปผลการศึกษา

บทที่ 4

อภิปรายผลการศึกษา

4.1 ความเข้มข้นของธาตุร่องรอยของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดเริ่มต้น

ตามที่ Khamloet (2011) ได้ศึกษาเคมีมลทินแร่ของพลอยแซปไฟร์ สามารถแบ่งพลอยแซปไฟร์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีความสัมพันธ์กับการตกผลึกในสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับแมกมาชนิดเฟลสิกที่มีอัลคาไลสูง หรือกลุ่มที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมาในบริเวณเปลือกโลกตอนล่าง และกลุ่มที่เกิดจากกระบวนการแปรสัณพัทธ์กับหินหลอมละลายปนเปื้อน ที่เกิดจากการดันตัวของหินหนืดปะชอลต์ในบริเวณ ชั้นเนื้อโลกส่วนบนหรือชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง ซึ่งบ่งบอกว่าการกำเนิดในสภาพแวดล้อมที่ต่างกัน ได้แก่กลุ่มพลอยแซปไฟร์ทุกแหล่ง และนอกจากนี้ยังมีกลุ่มที่ยังไม่พบมลทินแร่ที่บ่งบอกความสัมพันธ์ของการกำเนิดเริ่มต้น องค์ประกอบเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุร่องรอย(ppm) ของกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกของแมกมาและกระบวนการแปรสภาพที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS แสดงใน รูปภาพที่ 4.1.1

การกระจายตัวของอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกลเลียมต่อแมกนีเซียม (Ga/Mg) และปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง โดยที่แต่ละแหล่งค่อนข้างเกาะกลุ่มกัน แต่อาจจะมีบางส่วนที่มีค่าแตกต่างออกไปบ้าง เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกลเลียมต่อแมกนีเซียม (Ga/Mg) และปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ของ Peucat *et al.* (2007) พบว่าพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง อยู่ในบริเวณที่คาบเกี่ยวระหว่างการเกิดแบบสัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกของแมกมา และการเกิดแบบสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ (รูปที่ 4.1.2) กลุ่มพลอยที่เกิดจากกระบวนการจากการแปรสภาพทั้งสี่แหล่ง มีความเข้มข้นของปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ (<4,000 ppm) และมีอัตราส่วนของธาตุแกลเลียมต่อธาตุแมกนีเซียมที่ค่อนข้างสูง (>10) ส่วนกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่เกิดจากกระบวนการตกผลึกของแมกมา จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุทั้งสามอยู่ในพื้นที่ที่เกิดจากการจากผลึกของแมกมา มีความเข้มข้นของธาตุเหล็ก อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันกับกลุ่มกระบวนการแปรสภาพ และมีอัตราส่วนของธาตุแกลเลียมต่อธาตุแมกนีเซียมปานกลาง

ค่อนข้างสูง (>10) ยกเว้นแหล่งเกียเจียที่มีอัตราส่วนของธาตุแคลเซียมต่อธาตุแมกนีเซียมต่ำกว่าสิบ

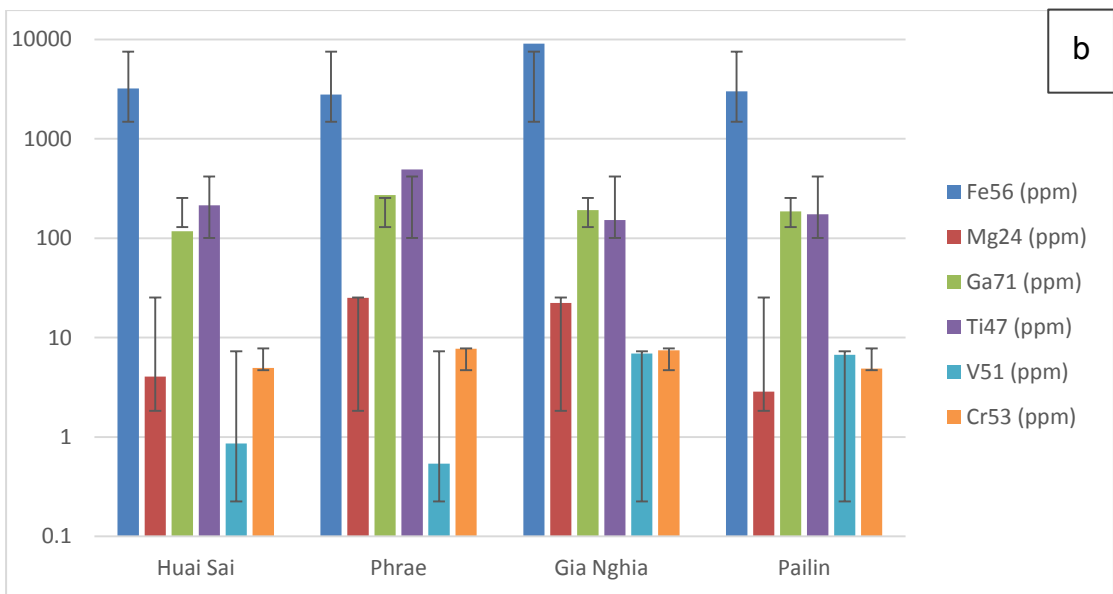
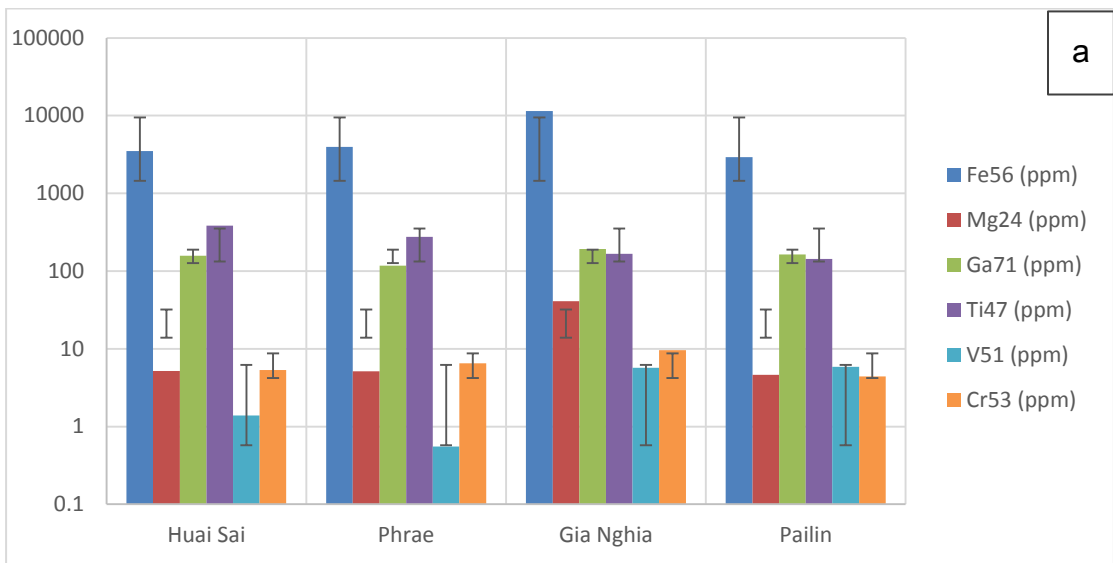
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุเหล็ก และธาตุแคลเซียม (รูปที่ 4.1.3) กลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ทั้งสี่แหล่ง มีความเข้มข้นของธาตุเหล็กที่อยู่ในระดับ (2,000-12,000 ppm) โดยกลุ่มพลอยแซปไฟร์แหล่งเกียเจียจะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุเหล็กมากกว่ากลุ่มพลอยแซปไฟร์แหล่งอื่นมาก และความเข้มข้นของธาตุแคลเซียมทั้งสี่แหล่งมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูง (100-270 ppm) โดยกลุ่มที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกแบบแมกมาในแหล่งเกียเจียจะมีความเข้มข้นของธาตุเหล็กต่ำกว่าแหล่งอื่น

ความเข้มข้นของปริมาณธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็กจะค่อนข้างเกาะกลุ่มกันยกเว้นแหล่งเกียเจียที่มีค่าสูงกว่าแหล่งอื่นมาก ปริมาณธาตุแมกนีเซียมที่สัมพันธ์กับกระบวนการแมกมาและแปรสภาพอยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง (1-25 ppm) (รูปที่ 4.1.4)

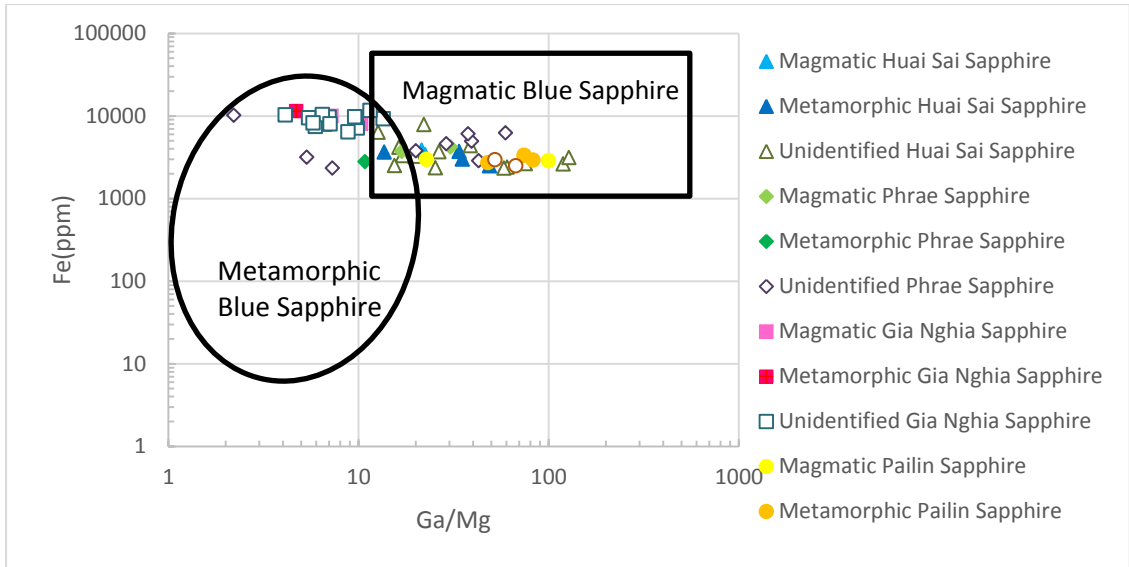
ความเข้มข้นของปริมาณธาตุไทเทเนียมในพลอยแซปไฟร์จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณธาตุเหล็กและธาตุไทเทเนียม (รูปที่ 4.1.5) มีค่าการกระจายตัวที่กว้าง และปริมาณของธาตุไทเทเนียมจะลดลงเมื่อปริมาณของธาตุเหล็กมีค่าสูงขึ้น โดยที่จะมีการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียมอยู่ในช่วง 80-1,000 ppm

ธาตุวานเดียมมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันสำหรับกลุ่มพลอยทั้งสี่แหล่ง (<10 ppm) โดยที่แหล่งห้วยทรายจะมีปริมาณธาตุวานเดียมต่ำมากกว่าแหล่งอื่น (รูปที่ 4.1.6)

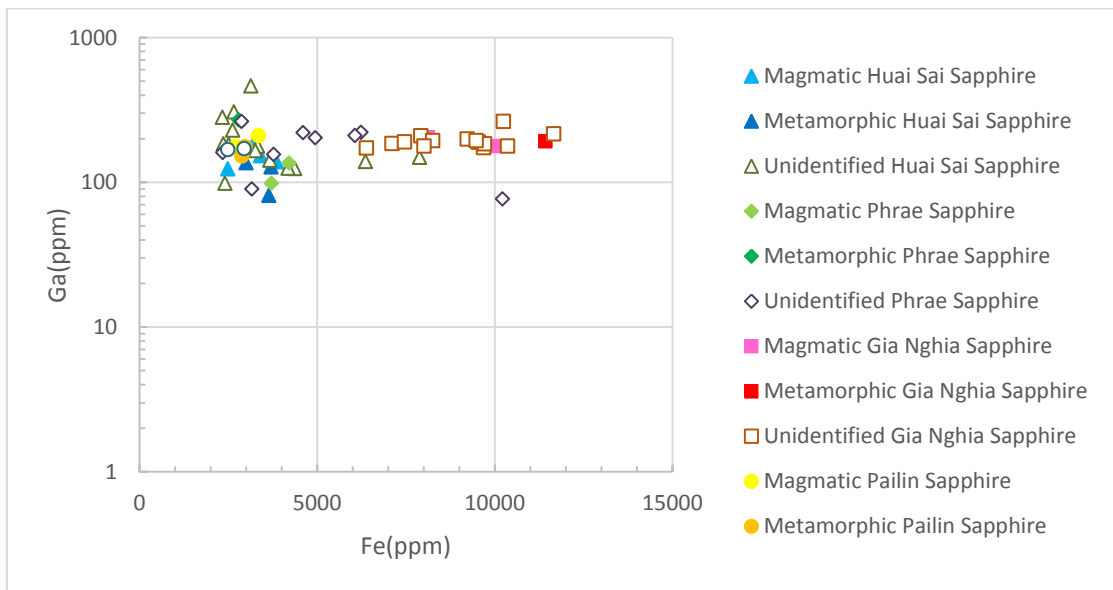
ปริมาณของธาตุโครเมียมมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสี่แหล่งอยู่ในระดับที่ต่ำ (3-10 ppm) ซึ่งแหล่งห้วยทรายจะมีปริมาณโครเมียมที่ต่ำกว่าแหล่งอื่นเป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 4.1.7)



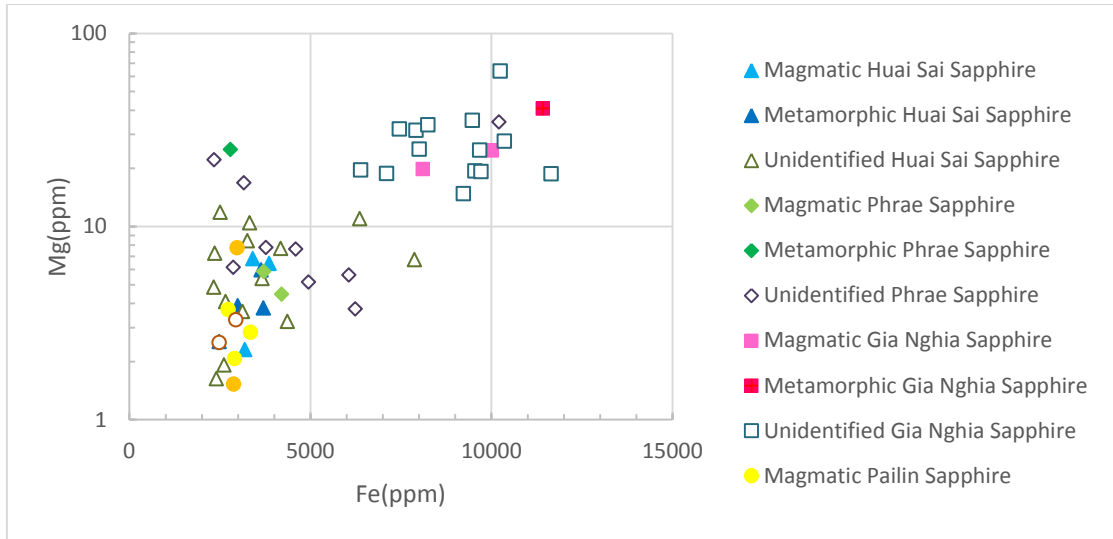
รูปที่ 4.1.1 องค์ประกอบโดยเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณธาตุร่องรอย (ppm) ของกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกของแมกมา (a) และกลุ่มตัวอย่างพลอยที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ (b)



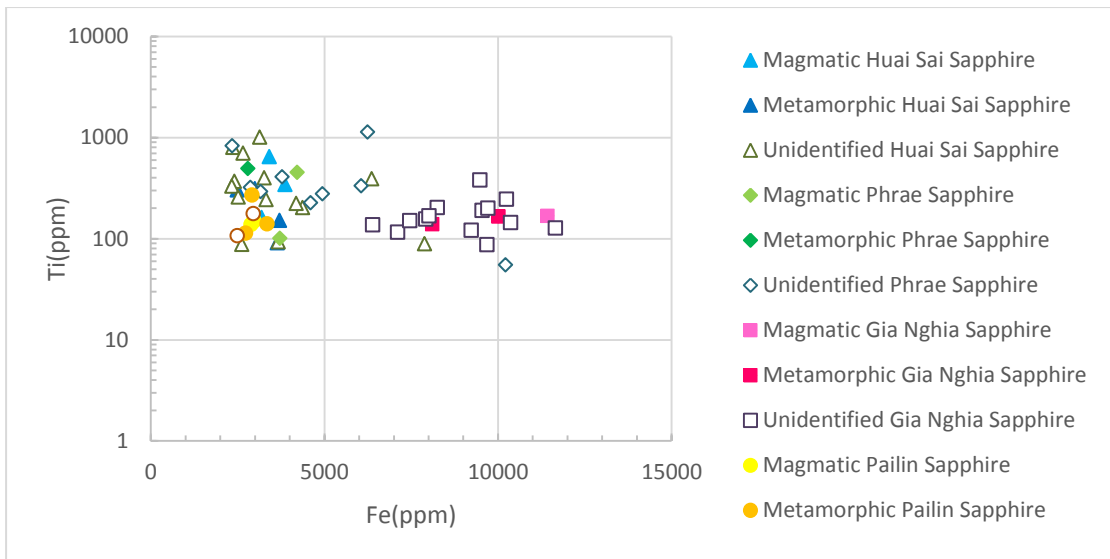
รูปที่ 4.1.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อแมกนีเซียม (Ga/Mg) และปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ของพลอยแซปไฟร์ จากแหล่งบ่อพลอยที่สามารถบ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดเริ่มต้นได้ โดยอ้างอิงกราฟของ Peucat et al. (2007)



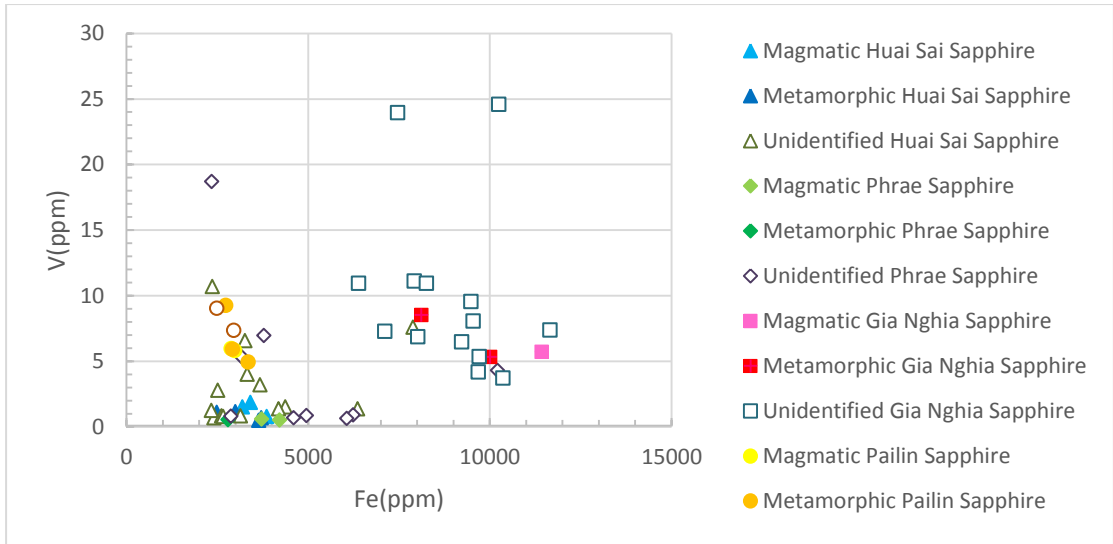
รูปที่ 4.1.3 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแกเลียม (Ga) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



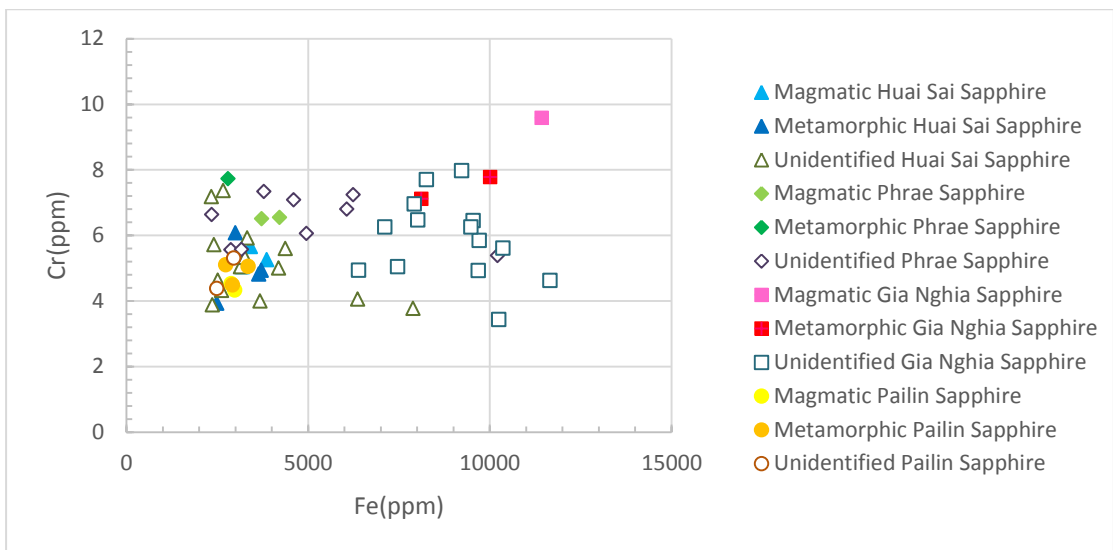
รูปที่ 4.1.4 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุแมกนีเซียม (Mg) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



รูปที่ 4.1.5 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุไทเทเนียม (Ti) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



รูปที่ 4.1.6 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุวานาเดียม (V) ของพลอยแซฟไฟร์แต่ละกลุ่มแหล่ง



รูปที่ 4.1.7 กราฟปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) กับธาตุโครเมียม (Cr) ของพลอยแซฟไฟร์แต่ละแหล่ง

อัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียมของทั้งสี่แหล่งตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ มีค่าใกล้เคียงกัน (5-100) พบว่าโดยเฉลี่ยแล้ว กลุ่มพลอยแซปไฟร์แหล่งเกียเจียที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกแมกมาและกระบวนการแปรสภาพมีค่าสูงกว่าแหล่งอื่นและเกาะกลุ่มกัน ส่วนความเข้มข้นของปริมาณธาตุแคลเซียมมีค่าต่ำถึงปานกลาง (100-300 ppm) โดยแหล่งห้วยทรายมีค่าที่ค่อนข้างกระจาย (รูปที่ 4.1.8)

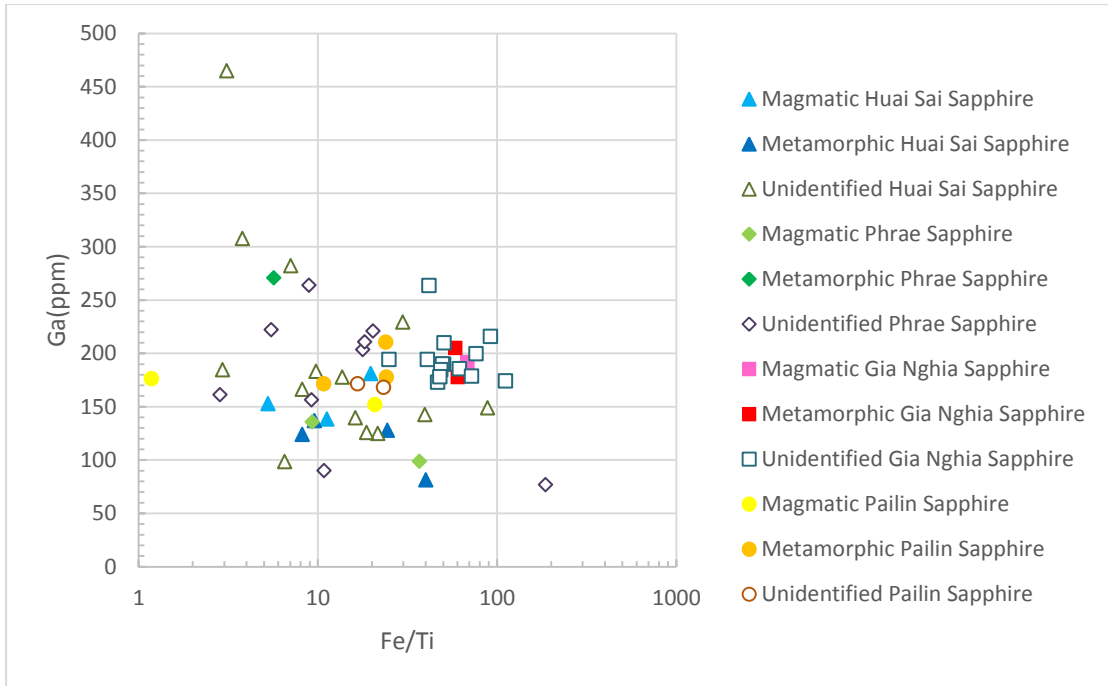
ธาตุแมกนีเซียมมีปริมาณต่ำถึงสูง (10-100 ppm) ในกลุ่มตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ แหล่งเกียเจียมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมสูงทั้งสองกลุ่มที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพและกระบวนการตกผลึกแมกมา (>10ppm) (รูปที่ 4.1.9)

ปริมาณของธาตุวานาเดียมมีค่าต่ำถึงปานกลาง (0.5-20 ppm) โดยกลุ่มแหล่งเกียเจียมีค่าสูงกว่าแหล่งอื่นและเกาะกลุ่มกันชัดเจน (รูปที่ 4.1.10)

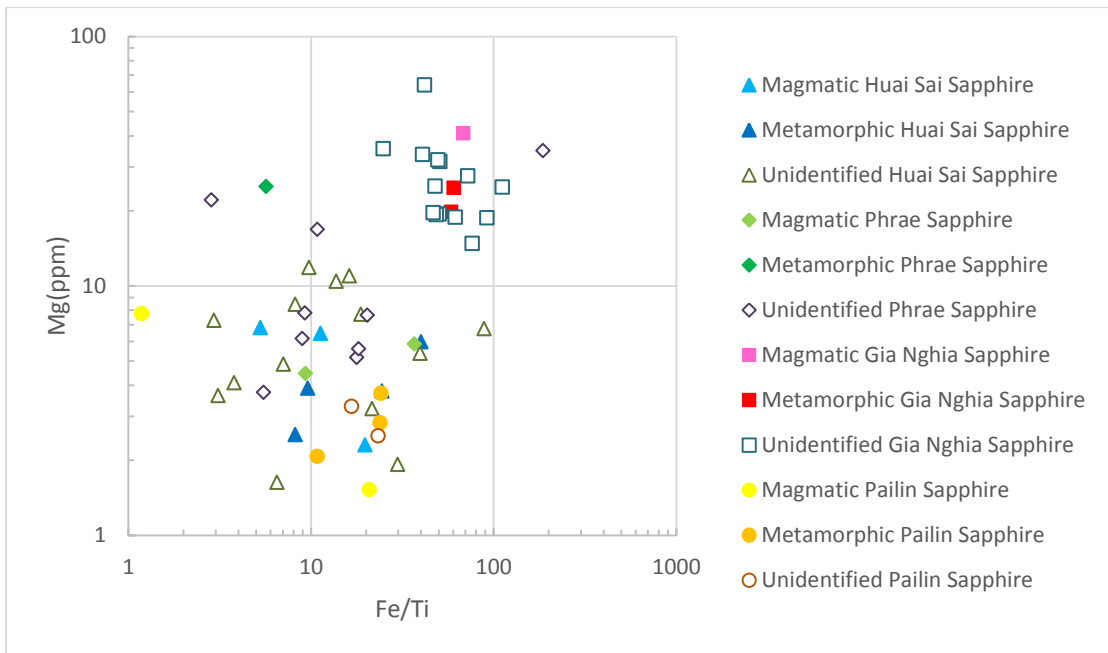
สำหรับปริมาณของธาตุโครเมียมมีค่าต่ำ (3-10 ppm) ซึ่งอัตราส่วนของธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียมสามารถใช้ในการระบุพื้นที่ของการกระจายตัวได้ (รูปที่ 4.1.11)

อัตราส่วนของปริมาณธาตุแคลเซียมต่อธาตุวานาเดียมมีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 10-600 โดยที่ไม่สามารถระบุพื้นที่ของอัตราส่วนปริมาณธาตุที่จะนำมาอ้างอิงได้ เนื่องจากว่าค่าความเข้มข้นของธาตุวานาเดียมมีการกระจายตัวอย่างมาก (รูปที่ 4.1.12)

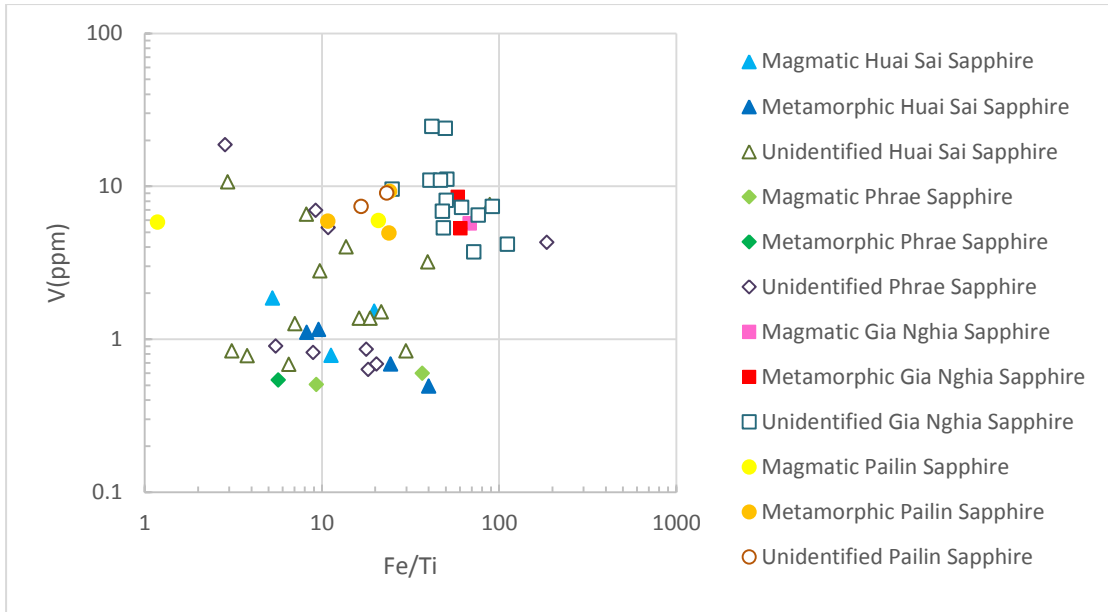
อัตราส่วนของปริมาณธาตุแคลเซียมต่อธาตุโครเมียม มีการกระจายตัวอยู่ในช่วง 15-100 และไม่สามารถระบุพื้นที่ของอัตราส่วนปริมาณธาตุที่จะนำมาอ้างอิงได้เช่นเดียวกับอัตราส่วนของธาตุแคลเซียมต่อธาตุวานาเดียม (รูปที่ 4.1.13)



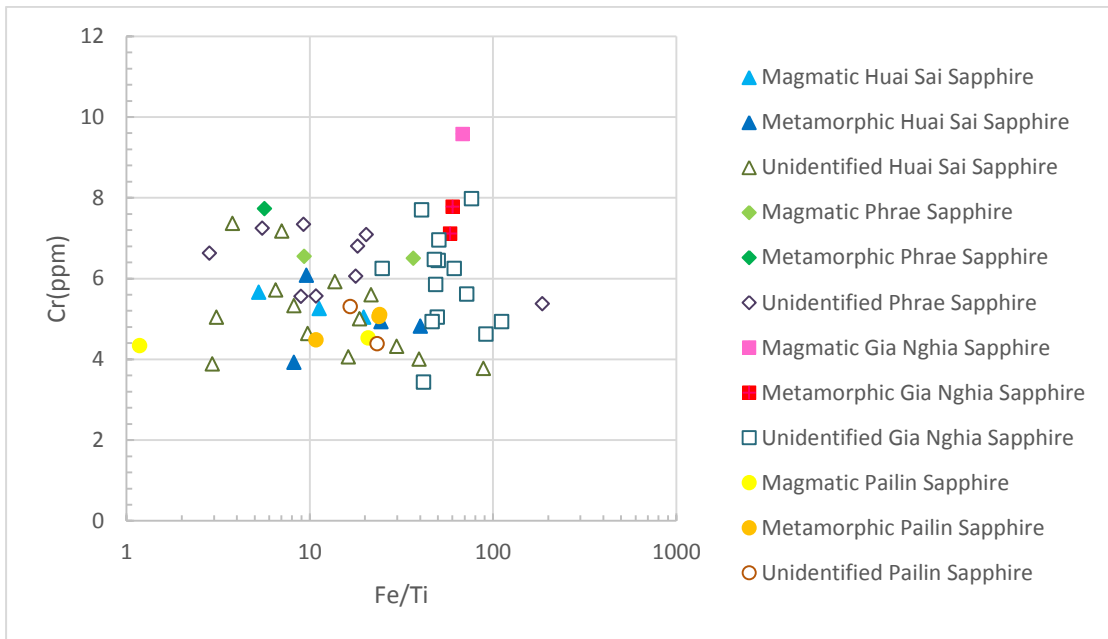
รูปที่ 4.1.8 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (*Fe*) ต่อธาตุไทเทเนียม (*Ti*) กับธาตุแกลเลียม (*Ga*) ของพลอยแซฟไฟร์แต่ละแหล่ง



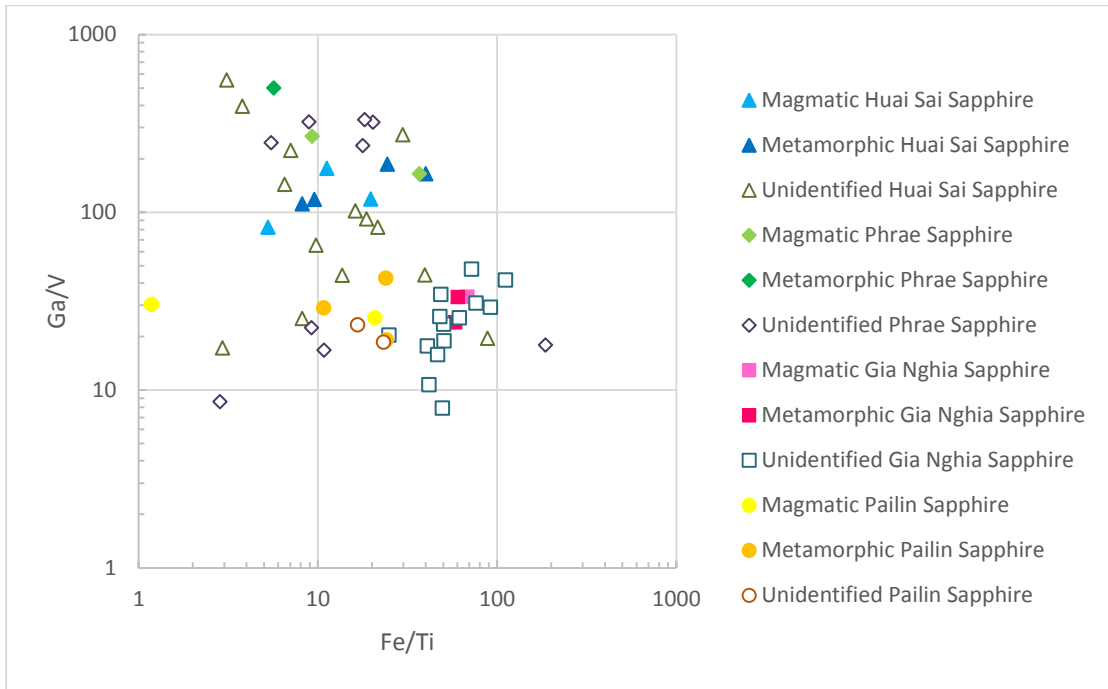
รูปที่ 4.1.9 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (*Fe*) ต่อธาตุไทเทเนียม (*Ti*) กับธาตุแมกนีเซียม (*Mg*) ของพลอยแซฟไฟร์แต่ละแหล่ง



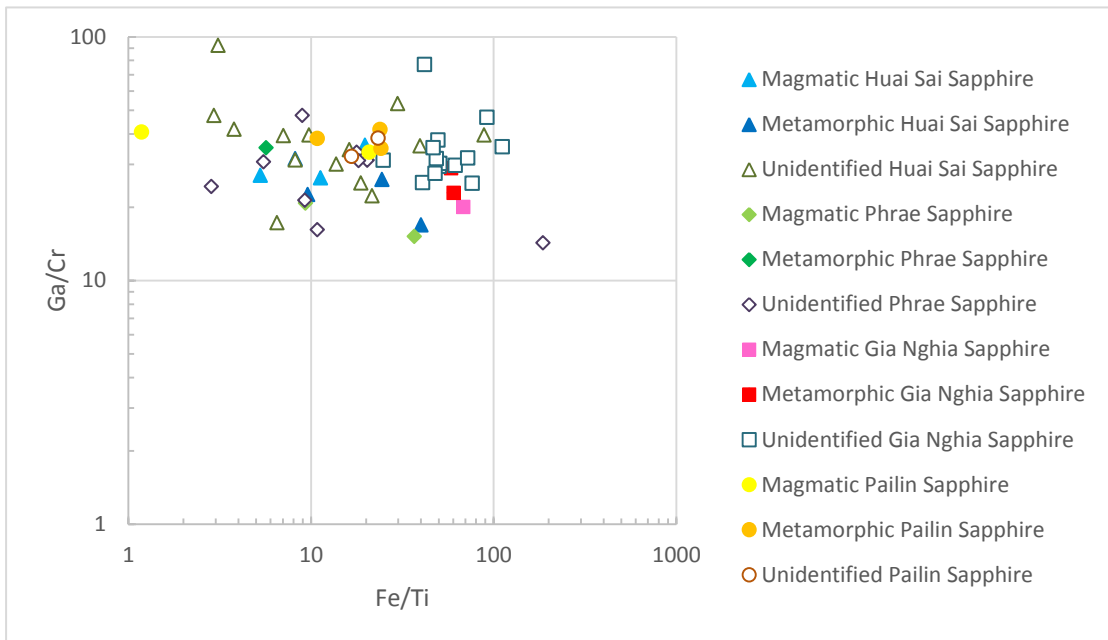
รูปที่ 4.1.10 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับ ธาตุวานเดียม (V) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



รูปที่ 4.1.11 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็ก (Fe) ต่อธาตุไทเทเนียม (Ti) กับ ธาตุโครเมียม (Cr) ของพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่ง



รูปที่ 4.1.12 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับ อัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุแกลเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) ของพลอย แซปไฟร์แต่ละแหล่ง



รูปที่ 4.1.13 กราฟอัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) กับ อัตราส่วนปริมาณระหว่างธาตุแกลเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) ของพลอย แซปไฟร์แต่ละแหล่ง

4.2 สรุปผลการศึกษา

การศึกษาพลอยแซปไฟร์จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณเคมีของธาตุร่องรอยที่เป็นองค์ประกอบของพลอยแซปไฟร์ จากกลุ่มพลอยตัวอย่างจาก แหล่งจังหวัดแพร่ ในประเทศไทย แหล่งไพลิน ในประเทศกัมพูชา แหล่งห้วยทราย ในประเทศลาว และแหล่งเกียเจีย ในประเทศเวียดนาม ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS สามารถแบ่งแยกได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะของแหล่งกำเนิด โดยเปรียบเทียบจากการแบ่งโดยเคมีของมลทินแร่ของกลุ่มพลอยแซปไฟร์หินบะซอลต์ของ Khamloet (2011) กับกราฟแสดงปริมาณของธาตุเหล็ก (Fe) และธาตุแกลเลียม (Ga) ที่สัมพันธ์กับลักษณะ ทางธรณีวิทยา และลักษณะทางภูมิศาสตร์ของแหล่งกำเนิด ของ Peucat *et al.* (2007) กลุ่มพลอยแซปไฟร์ ทั้ง 2 กลุ่มประกอบด้วย

1. กลุ่มที่มีความสัมพันธ์กับการตกผลึกในสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับแมกมาชนิดเฟลสิกที่มีอัลคาไลสูง หรือกลุ่มที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมา ในบริเวณเปลือกโลกตอนล่าง
2. กลุ่มที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการแปรสัณฐานกับหินหลอมละลายปนเปื้อน ที่เกิดจากการดันตัวของหินหนืดบะซอลต์ในบริเวณชั้นเนื้อโลกส่วนบนหรือชั้นเปลือกโลกส่วนล่างหรือกลุ่มที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกจากแมกมา

กลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมา มีความเข้มข้นของธาตุเหล็ก (Fe) อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง (2900-11,000 ppm) ธาตุแกลเลียม (Ga) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูง (110-190 ppm) ธาตุแมกนีเซียม (Mg) ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ (8-60 ppm) ธาตุไทเทเนียม (Ti) ต่ำ ธาตุวานาเดียม (V) (>100 ppm) และ ธาตุโครเมียม (Cr) ในระดับต่ำ (8-10 ppm) อัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) มีค่าสูง อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกลเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) และอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกลเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) มีค่ากระจายมากตามปริมาณของธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr)

กลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการแปรสภาพ มีความเข้มข้นของธาตุเหล็ก (Fe) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างต่ำ (<4,000 ppm) ธาตุแกเลียม (Ga) อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูงเช่นเดียวกับกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับกระบวนการตกผลึกแมกมา ธาตุแมกนีเซียม (Mg) อยู่ในระดับต่ำ (5-15 ppm) ธาตุไทเทเนียม (Ti) สูง ธาตุวานาเดียม (V) อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง และธาตุโครเมียม (Cr) ในระดับต่ำเช่นเดียวกับกลุ่มพลอยแซปไฟร์ที่สัมพันธ์กับการตกผลึกของแมกมา อัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti) มีค่ากระจาย อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อธาตุวานาเดียม (Ga/V) และอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr) มีค่ากระจายมากตามปริมาณของธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr) เช่นกัน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณของธาตุร่องรอยในองค์ประกอบของพลอยแซปไฟร์แล้วพลอยแซปไฟร์แต่ละแหล่งมีธาตุร่องรอยที่เด่นต่างกัน โดยแหล่งเกียเจียจะมีปริมาณธาตุแมกนีเซียม (Mg) และปริมาณธาตุเหล็ก (Fe) ที่สูงกว่าแหล่งอื่นมาก แหล่งแพร์ และแหล่งห้วยทรายมีปริมาณธาตุไทเทเนียม (Ti) สูง และแหล่งไพลินมีปริมาณธาตุแกเลียม (Ga) ที่สูงเช่นเดียวกับแหล่งอื่น

จากการศึกษาทำให้มีความเข้าใจถึงปริมาณของธาตุร่องรอย ที่เป็นองค์ประกอบของพลอยแซปไฟร์ และยังนำไปสู่การระบุลักษณะการเกิด และการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของพลอยแซปไฟร์ ลักษณะทางธรณีวิทยา และลักษณะทางอัญมณีวิทยา ที่มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น โดยดูได้จากปริมาณธาตุเหล็ก (Fe), ธาตุแกเลียม (Ga), ธาตุแมกนีเซียม (Mg), ธาตุวานาเดียม (V) และธาตุโครเมียม (Cr) และอัตราส่วนของปริมาณธาตุเหล็กต่อธาตุไทเทเนียม (Fe/Ti), อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อธาตุแมกนีเซียม (Ga/Mg), อัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อ ธาตุวานาเดียม (Ga/V) และอัตราส่วนของปริมาณธาตุแกเลียมต่อธาตุโครเมียม (Ga/Cr)

เอกสารอ้างอิง

- Abduriyim, A. and Kitawaki, H. 2006. Applications of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Gem & Gemology*. 42(2): 98-118.
- Barr, S., M. and McDonald, A., S. 1981. Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalt of Southeast Asia. *Geol. Soc. Malaysia Bull.* 92: 1069-1142.
- Bunopas, S. and Bunjitradulya, P. 1975. Geology of Amphoe Bo Phloi. North Kanchanaburi with special notes on the Kanchanaburi series. *J. Geol. Soc. Thailand* 1: 51-67.
- Khamloet, P. 2011. Mineral chemistry of inclusions in basaltic sapphire from Southeast Asia. Ph.D. Thesis. Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 185pp.
- Peucat, J.J., Ruffault, P., Fritsch, E., Bouhnik-Le Coz, M., Simonet, C. and Lasnier, B. 2007. Ga/Mg ratio as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires. *Lithos*. 98: 261-274.
- Sutthirat, C., Charusiri, P., Farrar, E. and Clark, A., H. 1994 New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and characteristic of some Cenozoic Basalt in Thailand. *Proceeding of International Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia*. Bangkok, Thailand, pp. 306-321.
- Garnier, V., Ohnenstetter, D., Giuliani, G., Fallick, A.E., Phan Trong, T., Hoang Quang, V., Pham Van, L. and Schwarz, D. 2005. Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, southern Vietnam. *Mineral. Mag.* 69 (1): 21-38.