

ลักษณะเฉพาะของพลอยสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก เมียนมาร์

นายศุภมงคล โภคannonต์

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

CHARACTERISTICS OF RED SPINEL FROM MOGOK, MYANMA

Supamongkol Pokaanon

A report submitted in partial fulfillment of the requirement for the Bachelor Degree of Science

Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University

2015

หัวข้องานวิจัย: ลักษณะเฉพาะของพลอยสปิเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก เชียงใหม่
นิสิตผู้ทำการวิจัย: นาย ศุภมงคล โภคาอนนนต์
ภาควิชา: ธรณีวิทยา
อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์
ที่ปรึกษาร่วม: คุณปิ่นทรี ล้อมทอง
ปีการศึกษา: 2558

ลักษณะเฉพาะของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเชียงใหม่ จากการศึกษาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นพื้นฐานและขั้นสูง 30 ตัวอย่าง ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกับสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย 13 ตัวอย่าง

ภายใต้การศึกษานี้เริ่มลึกลงในสปิเนลจากแหล่งโม่กก ประเทศเชียงใหม่โดย Raman Spectroscopy ประกอบด้วยผลึกแร่โดโลไมท์ ผลึกแร่แคลไซต์ และผลึกแร่อะพาไทต์ สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง UV-NIR Spectrophotometry พบยอดการดูดกลืนที่ 390 ± 3 นาโนเมตรและ 539 ± 3 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุมลทิน Cr^{3+} และเป็นสาเหตุให้สปิเนลจากแหล่งดังกล่าวมีสีแดง

ค่าดัชนีหักเหของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเชียงใหม่และจากประเทศแทนซาเนียมีค่าใกล้เคียงกัน คือประมาณ 1.718 ± 0.002 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสปิเนลทั้ง 2 แหล่งโดย EDXRF และ EPMA ได้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมี พบปริมาณออกไซด์ของธาตุองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ Al_2O_3 และ MgO แต่มีปริมาณของออกไซด์ของธาตุร่องรอยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยสปิเนลจากแหล่งโม่กก จะพบออกไซด์ของธาตุร่องรอย Cr_2O_3 มากที่สุด (ตามด้วย Fe_2O_3 และ ZnO) แต่สปิเนลจากประเทศแทนซาเนียจะพบ ZnO มากที่สุด ตามด้วย Fe_2O_3 และ Cr_2O_3 ความแตกต่างนี้สามารถใช้ในการจำแนกสปิเนลจากทั้ง 2 แหล่งได้อย่างชัดเจน

คำสำคัญ : สปิเนล สเปกตรัม มลทินแร่ ธาตุร่องรอย

Project title: CHARACTERISTICS OF RED SPINEL FROM MOGOK, MYANMA
Researcher: Supamongkol Pokaanon
Department: Geology
Advisor: Associate Professor Dr. Chakkaphan Sutthirat
Co-Advisor: Miss Pantharee Lomthong
Academic Year: 2015

Characteristics of thirty red spinels from Mogok deposit, Myanmar were investigated and their chemical compositions were compared with those of thirteen samples of red spinel from Tanzania.

Raman spectroscopy indicated that dolomite, calcite and apatite are mineral inclusions in Mogok spinel. UV-Vis-NIR Spectrophotometry indicated the absorption peaks are located at 390 ± 3 and 539 ± 3 nm due to Cr^{3+} , causing the 'red' color in spinels.

Refractive indices of spinels from both deposits fall within the same range (1.718 ± 0.002). EPMA and EDXRF analyses yielded similar major compositions of spinels from both deposits (Al_2O_3 and MgO) Mogok spinels contain a comparatively high amount of Cr_2O_3 With lower contents of Fe_2O_3 and ZnO . On the other hand, Tanzanian spinels contain higher ZnO with less amounts of Fe_2O_3 and Cr_2O_3

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตั้งแต่เริ่มทำวิจัย วางแผนการทำงานเป็นขั้นตอน ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์จากเครื่องมือต่างๆ อีกทั้งช่วยตรวจสอบเนื้อหาในรายงานเล่มนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. อภิสิทธิ์ ซาล่า ที่คอยชี้แนะ แนวทางการทำงาน ตรวจสอบความถูกต้องของการนำเสนองาน เปรียบเสมือนเป็นอาจารย์อีกท่านที่คอยช่วยเหลือ ดูแลในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณปิ่นทรีย์ ล้อมทอง คุณนัตยา นิลฮัต คุณธนพงษ์ เหลืออัมพร และคุณทัศนรา ศรีบุญจัน บุคลากรที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (GIT) ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านวิธีการใช้เครื่องมือ ให้ความรู้และคำแนะนำ รวมไปถึงตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์ นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (GIT) ที่ให้ใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ พี่เขาจาก AIGS ที่ให้ยืมสปีเนลสีแดงจากแทนซาเนีย หากไม่ได้ตัวอย่างมาเปรียบเทียบ งานวิจัยครั้งนี้อาจไม่สมบูรณ์

ขอขอบคุณ พี่บุคลากรที่ภาควิชาธรณีวิทยา ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 สมมุติฐาน	1
1.4 ขอบเขตการศึกษา	1
1.5 พื้นที่ศึกษา	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	10
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ	12
บทที่ 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลและอภิปรายผล	
4.1 ลักษณะทั่วไป	18
4.2 มลทินเนื้อใน	19
4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	24

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 องค์ประกอบทางเคมี	25
4.5 อธิปราคาผล	29
บทที่ 5 สรุป	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก ก ภาพตัวอย่างสปีเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์	34
ภาคผนวก ข ภาพตัวอย่างสปีเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย	36
ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์ UV-Vis-NIR	37
ภาคผนวก ง ผลวิเคราะห์เคมีโดย EPMA	42
ภาคผนวก จ ผลวิเคราะห์เคมีโดย EDXRF	51

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศเมียนมาร์ (ที่มา www.m.palaminerals.com/mogok)	3
รูปที่ 1.2 แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศแทนซาเนีย (ที่มา www.impalaminerals.com/propertiesgeology_tanzania.html)	4
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของช่วงแสงที่ดูดกลืนของสปีเนลที่ได้รับความร้อน อุณหภูมิต่างๆกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดูดกลืน (Widmer,2014)	8
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง UV-VIS-NIR (Saeseaw,2009)	9
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา	10
รูปที่ 3.2 Refractometer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	12
รูปที่ 3.3 Hydrostatic Balance จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	13
รูปที่ 3.4 Gemological microscope จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูปที่ 3.5 เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูปที่ 3.6 เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Ranishaw จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	15

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.7 เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	16
รูปที่ 3.8 เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100 จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	17
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างสปีเนลสีแดงแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์	18
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสปีเนลสีแดงประเทศแทนซาเนีย	19
รูปที่ 4.3 มลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็ก (RS_Mogok_11)	20
รูปที่ 4.4 มลทินผลึกเนกาทีฟของสปีเนลสีแดงจากแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์	21
รูปที่ 4.5 มลทินแร่ชนิดต่างๆใน ตัวอย่างสปีเนลจากแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์	21
รูปที่ 4.6 มลทินแร่ชนิดต่างๆใน ตัวอย่างสปีเนลจากแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์	22
รูปที่ 4.7 Raman Spectrum ผลึกแร่โดโลไมท์ (dolomite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_8	23
รูปที่ 4.8 Raman Spectrum ผลึกแร่แคลไซต์ (calcite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_16	23
รูปที่ 4.9 Raman Spectrum ผลึกแร่อะพาไทต์ (apatite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_20	24
รูปที่ 4.10 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของสปีเนลสีแดงจากแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์(RS_Mogok_1)	25
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสังกะสีกับแมกนีเซียม	29
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโครเมียมกับแมกนีเซียม	30
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง MgO/ZnO กับ Al ₂ O ₃ /Cr ₂ O ₃	31

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ผลของการวิเคราะห์ LA-ICP-MS ของสปีเนลจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ (Widmer,2014)	9
ตาราง 4.1 สมบัติทางกายภาพของสปีเนลสีแดงแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์และประเทศแทนซาเนีย	19
ตาราง 4.2 ตารางเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ทางเคมีของสปีเนลสีแดงแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ กับสปีเนลสีแดงประเทศแทนซาเนียโดยเครื่องมือ EDXRF	26
ตาราง 4.3 ตัวแทนผลวิเคราะห์ทางเคมีของสปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ โดยเครื่องมือ EPMA	27
ตาราง 4.4 ตัวแทนผลวิเคราะห์ทางเคมีของสปีเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย โดยเครื่องมือ EPMA	27

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

แร่รัตนชาติคือแร่หรือวัตถุจากธรรมชาติที่สามารถนำมาเจียรไน ตกแต่งและแกะสลักเพื่อใช้เป็นเครื่องประดับ โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างรายได้ให้กับประเทศผู้ผลิตมหาศาล

สปิเนล (spinel) เป็นแร่รัตนชาติที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทางธรณีวิทยาที่เกี่ยวข้องกับหินอัคนีและหินแปร ซึ่งสปิเนลจะเกิดเป็นแร่องค์ประกอบรองในหินทั้งสองชนิดนี้ ทำให้พบแหล่งสปิเนลที่สำคัญหลายแหล่ง ทั้งนี้สปิเนลเป็นอัญมณีตัวหนึ่งที่เป็นที่นิยมของผู้คนมากมายเนื่องจากมีสีสันที่หลากหลายและมีประกายที่สวยงามทำให้มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูงโดยเฉพาะสปิเนลสีแดงเลือดนกเป็นสีที่เป็นที่นิยมที่สุดเพราะมีลักษณะคล้ายคลึงทับทิมซึ่งประเทศเมียนมาร์และประเทศแทนซาเนียเป็นประเทศผู้ผลิตสปิเนลที่มีชื่อเสียงของโลกในปัจจุบัน

เนื่องจากสปิเนลที่มาจากแหล่งโมกก (mogkok) ประเทศเมียนมาร์และแทนซาเนียมีสีที่คล้ายคลึงกันแต่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจไม่เท่ากันจึงส่งผลให้ต้องมีการศึกษาเอกลักษณ์และข้อแตกต่างระหว่างสปิเนลจากทั้งสองแหล่งเพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้บอกแหล่งกำเนิดเพื่อเพิ่มมูลค่าของสปิเนลต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Physical properties) ลักษณะทางแสง (Optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis) ของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ เปรียบเทียบกับสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย

1.3 สมมุติฐาน

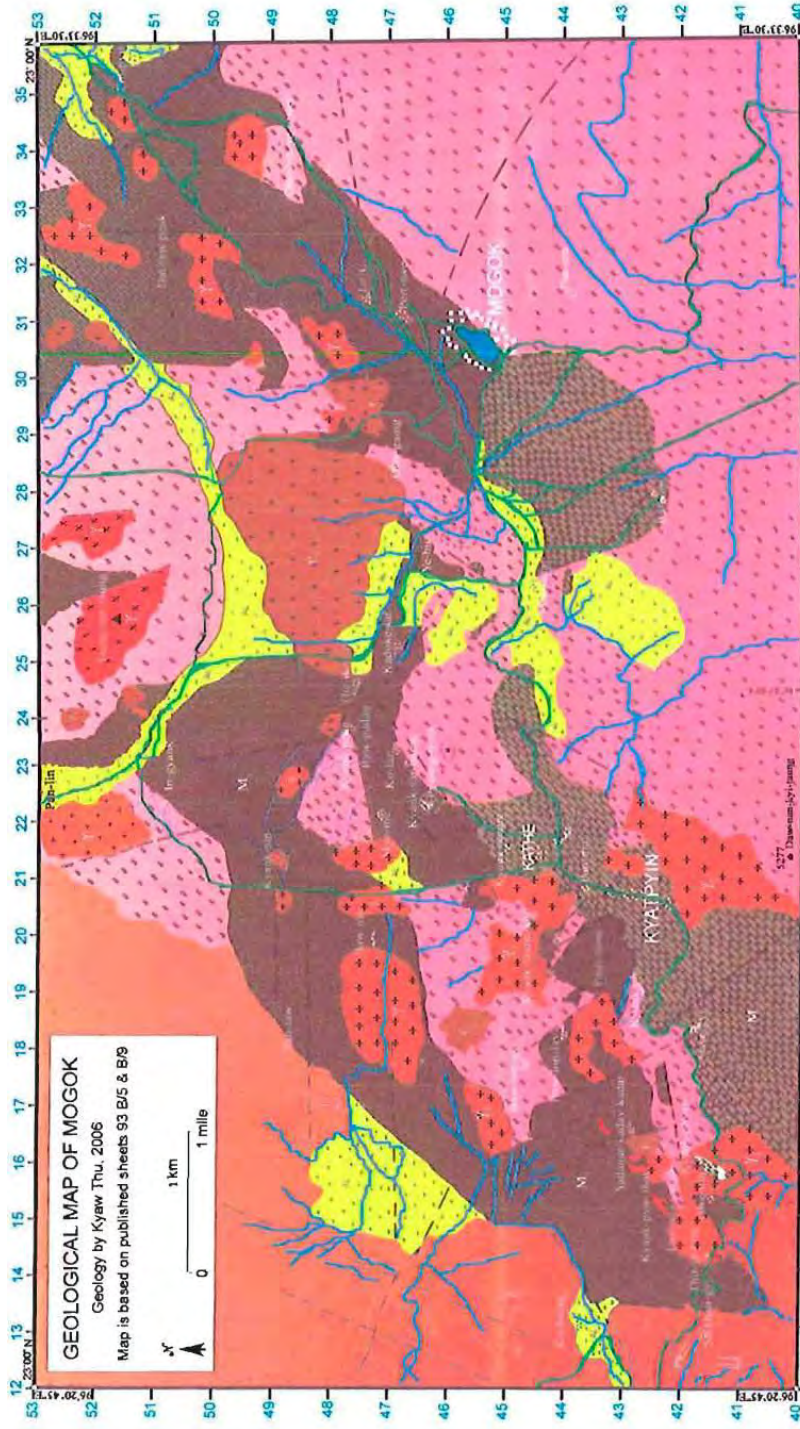
สปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกกประเทศเมียนมาร์มีลักษณะเฉพาะทางอัญมณีที่แตกต่างจากสปิเนลจากประเทศแทนซาเนีย

1.4 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาลักษณะเฉพาะตัวของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกกในประเทศไทย 30 ตัวอย่าง โดยศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพลอย ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางแสง และองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องมือทางอัญมณีพื้นฐาน และเครื่องมือวิเคราะห์อัญมณีขั้นสูงเปรียบเทียบกับสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย 13 ตัวอย่าง

1.5 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาอยู่ในเมืองโมกก ประเทศเมียนมาร์ ละติจูด 22.91667N ลองจิจูด 96.5E (รูปที่ 1.1) และเมืองชองเจีย ประเทศแทนซาเนีย ละติจูด -6.17486S ลองจิจูด 35.73792E (รูปที่ 1.2)



Explanation

- Alluvium
- IGNEOUS ROCKS**
- Pegmatites and aplites: Localized vein embudled into the matrix microgranite, carrying topaz, quartz, feryl, muscovite, etc.
- Kaping Granite: Medium-grained with uniform texture, composed mainly of quartz, alkali feldspar, and biotite.
- Uffe Seives: Coarse grained, composed mainly of nepheline, hornblende and some augite.
- Syenite rocks: Coarse grained matrix of nepheline, minor sapphirine bearing feldspathoid syenites and sapphirine bearing leucocratic alkali syenite pegmatites.
- Leucogranite: Coarse-grained, composed of alkali feldspar and quartz with some biotite and garnet.
- Augite-biotite granite: Coarse-grained, foliated, composed of quartz, alkali-feldspar, pyroxene, augite and biotite.

METAMORPHIC ROCKS
(metamorphosed Lower Paleozoic rock units)

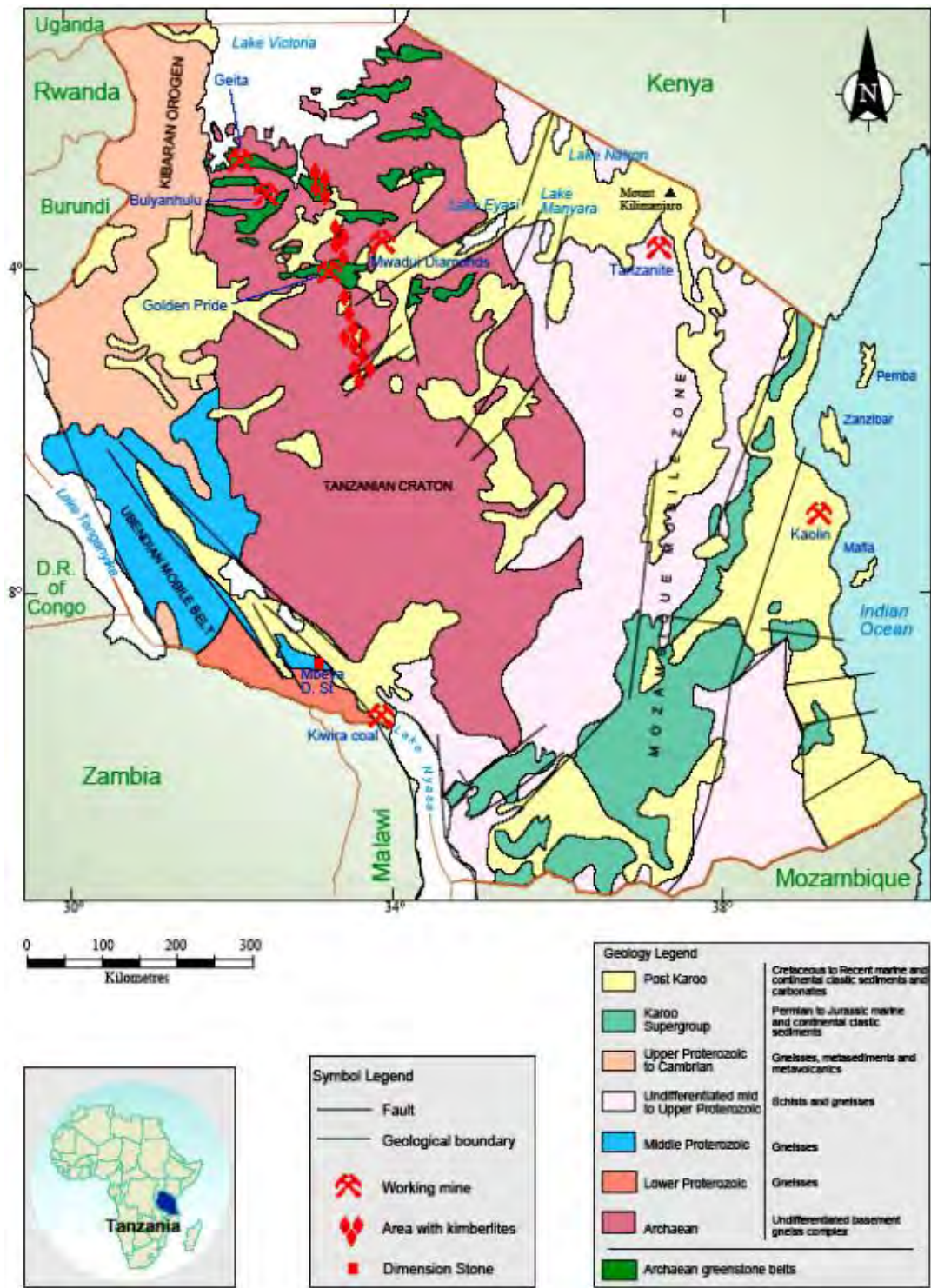
- Gneiss quartzite
 - Aye myin chaw-thar calc-silicate rocks
 - Wabyu taung marble
 - Kaba gneiss
- Quaternary
 Middle Miocene
 Middle Miocene
 probable Late Oligocene
 Late Oligocene
 Early Oligocene
 Early Cretaceous

(metamorphic age)
 Late Oligocene

SYMBOLS

- Motor road
- Village
- Peak
- Fault
- Stream
- Lithologic boundary

รูปที่ 1.1 แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศเมียนมาร์ (ที่มา www.m.palaminerals.com/mogok)



รูปที่ 1.2 แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศแทนซาเนีย

(ที่มา www.impalaminerals.compropertiesgeology_tanzania.html)

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลักษณะเฉพาะของสปิเนลจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ และลักษณะเฉพาะของสปิเนลจากประเทศแทนซาเนีย
2. ความแตกต่างระหว่างสปิเนลจากทั้ง 2 แหล่ง
3. พัฒนาข้อมูลของแหล่งกำเนิดสปิเนล เพื่อสนับสนุนตลาด การค้า ตลอดจนเศรษฐกิจด้านอัญมณีของประเทศไทยให้เติบโตสู่ระดับสากล

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษา

2.1.1 ธรณีวิทยาของประเทศเมียนมาร์

ประเทศเมียนมาร์เกิดจากกระบวนการแปรสัณฐานที่สำคัญ 2 เหตุการณ์ คือการชนกันของแผ่นเปลือกโลกพม่าตะวันตก (Western Burma plate) กับแผ่นเปลือกโลกฉานไทย (Shan-Thai plate) ซึ่งทำให้เกิดรอยเลื่อนสะเกียงและอีกเหตุการณ์หนึ่งคือการชนกันของแผ่นเปลือกโลกอินเดียกับแผ่นเปลือกโลกยูเรเชียทำให้เกิดความร้อนและความดันสูงส่งผลให้เกิดการแปรสภาพแบบไพศาลเกิดเป็นแนวหินแปรโมก (Mogok metamorphic belt) (ดูรูปที่ 1.1)

จากกระบวนการแปรสัณฐาน Muang Thein (1993) ได้แบ่งพื้นที่ประเทศเมียนมาร์ตามลักษณะธรณีวิทยาเป็น 3 พื้นที่หลัก คือ พื้นที่สูงตะวันออก (Eastern Highland; EH) ประกอบไปด้วยที่ราบสูงหินปูนอายุเก่าแก่และหน่วยหินแปรซับซ้อน (Metamorphic complex) พื้นที่ราบตอนกลาง (Central Lowland; CL) วางตัวตามแนวเหนือ-ใต้และมีรอยเลื่อนสะเกียงตัดผ่านด้านตะวันออกของพื้นที่ และแนวหินคดโค้งทางพื้นที่สูงตะวันตก (Western Highland; EH) เป็นชุดหิน Ophiolite suite ประกอบด้วยหินตะกอนจากทะเลลึกและหินผสม (melange) ของหินเมฟิกและหินอัลตราเมฟิก ซึ่งอยู่บริเวณที่ราบสูงฉาน

แนวการแปรสภาพโมก ประกอบด้วยหินตะกอนแปรสภาพ (meta-sedimentary rock) ของมหายุคพาลีโอโซอิก หินอัคนีแปรสภาพ (meta-igneous rock) มหายุคมีโซโซอิกตอนต้นและหินอัคนีบาดาลอายุอ่อนจากการศึกษาของ Chhibber (1934) และ Iye (1953) พบว่าหินอ่อนที่ให้น้ำกำเนิดอัญมณีในแนวการแปรสภาพโมกมีอายุพรีแคมเบรียนก่อนที่จะแปรสภาพ Iye (1993) รายงานว่าพลอยแซปไฟร์ (sapphire) ในแนวการแปรสภาพโมกเกิดจากการตกผลึกอยู่ในหินเพกมาไทต์ (Pegmatite) ที่มีปริมาณ Alumina ในหินหนืดร้อนความเข้มข้นสูงกว่าจุดอิ่มตัว นอกจากนี้ยังอาศัยแก๊ซที่เกิดจากหินหนืดใต้เปลือกโลกเป็นตัวกลางถ่ายเท Alumina จากหินหนืดไปยังหินปูน (Limestone) ส่งผลให้หินปูนเกิดการแปรสภาพและให้พลอยแซปไฟร์ดังกล่าว

จากการศึกษาหาอายุการแปรสภาพโดย Bertrand et al. (2001) ในการหาอายุของแนวหินแปรโมกโดยใช้วิธี $40\text{K}-40\text{Ar}$ จากแร่ไมก้า พบว่าแนวหินแปรโมกเกิดการแปรสภาพในช่วงยุคโอลิโกซีนตอนต้นถึงตอนกลางของยุคไมโอซีน

2.1.2 ธรณีวิทยาของประเทศแทนซาเนีย

จากเหตุการณ์แพนแอฟริกา (Pan-African) เกิดการชนกันของ มหาทวีปกอนด์วานาตะวันออก (East Gondwana) กับมหาทวีปกอนด์วานาตะวันตก (West Gondwana) ในยุคพรีแคมเบรียน มหาทวีปกอนด์วานาตะวันออกมุดตัวไปได้มหาทวีปกอนด์วานาตะวันตกเพราะมีความหนาแน่นมากกว่าเกิดเป็นสันเขาขนาดใหญ่ (supermountain) บริเวณดังกล่าวเป็นหินที่มีอัญมณีและในปัจจุบันถูกปิดทับด้วยหินฐานของประเทศเคนยา แทนซาเนีย และโมซัมบิก (ดูรูปที่ 1.2) เป็นต้น โดยชั้นหินที่พบแร่อัญมณีมักสัมพันธ์กับ Chromium-rich ophiolite

จากงานวิจัยของ Dirlam et al.(1992) แหล่งอัญมณีที่พบในประเทศแทนซาเนียมักสัมพันธ์กับแนวเทือกเขาโมซัมบิก (Mozambique Orogenic belt) แบ่งย่อยตามยุคการตกสะสมตัวได้ 4 ช่วงอายุคือ

หินมหายุคอาร์เคียน (Archaen) ประกอบด้วยหินแปรเกรดสูง แอมฟิโบลิต์เพชีส์ ถึงแกรนูไลต์เพชีส์ (Amphibolite-Granulite facies) และหินอัคนีบาดาล

หินมหายุคโปรเทโรโซอิก (Proterozoic) เป็นชั้นหินหลักในการผลิตอัญมณีประกอบด้วยหินแปรเกรดสูง และหินอัคนีบาดาล ซึ่งหินในมหายุคโปรเทโรโซอิกเป็นหินที่มีแร่อัญมณีและทอง

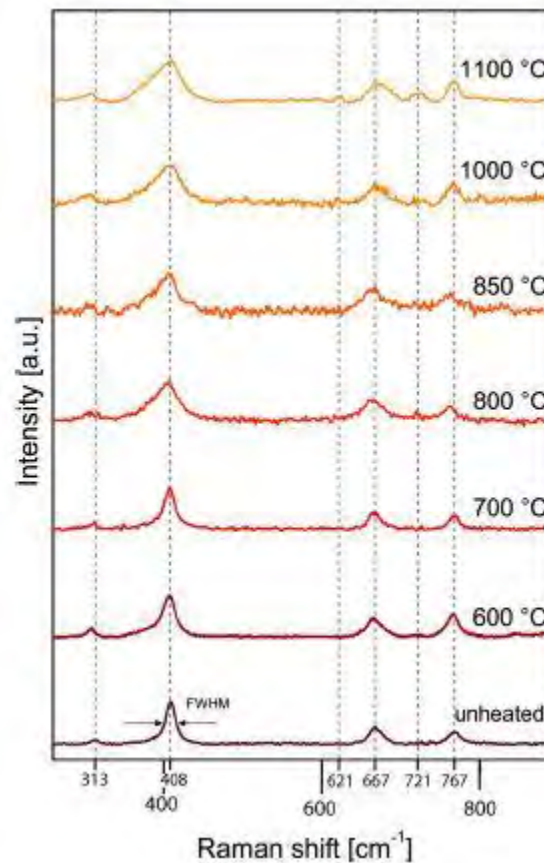
หินมหายุคพาลีโอโซอิกถึงมีโซโซอิก (Paleozoic-Mesozoic)ประกอบด้วยหินตะกอนชายฝั่งและคิมเบอไลต์ (kimberlite)

หินมหายุคซีโนโซอิกถึงปัจจุบัน (Cenozoic-Recent)ประกอบด้วยตะกอนปัจจุบันและหินภูเขาไฟยุคซีโนโซอิก

2.2 ลักษณะสปีเนลที่ศึกษา

จากงานวิจัยของ Widmer et al. (2014) ได้ศึกษาการเผาสปีเนลสีด้วยอุณหภูมิตั้งแต่ 600 - 1000 องศาเซลเซียส แล้วศึกษาการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy และศึกษาปริมาณธาตุมลทินในแร่สปีเนลด้วย LA-ICP-MS จะพบว่าสีแดงของสปีเนลจากประเทศเมียนมาร์เกิดจากโครเมียม (chromium) และวานาเดียม (vanadium)

สปีเนลที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างกันจะมีผลต่อโครงสร้างและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดูดกลืนที่ตรวจได้จากเครื่อง Raman Spectroscopy (Widmer, 2014) โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ฐานของยอดการดูดกลืนที่ 408 667 และ 767 cm^{-1} กว้างขึ้น สังเกตได้จากกราฟ (รูปที่ 2.1)



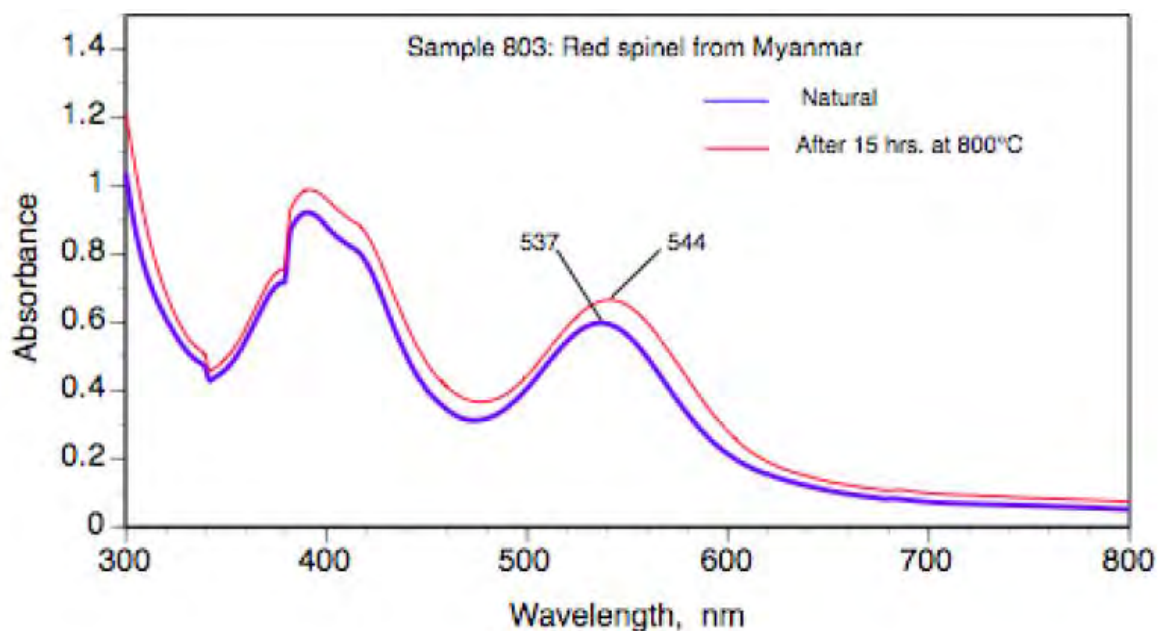
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของช่วงแสงที่ดูดกลืนของสปีเนลที่ได้รับความร้อนอุณหภูมิต่างๆกับช่วงความยาวคลื่นแสงที่ดูดกลืน (Widmer, 2014)

จากการศึกษาธาตุมลทินในสปีเนลสีแดงจากประเทศเมียนมาร์โดยใช้ LA-ICP-MS โดยเลือกใช้ธาตุ Si, Ti, Al, Cr, V, Fe, Mn, Mg, Ca, Sr, Ba, Na, K, Ni, Cu, Zn, P, F และ Cl

ตาราง 2.1 ผลของการวิเคราะห์ LA-ICP-MS ของสปีเนลจากแหล่งโมกกประเทศเมียนมาร์ (Widmer, 2014)

Oxide	Average EMP anal.	Esd	Average LA-ICP-MS anal.	Esd
SiO ₂	0.16	0.07		
TiO ₂	0.12	0.03	0.152	0.003
Al ₂ O ₃	68.98	0.42		
Cr ₂ O ₃	0.67	0.09	0.55	0.07
V ₂ O ₃	0.39	0.05	0.53	0.04
Fe ₂ O ₃ ²	0.21	0.04	0.016	0.001
MnO	0.01	0.01		
MgO	28.70	0.15		
CaO	0.06	0.04		
SrO	0.01	0.01		
BaO	0.03	0.04		
Na ₂ O	0.01	0.01		
K ₂ O	0.01	0.00		
NiO	0.19	0.07		
CuO	0.01	0.01		
ZnO	0.12	0.05	0.034	0.004
P ₂ O ₅	0.01	0.01		
F	0.01	0.02		
Cl	0.00	0.00		
Sum	99.71			

จากงานวิจัยของ Saeseaw et al. (2009) พบว่าสปิเนลสีแดงจากประเทศเมียนมาร์มีสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR มีค่า 390 และ 537 เป็นผลมาจากธาตุมลทิน Cr³⁺ แต่หากนำหาคำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาจะทำให้ขยับขึ้นจาก 537 เป็น 544



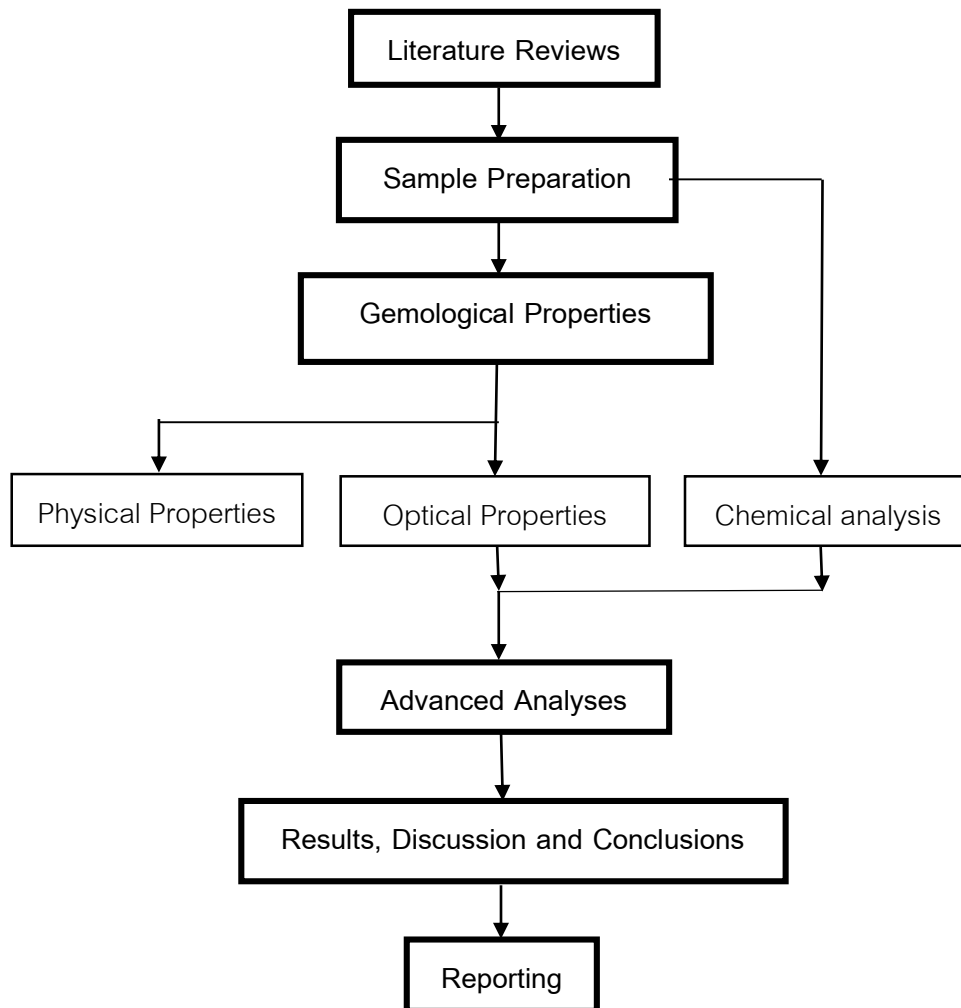
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง UV-VIS-NIR (Saeseaw, 2009)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย สามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามแผนผังขั้นตอนการศึกษาในรูป 3.1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

3.1.1. รวบรวมและศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวบรวมข้อมูลและศึกษารายงาน เอกสารและงานวิจัยเก่าที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของพลอย สปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ และแหล่งอื่นๆของโลก เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นและ เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลสรุปที่น่าเชื่อถือและผิดพลาดน้อยที่สุด

3.1.2. วางแผนการดำเนินงาน คัดเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างพลอยให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วย เครื่องมือขั้นพื้นฐานและเครื่องมือขั้นสูง

ตัวอย่างสปิเนลสีแดง ที่ใช้ศึกษาเป็นตัวอย่างสปิเนลจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ ซึ่งเป็นพลอยใน โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ. หรือ GIT) จำนวนทั้งหมด 30 ตัวอย่าง และ สปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย ซึ่งเป็นพลอยในโครงการวิจัยของ สถาบันอัญมณีศาสตร์แห่งเอเชีย หรือ AIGS จำนวนทั้งหมด 13 ตัวอย่าง ซึ่งสปิเนลจากทั้ง 2 แหล่งมีลักษณะคือ เป็นสีแดงและคุณภาพที่ตีรอยแตกน้อยเหมาะแก่การศึกษาวิจัย

3.1.3 ตรวจสอบสมบัติพื้นฐานทางอัญมณี

1 ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ ด้วยเครื่อง Hydrostatic Balance, UV lamp, Refractometer, Gemological Microscope และ Laser Raman Spectroscopy

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

3 ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ของสปิเนลโดยวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก และธาตุองค์ประกอบรองด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer และ Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) และวัดปริมาณธาตุที่มีน้อยมากๆหรือธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (LA-ICP-MS)

3.1.4. วิเคราะห์และแปลความหมาย

นำข้อมูลจากการศึกษาในแต่ละขั้นตอนมาทำการแปลความหมายข้อมูลและวิเคราะห์ผลเพื่อศึกษา ลักษณะเฉพาะของสปีเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ และเปรียบเทียบกับสปีเนลสีแดงจาก ประเทศแทนซาเนีย

3.1.5 สรุปและนำเสนอโครงการวิจัย

สรุปผลการวิเคราะห์ นำเสนอในรูปแบบสัมมนาและจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์

3.2.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Physical properties) ประกอบด้วย

Refractometer

ใช้วัดค่าดัชนีหักเหของแสง



รูปที่ 3.2 Refractometer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Hydrostatic Balance ใช้ชั่งน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะของอัญมณี



รูปที่ 3.3 Hydrostatic Balance จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

3.2.2 ศึกษาลักษณะทางแสง (Optical properties) ประกอบด้วย

กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope)

เครื่องมือที่ใช้ศึกษาลักษณะผิวภายนอกและลักษณะมลทินภายในอัญมณี



รูปที่ 3.4 Gemological microscope จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับ
แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

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

เครื่องมือที่ใช้วัดการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นย่าน Ultraviolet (UV), Visible (VIS) และ Near Infrared (NIR) เมื่อตกกระทบตัวอย่างทดสอบ ใช้ในการศึกษาสาเหตุการเกิดสีในอัญมณีและธาตุร่องรอยบางชนิด อาจบ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดอัญมณีบางประเภทได้

โดยใช้ Perkin Elmer Precisely และ Lambda950 เป็นเครื่องตรวจจับและดูการดูดกลืนในช่วงคลื่นตั้งแต่ 250-1500 นาโนเมตร



รูปที่ 3.5 เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Laser Raman Spectroscopy

เครื่องมือที่ใช้ศึกษาชนิดมลทินแร่ในอัญมณีได้โดยอาศัยผลจากปรากฏการณ์ Raman Shift จากการ stretching หรือ bending ซึ่งเป็นปรากฏการณ์กระเจิงของแสงเมื่ออะตอมหรือโมเลกุลในโครงสร้างอัญมณีได้รับพลังงานจากแสงเลเซอร์ ทำให้อะตอมหรือโมเลกุล เกิดการสั่น มีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่ของแสงตกกระทบเดิม เรียกว่า การเลื่อนตัวของรามาน (Raman Shift) โดยอัญมณีและมลทินแร่แต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลื่อนตัวของรามานแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของโครงสร้างของโมเลกุล

โดยเลือกดู Raman Shift ที่ 200-1500

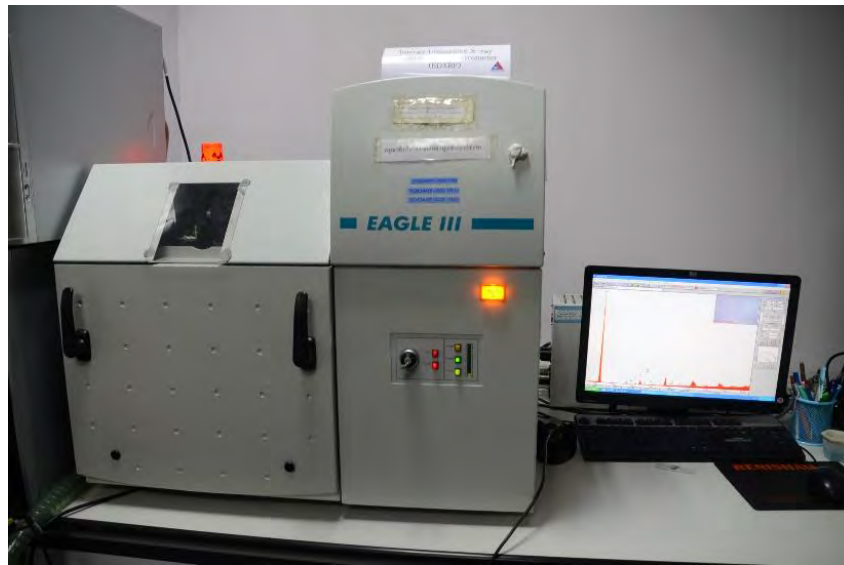


รูปที่ 3.6 เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Ranishaw จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

3.3.3 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis)

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer

เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียม หลักการคือให้รังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปกระตุ้นตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนวงนอกถัดมาจะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ



รูปที่ 3.7 เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)

เครื่องมือใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ถึงระดับไมโครเมตร (micro-analysis) หลักการคือยิงลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง จะทำให้องค์ประกอบภายในตัวอย่างปล่อยอิเล็กตรอนและรังสีเอ็กซ์เรย์ในลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบในตัวอย่าง

โดยมีธาตุที่วิเคราะห์ คือ Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 , FeO , MnO , TiO_2 , SiO_2 , CaO และ ZnO



รูปที่ 3.8 เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100

จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

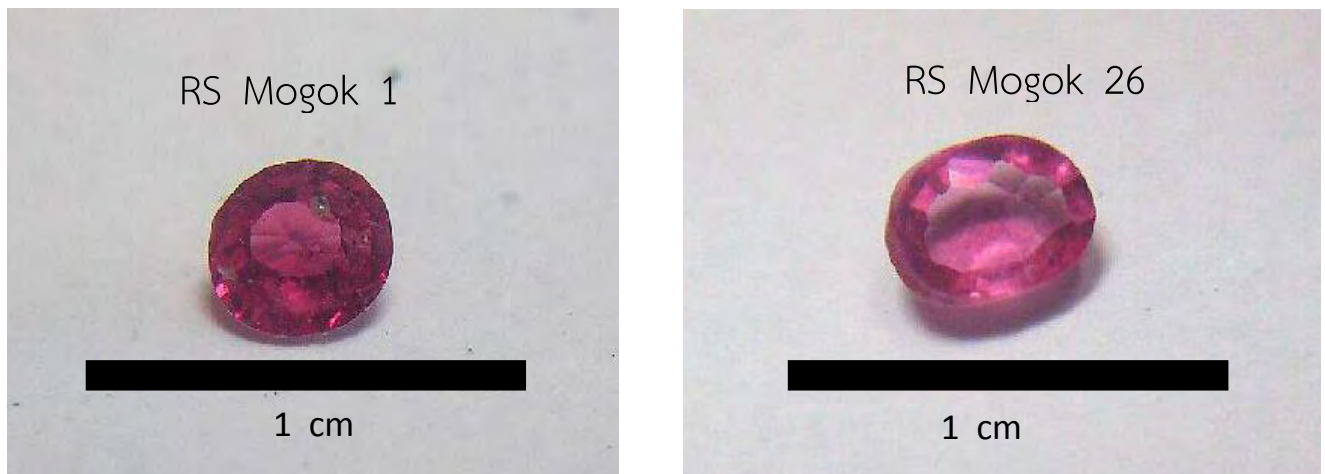
บทที่ 4

ผลการทดลอง วิเคราะห์และอภิปรายผล

4.1 ลักษณะทั่วไป

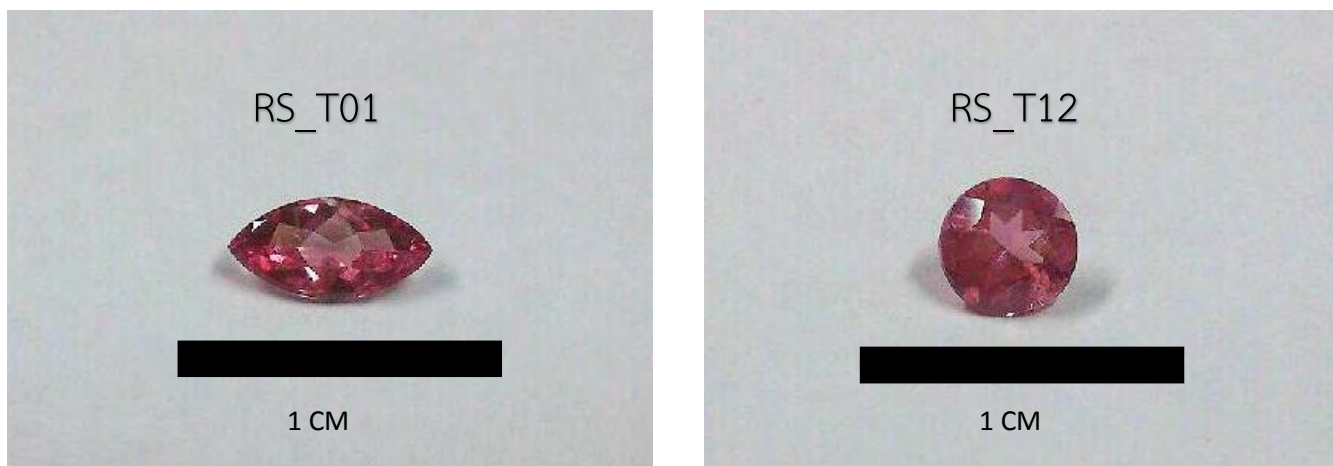
ตัวอย่างสปิเนลสีแดงที่นำมาศึกษานั้นเป็นตัวอย่างสปิเนลจากแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์ ซึ่งเป็นพลอยในโครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ. หรือ GIT) จำนวนทั้งหมด 30 ตัวอย่าง มีลักษณะสีแดงสด โปร่งใส คุณภาพดี ผ่านการเจียรระไนแล้วและสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย ซึ่งเป็นพลอยในโครงการวิจัยของสถาบันอัญมณีศาสตร์แห่งเอเชีย (AIGS) จำนวนทั้งหมด 13 ตัวอย่าง มีลักษณะสีแดงสด โปร่งใส คุณภาพดี ผ่านการเจียรระไนแล้ว การศึกษาครั้งนี้จะนำสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์ มาศึกษามลทินภายในเนื้อพลอย วัดการดูดกลืนช่วงแสงโดย UV-Vis-NIR และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดย EDXRF และ EPMA ส่วนสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนียนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดย EDXRF และ EPMA แต่ไม่ได้วัดการดูดกลืนช่วงแสงโดย UV-Vis-NIR และศึกษามลทินภายในเนื้อพลอย เนื่องจากติดปัญหาด้านเวลาในการให้ยืมตัวอย่างของ AIGS

ตัวแทนกลุ่มตัวอย่างสปิเนลจากแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์

และตัวแทนกลุ่มตัวอย่างสปิเนลจากประเทศแทนซาเนียแสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โดยรูปตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย

ตัวอย่างสปิเนลทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทางอัญมณีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ ดังสรุปไว้ในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 สรุปข้อสมบัติทางกายภาพของสปิเนลสีแดงแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์เปรียบเทียบกับ ตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย

sample	Transparency	Weight (ct.)	RI
Mogok	Transparent	0.064-0.23	1.718-1.722
Tanzania	Transparent	0.33-0.56	1.719-1.721

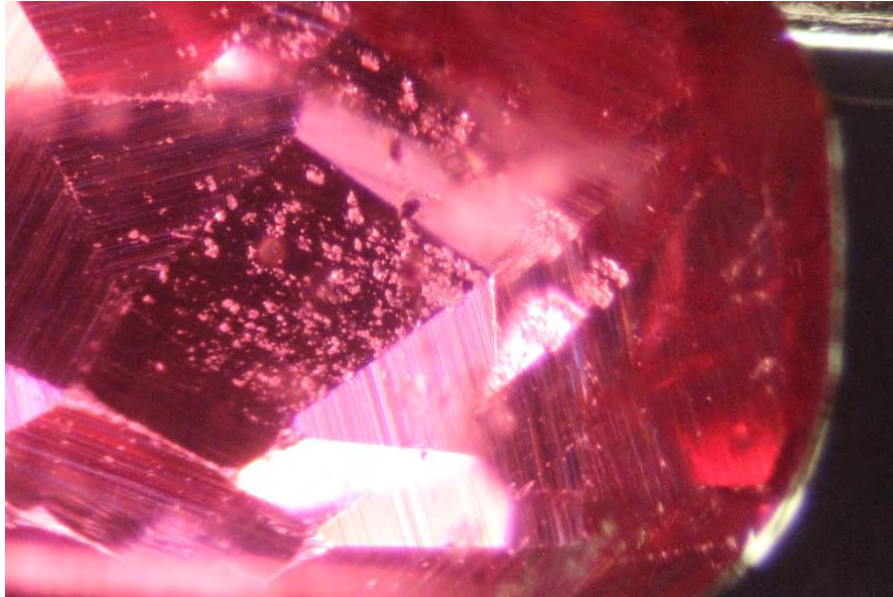
4.2 มลทินภายในใต้กล้องจุลทรรศน์

การศึกษามลทินเนื้อในภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี ในตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกอก ประเทศเมียนมาร์มีลักษณะโปร่งใส มีความสะอาดมาก และมีปริมาณมลทินน้อย มลทินที่พบส่วนใหญ่ เป็น มลทินผลึกแร่ (mineral inclusion)

สำหรับมลทินผลึกแร่ที่ปรากฏบริเวณใกล้ผิวอัญมณี จะถูกนำไปวิเคราะห์ชนิดของแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

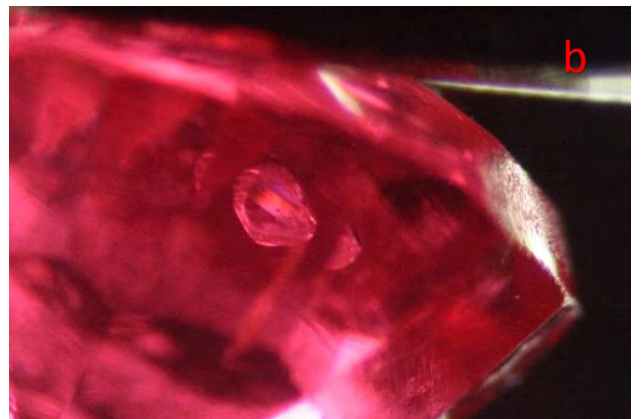
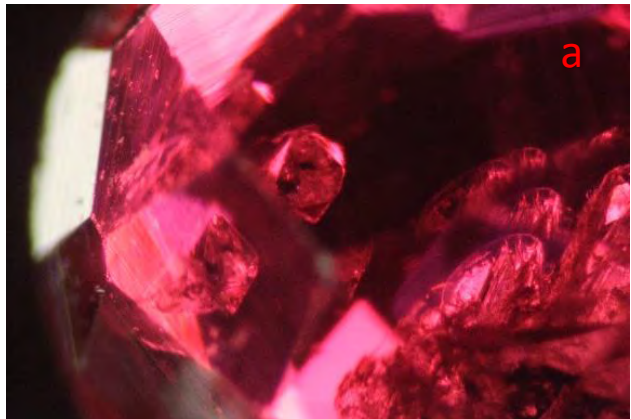
มลทินที่พบในสปinelสีแดง แหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ประกอบด้วย

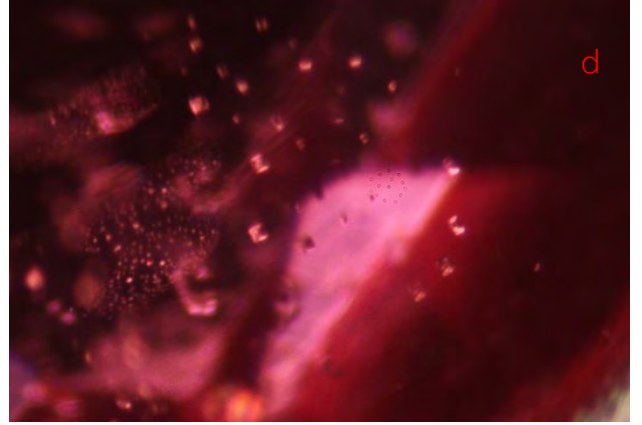
กลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็ก (Micro Crystals) พบแสดงลักษณะของกลุ่มมลทินผลึกใสขนาดเล็กไม่สามารถที่จะระบุชนิดของมลทินแร่ได้ว่าเป็นแร่ชนิดใด (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 มลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็ก (RS_Mogok_11)

มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal) เป็นมลทินที่เกิดจากการเย็นตัวตามผลึก เกิดช่องว่างในเม็ดแร่ตามลักษณะผลึก (รูปที่ 4.4)

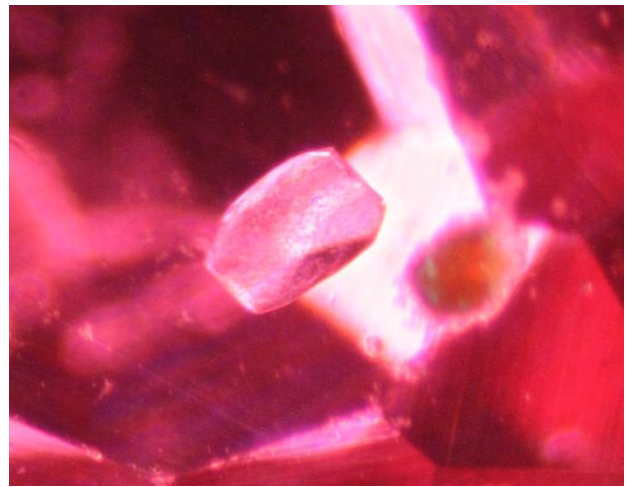
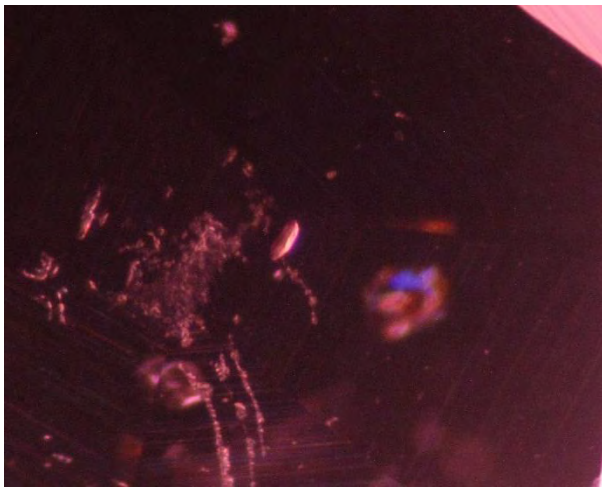




รูปที่ 4.4 มลทินผลึกเนกาทีฟ ของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์

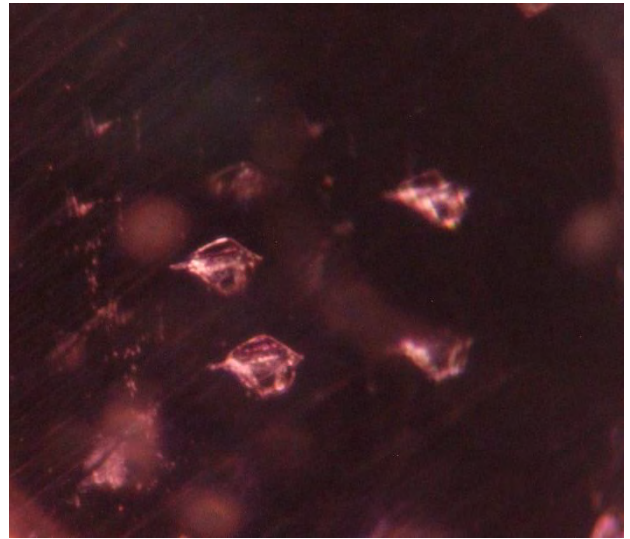
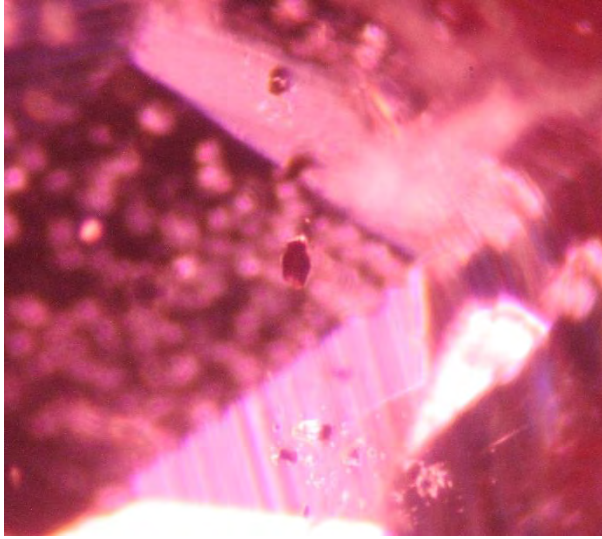
a) มลทินผลึกเนกาทีฟ (RS_Mogok_5) b) มลทินผลึกเนกาทีฟ (RS_Mogok_18) c) มลทินผลึกเนกาทีฟ (RS_Mogok_20) d) มลทินผลึกเนกาทีฟ (RS_Mogok_1)

มลทินแร่ ที่พบในแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ ประกอบด้วย มลทินผลึกใสเดี่ยว ผลึกลักษณะแท่ง ผลึกรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (รูปที่ 4.5) เมื่อวิเคราะห์มลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy ทำให้ทราบว่า มลทินผลึกแร่ที่พบมากในสปิเนลสีแดงแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ ได้แก่ อะพาไทต์ (apatite) แคลไซต์ (calcite) และโดโลไมต์ (dolomite) (รูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8)



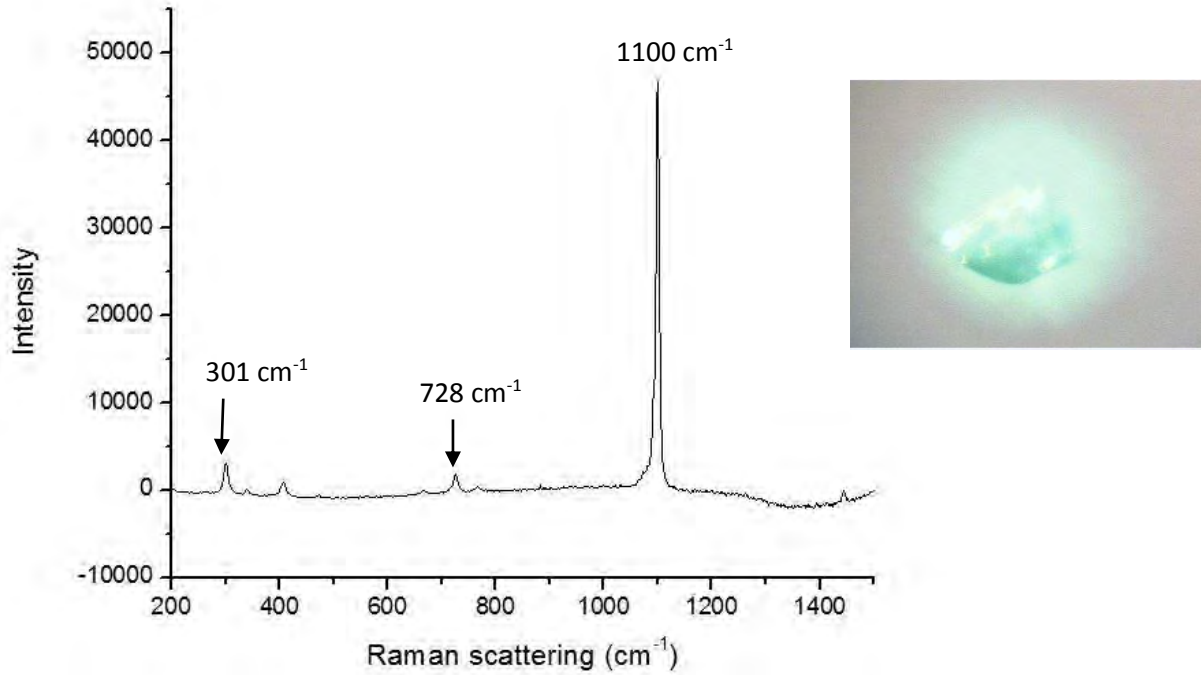
รูปที่ 4.5 มลทินผลึกชนิดแร่ต่างๆใน ตัวอย่างสปิเนลจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์

a) มลทินผลึกใสของแร่อะพาไทต์ (RS_Mogok_1) b) มลทินผลึกของแร่แคลไซต์ (RS_Mogok_18)

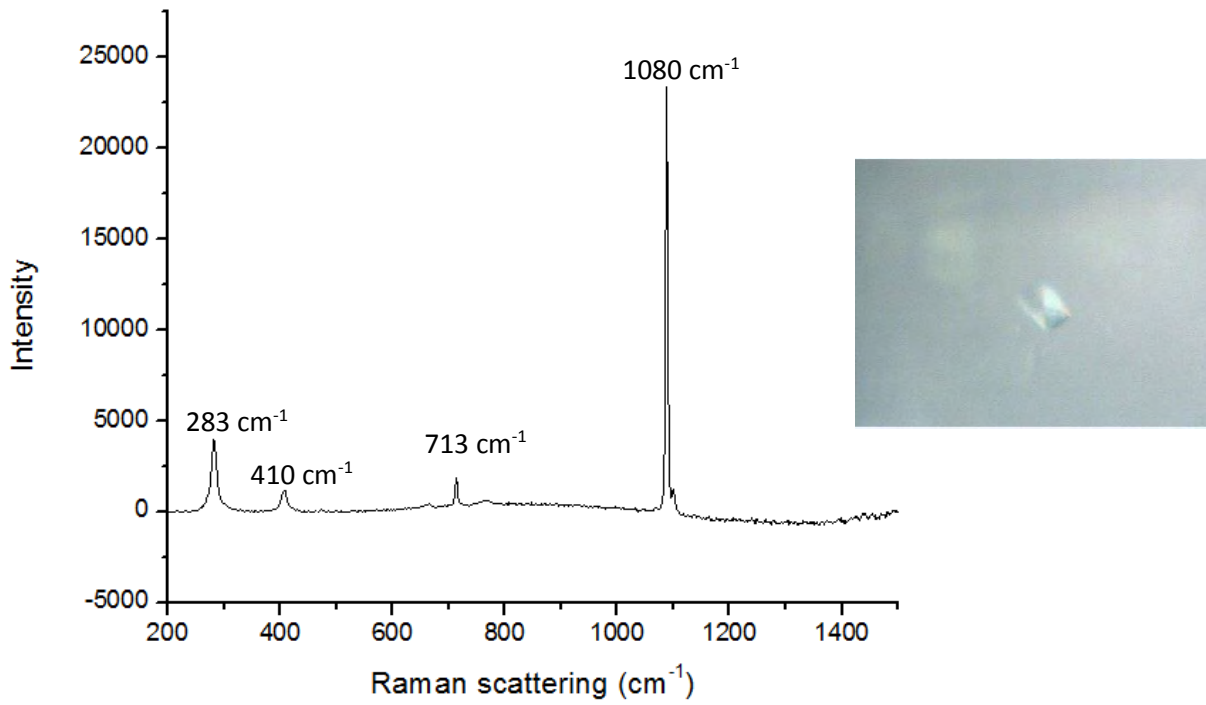


รูปที่ 4.6 มลทินผลึกชนิดแร่ต่างๆใน ตัวอย่างสปีเนลจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์
a)มลทินผลึกของแร่โอพาไทท์ (RS_Mogok_11) b)มลทินผลึกของแร่โอพาไทท์ (RS_Mogok_8)

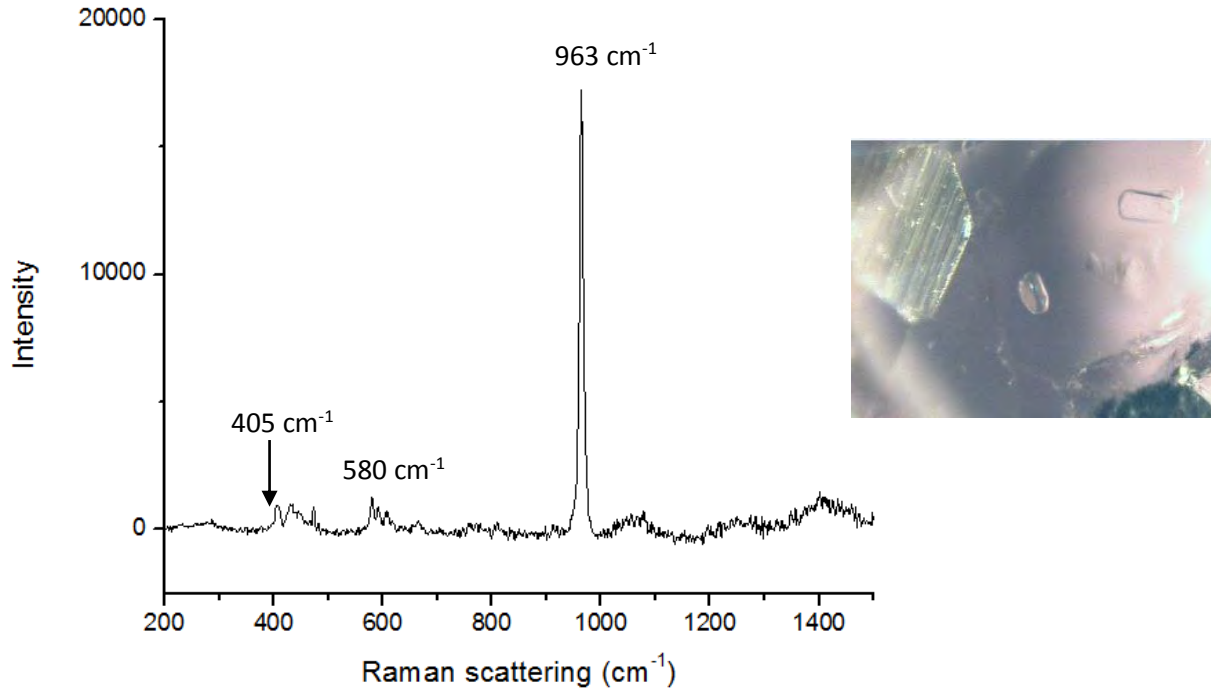
มลทินผลึกแร่จากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy



รูปที่ 4.7 Raman Spectrumของมลทินแร่โดโลไมท์ (dolomite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_8



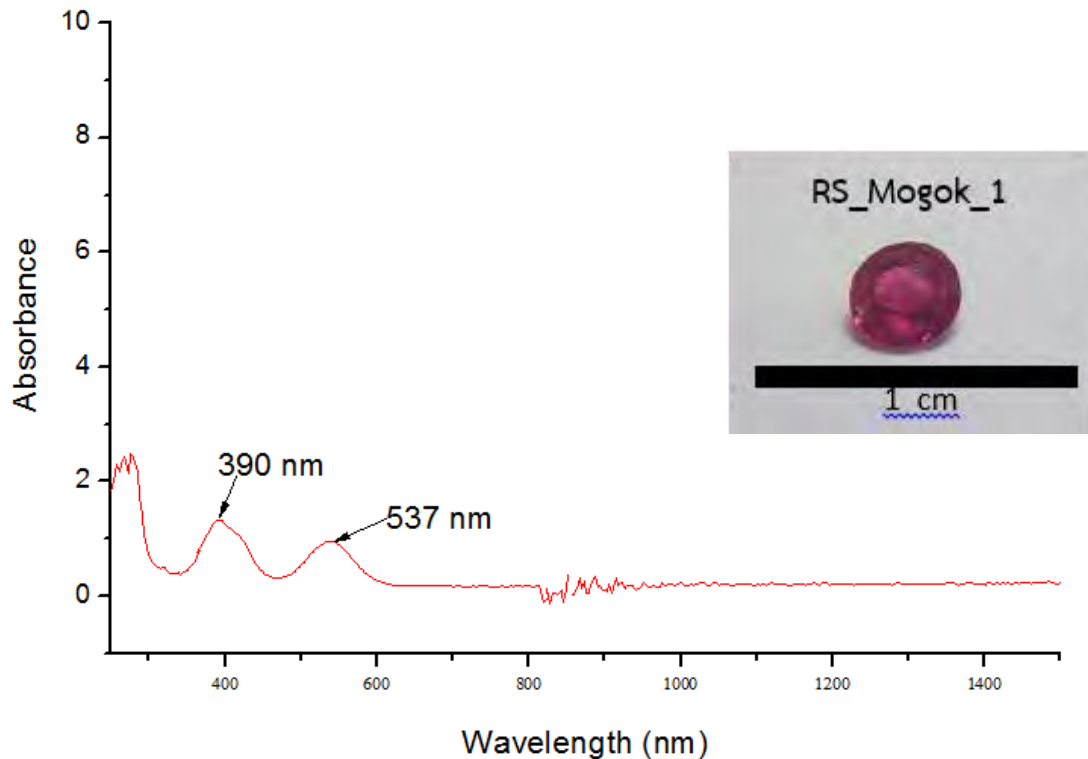
รูปที่ 4.8 Raman Spectrum ของมลทินแร่แคลไซต์ (calcite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_16



รูปที่ 4.9 Raman Spectrum ของมลทินแร่อะพาไทต์ (apatite) ของตัวอย่าง RS_Mogok_20

4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR

ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากแหล่งโหมก ประเทศเมียนมาร์ดังแสดงในรูป 4.10 และสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ค โดยตัวอย่างทั้งหมดแสดงรูปแบบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันด้วยยอดการดูดกลืนที่ 390 ± 3 และ 537 ± 3 nm เป็นผลมาจากธาตุมลทิน Cr^{3+} และการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงดังกล่าวของ Cr^{3+} มีผลให้สปิเนลเกิดสีแดง โดยจากงานวิจัยของ Saeseaw et al. (2009) พบว่ายอดการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 537 nm ส่งผลต่อความเข้มของสีแดงของตัวอย่างสปิเนล



รูปที่ 4.10 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์(RS_Mogok_1)

4.4. องค์ประกอบทางเคมี

ผลวิเคราะห์โดย EDXRF แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสปิเนลสีแดง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ Al_2O_3 และ MgO และองค์ประกอบของธาตุร่องรอยในตัวอย่างหลายชนิด จากการศึกษาได้เลือกวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ รูปแบบองค์ประกอบออกไซด์ที่มักพบบ่อยในสปิเนล ซึ่งธาตุบางธาตุเป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดสี

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ และสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย พบว่ามีธาตุองค์ประกอบหลักเหมือนกันคือ Al_2O_3 และ MgO ส่วนธาตุร่องรอยของแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ ที่มีค่าจากมากไปน้อยเรียงตามลำดับดังนี้ Cr_2O_3 , Fe_2O_3 และ ZnO โดยพบ V_2O_5 และ Ga_2O_3 พบในปริมาณน้อยมาก ส่วนธาตุร่องรอยอื่นๆของสปิเนลจากประเทศแทนซาเนียที่มีค่ามากคือ ZnO , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , V_2O_5 และ Ga_2O_3 ในปริมาณน้อยลงมาตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.2 และผลวิเคราะห์ทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก จ

ตาราง 4.2 ตารางเปรียบเทียบผลวิเคราะห์เคมีของสปิเนลสีแดงแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ กับสปิเนลสีแดงประเทศแทนซาเนียโดยเครื่องมือ EDXRF

Element	Mogok	Tanzania
Al ₂ O ₃	69.74–73.4 (72.58±0.53)	72.17–73.41 (72.79±0.38)
MgO	25.02–27.2 (25.74±0.39)	24.88–26.03 (25.51±0.39)
Cr ₂ O ₃	0.67–2.42 (1.13±0.46)	0.18–0.40 (0.29±0.06)
Fe ₂ O ₃	0.03–0.25 (0.11±0.06)	0.16–0.29 (0.21±0.05)
ZnO	0.02–0.76 (0.3±0.24)	0.59–1.64 (1.06±0.32)
V ₂ O ₅	0.02–0.23 (0.11±0.07)	0.06–0.14 (0.1±0.03)
Ga ₂ O ₃	0.01–0.06 (0.03±0.02)	0.03–0.05 (0.04±0)

โดยสรุปพบว่าตัวอย่างสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ที่นำมาวิเคราะห์ทางเคมีมีปริมาณธาตุ Cr₂O₃ ที่สูงกว่าสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย แต่มีปริมาณธาตุ ZnO และ Fe₂O₃ ที่ต่ำกว่าสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย ส่วนปริมาณ V₂O₅ และ Ga₂O₃ ของจากทั้งสองแหล่งมีปริมาณต่ำมาก

ผลวิเคราะห์โดย EPMA แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ มีปริมาณธาตุ Cr₂O₃ ที่สูงกว่าสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนียอย่างชัดเจน แต่มีปริมาณธาตุ ZnO ที่ต่ำกว่าสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย ส่วนธาตุร่องรอยอื่นๆ พบในปริมาณน้อยมาก ซึ่งผลวิเคราะห์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลวิเคราะห์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF โดยตัวแทนผลวิเคราะห์ EPMA ได้สรุปในตาราง 4.3 และ 4.4 ซึ่งผลวิเคราะห์ทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ง

ตาราง 4.3 ตัวแทนผลวิเคราะห์ทางเคมีของสปิเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ โดยเครื่องมือ EPMA

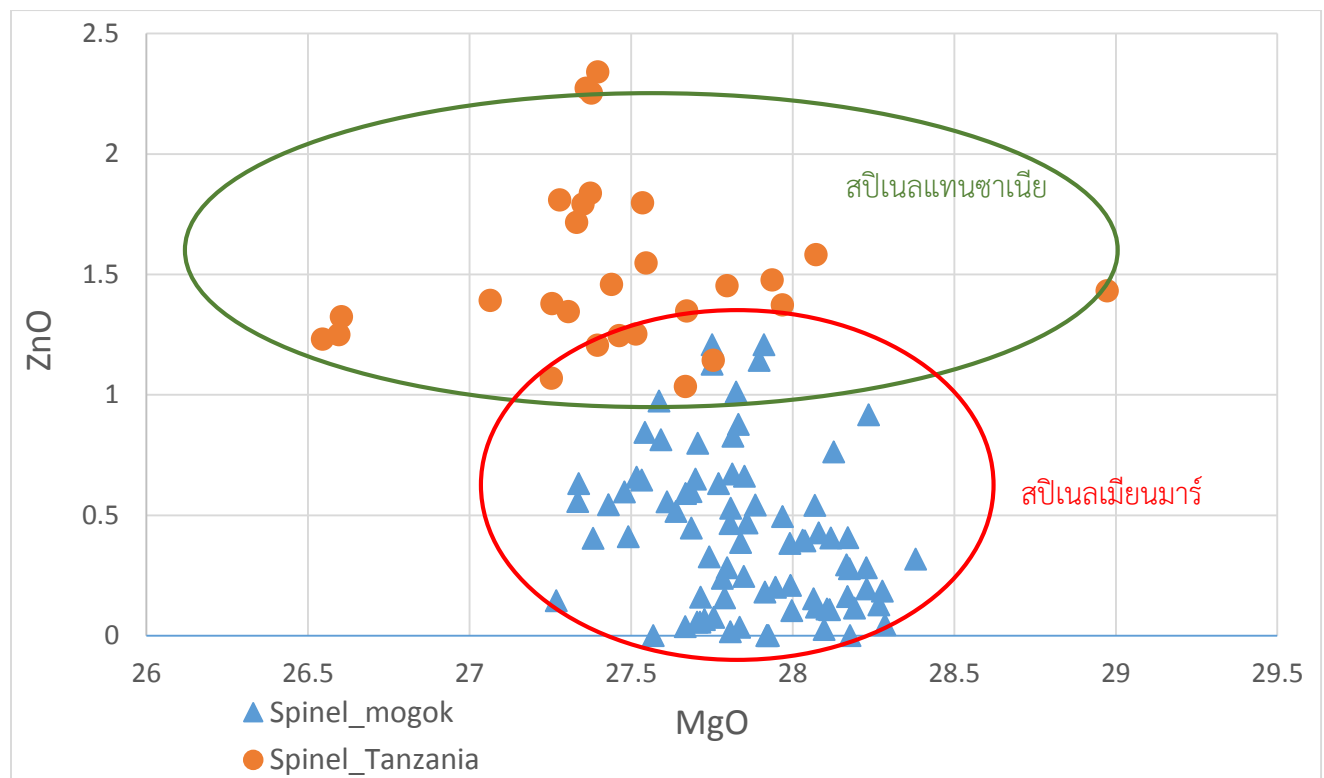
cement	RS_M1- 1	RS_M1- 2	RS_M1- 3	RS_M2- 1	RS_M2- 2	RS_M2- 3	RS_M3- 1	RS_M3- 3	RS_M4- 1	RS_M4- 2
SiO ₂	0.03	0.01	0.06	0.00	0.03	0.04	0.01	0.03	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	69.63	69.69	69.48	70.99	71.13	70.64	70.93	71.15	69.96	69.77
TiO ₂	0.02	0.00	0.03	0.13	0.19	0.08	0.07	0.11	0.05	0.07
Cr ₂ O ₃	2.30	2.13	2.00	0.98	0.75	0.87	0.86	1.02	2.02	2.08
FeO	0.03	0.06	0.04	0.06	0.02	0.05	0.17	0.14	0.16	0.13
MnO	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.02
MgO	27.64	27.81	28.13	28.29	28.18	27.81	28.17	27.99	28.07	28.18
CaO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	0.52	0.67	0.76	0.05	0.00	0.02	0.41	0.38	0.12	0.28
Total	100.16	100.43	100.50	100.51	100.30	99.53	100.62	100.86	100.39	100.52
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Al	1.960	1.958	1.951	1.979	1.984	1.987	1.979	1.981	1.961	1.955
Ti	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Cr	0.043	0.040	0.038	0.018	0.014	0.016	0.016	0.019	0.038	0.039
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.983	0.988	0.999	0.997	0.994	0.989	0.994	0.985	0.995	0.998
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.009	0.012	0.013	0.001	0.000	0.000	0.007	0.007	0.002	0.005
Total	2.997	3.001	3.004	2.999	2.997	2.996	3.001	2.997	3.000	3.002

ตาราง 4.4 ตัวแทนผลวิเคราะห์ทางเคมีของสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย โดยเครื่องมือ EPMA

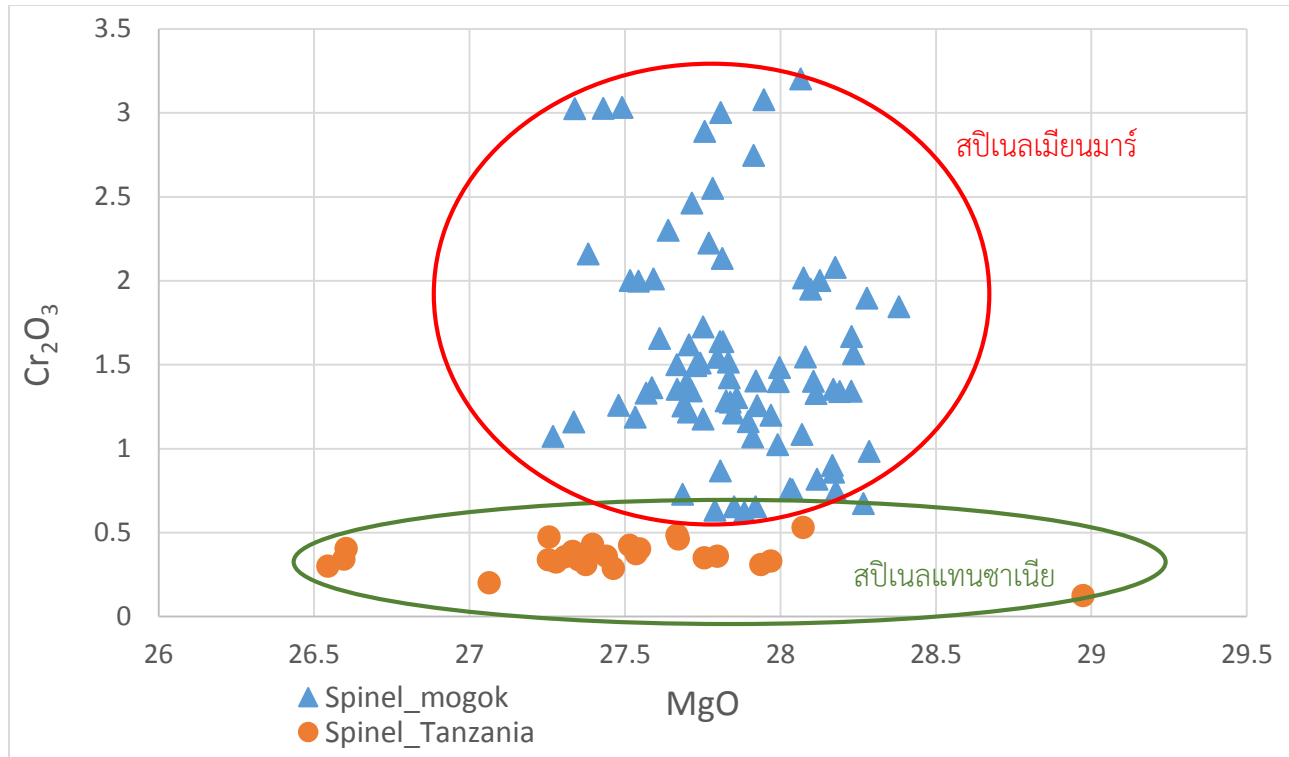
cement	RS_T1- 2	RS_T1- 3	RS_T2- 1	RS_T2- 2	RS_T2- 3	RS_T3- 1	RS_T3- 2	RS_T4- 1	RS_T4- 2	RS_T4-3
SiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Al ₂ O ₃	71.28	71.54	71.75	71.79	71.36	70.83	71.14	70.98	70.13	70.19
TiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.29	0.34	0.43	0.48	0.36	0.36	0.20	0.31	0.34	0.33
FeO	0.27	0.27	0.12	0.18	0.16	0.23	0.22	0.24	0.23	0.23
MnO	0.00	0.01	0.00	0.07	0.01	0.03	0.06	0.01	0.00	0.00
MgO	27.46	27.25	27.40	27.26	27.31	27.44	27.06	27.37	27.35	27.28
CaO	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	1.25	1.07	1.21	1.38	1.35	1.46	1.39	1.84	1.79	1.81
Total	100.56	100.50	100.92	101.16	100.54	100.35	100.08	100.75	99.84	99.84
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.995	2.001	1.999	1.999	1.998	1.990	2.001	1.989	1.984	1.986
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.005	0.006	0.008	0.009	0.007	0.007	0.004	0.006	0.006	0.006
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.005	0.005	0.002	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.972	0.964	0.965	0.959	0.966	0.974	0.962	0.970	0.978	0.976
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.022	0.019	0.021	0.024	0.024	0.026	0.025	0.032	0.032	0.032
Total	3.000	2.996	2.996	2.996	2.998	3.002	2.998	3.002	3.005	3.004

4.5 อธิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีโดยเครื่อง EPMA พบว่าสปิเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์มีธาตุโครเมียมที่สูง ส่วนสปิเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนียมีธาตุสังกะสีที่สูง เมื่อนำปริมาณสังกะสีและปริมาณโครเมียมจากสปิเนลทั้ง 2 แหล่ง มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์กับแมกนีเซียมดังรูป 4.11 และรูป 4.12 เมื่อสังเกตภายในวงกลมสีเขียวแทนตัวอย่างจากประเทศแทนซาเนียและภายในวงกลมสีแดงแทนตัวอย่างจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์ จะพบว่าสามารถแยกสปิเนลจากทั้ง 2 แหล่งออกจากกันอย่างชัดเจน

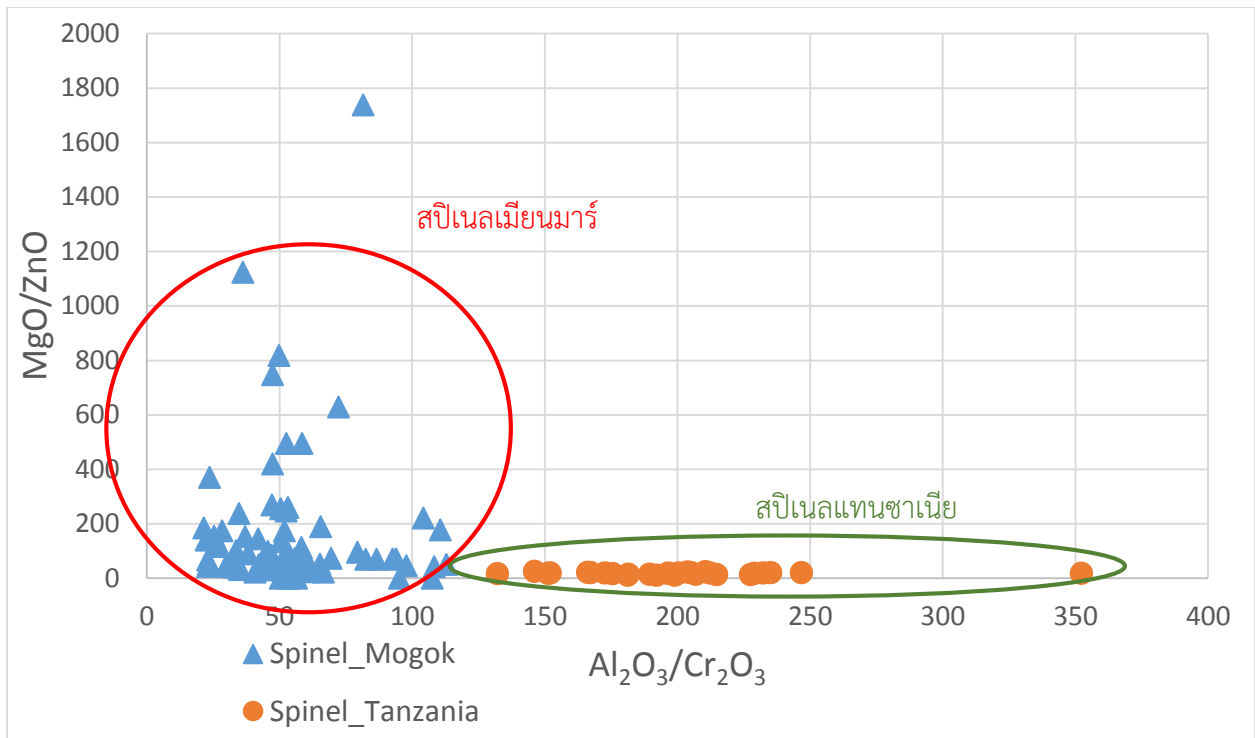


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลวิเคราะห์สังกะสีกับแมกนีเซียม



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลวิเคราะห์โครเมียมกับแมกนีเซียม

จากสูตรโครงสร้างทำให้ทราบว่า ZnO เข้าไปแทนที่ MgO ในโครงสร้างของสปิเนลและ Cr₂O₃ เข้าไปแทนที่ Al₂O₃ ในโครงสร้างของสปิเนล เมื่อนำอัตราส่วนของ MgO/ZnO มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของ Cr₂O₃/Al₂O₃ จะพบว่าสามารถแยกสปิเนลจากทั้ง 2 แหล่งออกจากกันอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลวิเคราะห์ MgO/ZnO กับ Al_2O_3/Cr_2O_3

บทที่ 5

สรุป

จากตัวอย่างสปีเนลสีแดงทั้งหมดจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์จำนวน 30 ตัวอย่างและสปีเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนียจำนวน 13 ตัวอย่าง มีลักษณะสีแดงสด โปร่งใส คุณภาพดี ผ่านการเจียรไนแล้ว

ตัวอย่างสปีเนลทั้ง 2 แหล่งมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงอยู่ในช่วงปกติของสปีเนลทั่วไปคือ ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ 1.718-1.722

มลทินเนื้อในที่พบมากในตัวอย่างสปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ ได้แก่ มลทินผลึกแร่ และจากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของมลทินผลึกแร่โดยเครื่อง Raman Spectroscopy พบผลึกแร่ ไดโลไมท์ ผลึกแร่แคลไซต์ และผลึกแร่อพาไทท์ นอกจากนี้ยังพบมลทินแร่ขนาดไมโคร (Micro Cystals) และมลทินคริสตัลเชิงลบ (negative crystal) ในตัวอย่างสปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis-NIR แสดงยอดการดูดกลืน Cr^{3+} มีความยาวคลื่น 390 และ 537 nm ซึ่งยอดการดูดกลืน Cr^{3+} ส่งผลให้สปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์มีสีแดงสด

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์และสปีเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเหมือนกันคือ Al_2O_3 และ MgO ส่วนธาตุร่องรอยของแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ ที่มีค่ามากรองลงมาคือ Cr_2O_3 , Fe_2O_3 และ ZnO ธาตุร่องรอยอื่นๆ คือ V_2O_5 และ Ga_2O_3 พบในปริมาณน้อยลงมาตามลำดับ ส่วนธาตุร่องรอยของประเทศแทนซาเนียที่มีค่ามากรองลงมาคือ ZnO , Fe_2O_3 และ Cr_2O_3 ธาตุร่องรอยอื่นๆ คือ V_2O_5 และ Ga_2O_3 พบในปริมาณน้อยลงมาตามลำดับ

จากผลการศึกษาทำให้ทราบว่าสปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ พบมลทินเนื้อในที่สามารถบอกได้ว่าหินเหย้า (host rock) เป็นหินคาร์บอนेटได้แก่ ผลึกแร่ไดโลไมท์ ผลึกแร่แคลไซต์ และผลึกแร่อพาไทท์ นอกจากนี้สปีเนลสีแดงจากแหล่งโม่กก ประเทศเมียนมาร์ ยังมีลักษณะเฉพาะทางเคมี คือมีธาตุโครเมียมสูง แตกต่างกับสปีเนลจากประเทศแทนซาเนียที่มีธาตุสังกะสีสูง

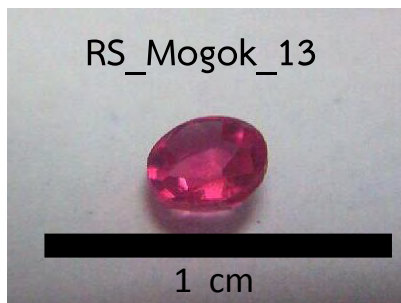
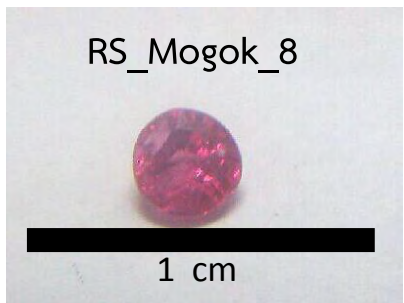
จากผลวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าลักษณะเฉพาะของอัญมณีในแต่ละแหล่งสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกแหล่งที่มาของอัญมณีที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่ชัดได้

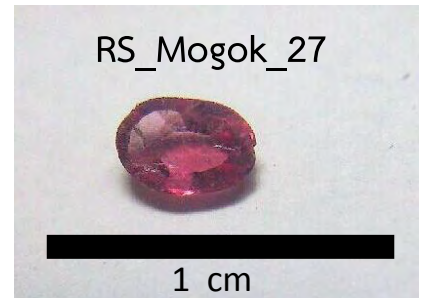
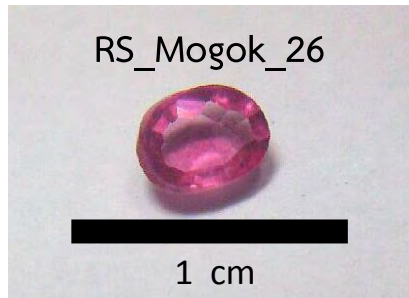
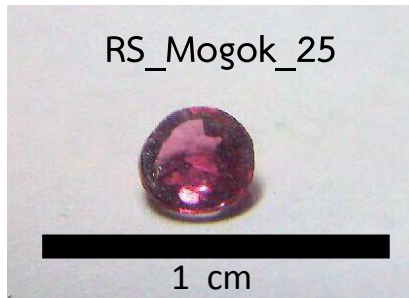
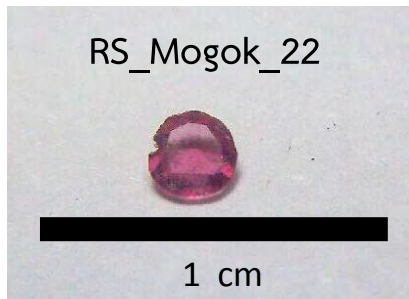
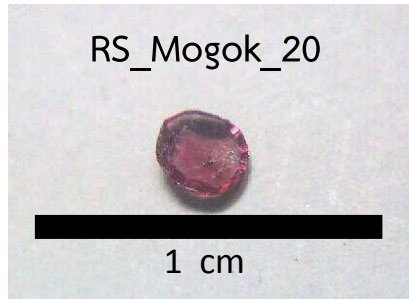
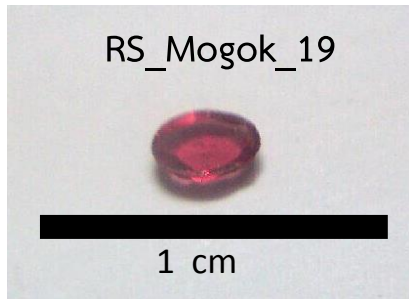
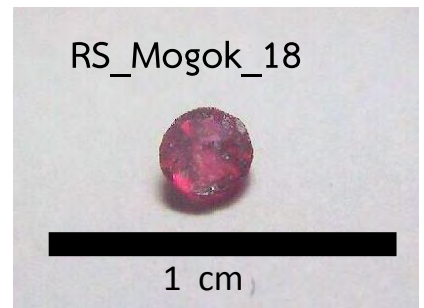
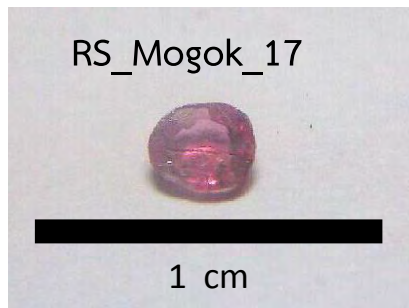
เอกสารอ้างอิง

- นิตยา สุขชี, ลักษณะเฉพาะทางอัญมณีของแซปไฟร์จากประเทศรวันดา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2015
- Widmer, R., 2014. Effects of heat treatment on red gemstone spinel: single-crystal X-ray, Raman,
and photoluminescence study. Phys Chem Minerals, p.251-260
- John, L. Emmett and Troy R. Douthit, 2009. Distinguishing Heated Spinel from Unheated Natural
Spinel and from Synthetic Spinel. GIA Laboratories, Bangkok and New York
- Bertrand, G., Rangin, C., Maluski, H. The GIAC Scientific Party, 2001. Diachronous cooling along
the Mogok Metamorphic Belt (Shan Scarp, Myanmar): the trace of the northward
migration of the Indian syntaxis. Journal of Asia Earth Sciences 19, 649-659
- Iyer, L.A.N., 1953. The geology and gem-stones of the Mogok Stone Tract, Burma.
- Chhibber, H.L., 1934. The Geology of Burma. Macmillan, London, p.538.
- Saul, M. J., 2015. A Geologist Speculates. Les 3 Colonnes, A Geologist Speculates, p.13-21
- Searle, D.L., Ba Than Haq, 1964. The Mogok belt of Burma and its relation to the Himalayan
orogeny. In: Proceedings of the 22nd International Geological Conference, vol. 11. Delhi,
pp.132-161.
- Searle, M., Noble, S., Cottle, J., Waters, D., Mitchell, A., Hlaing, T. and Horstwood, M., 2007.
Tectonic evolution of the Mogok metamorphic belt, Burma (Myanmar) constrained by U-
Th-Pb dating of metamorphic and magmatic rocks. Tectonics, 26(3), p.1-24.

ภาคผนวก ก

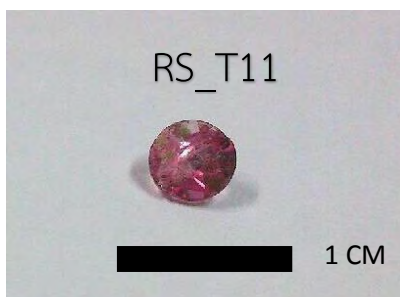
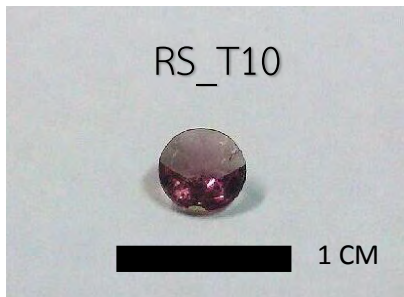
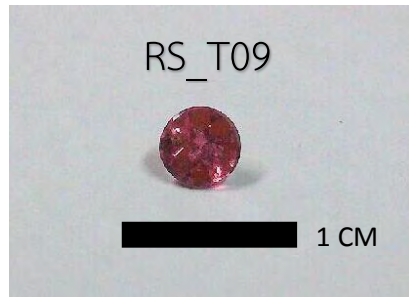
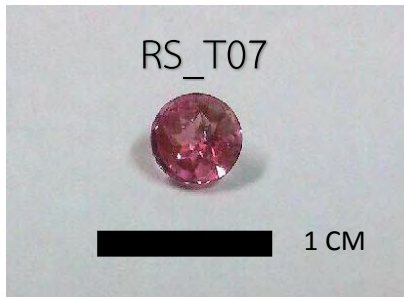
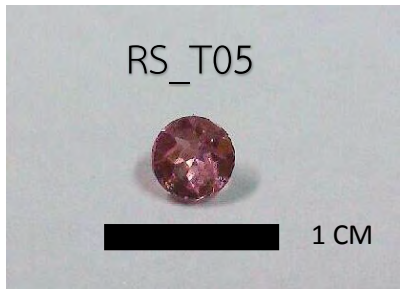
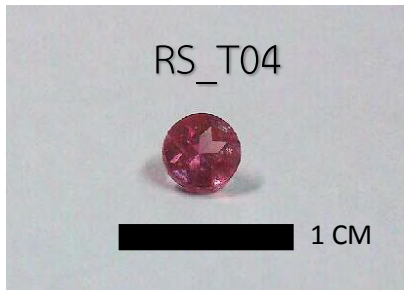
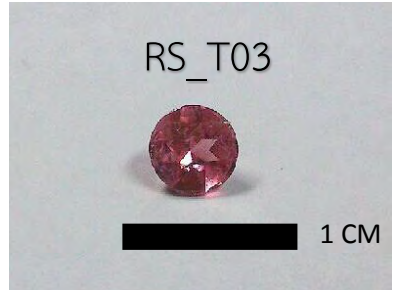
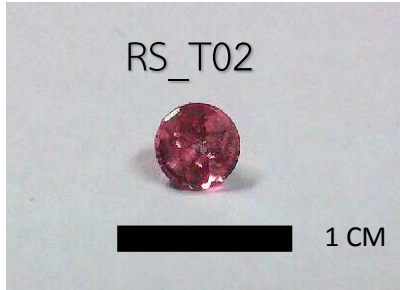
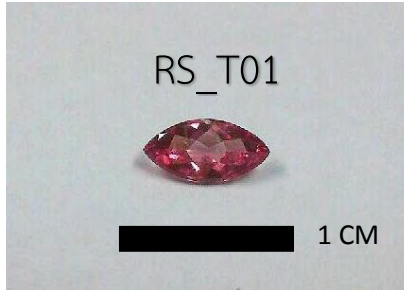
ภาพถ่ายอย่างสปีเนลสีแดงจากแหล่งโมกก ประเทศเมียนมาร์





ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายอย่างสีเนลสีแดงจากประเทศแทนซาเนีย



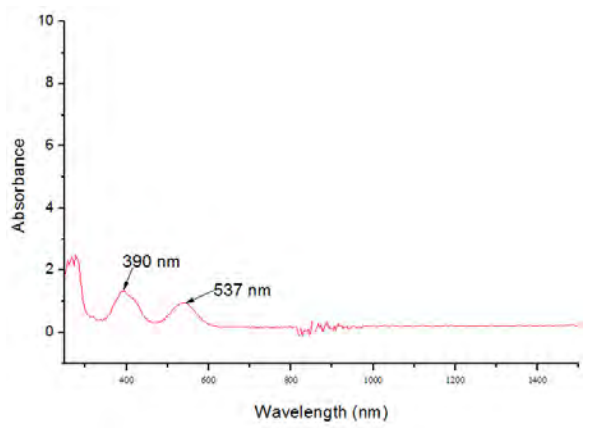
RS_T13



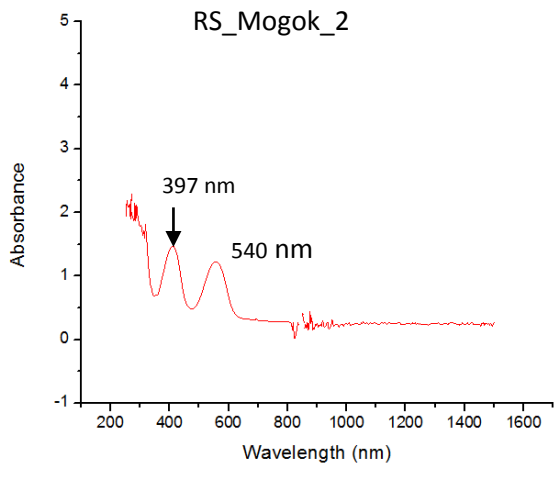
ภาคผนวก ค

ผลวิเคราะห์ UV-Vis-NIR

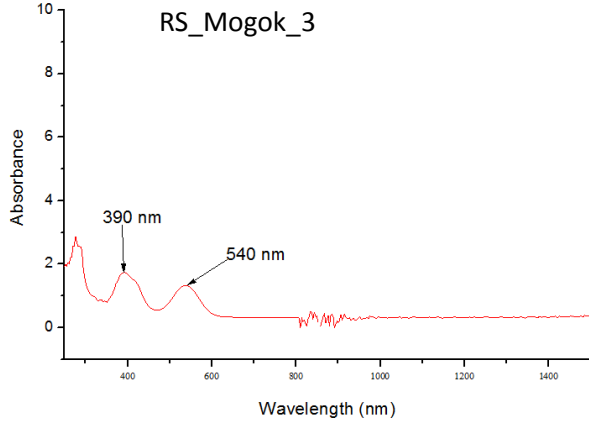
RS_Mogok_1



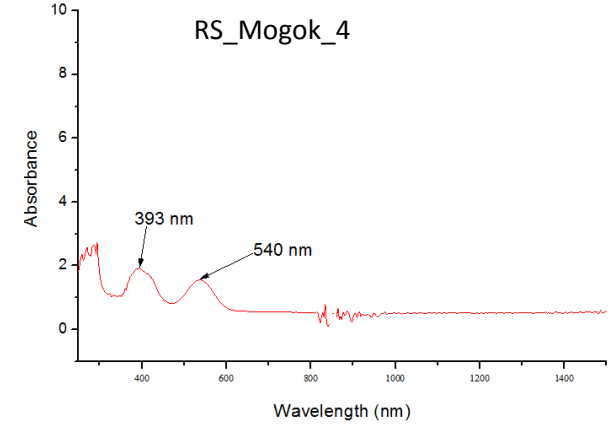
RS_Mogok_2



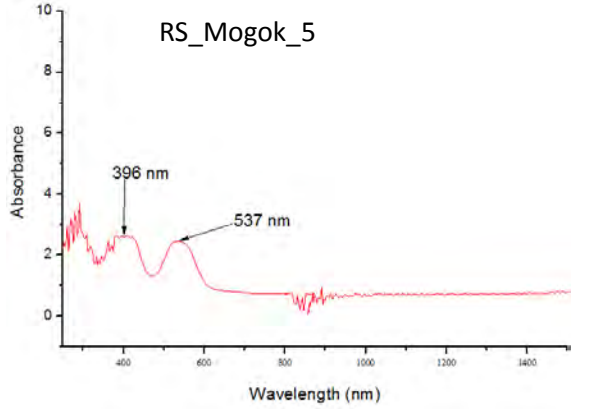
RS_Mogok_3



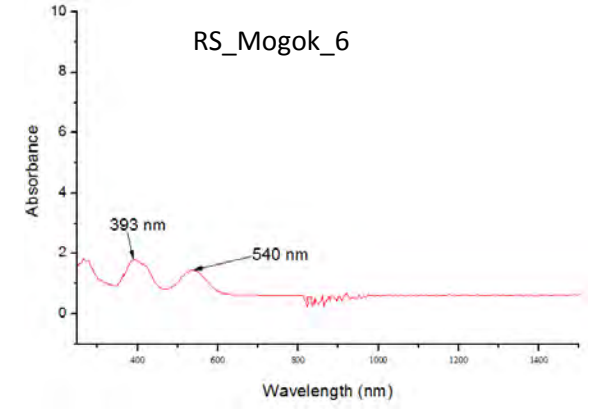
RS_Mogok_4

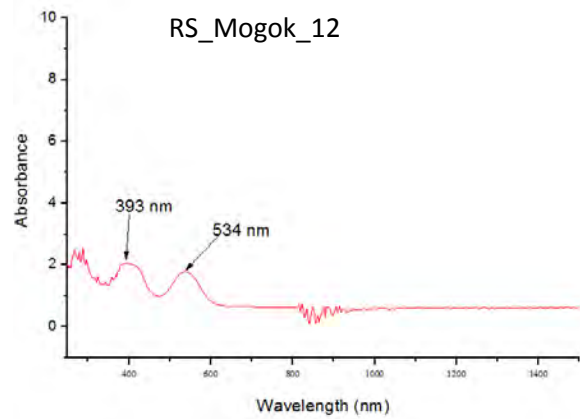
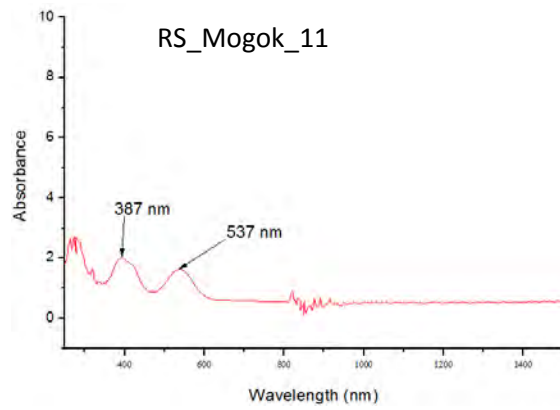
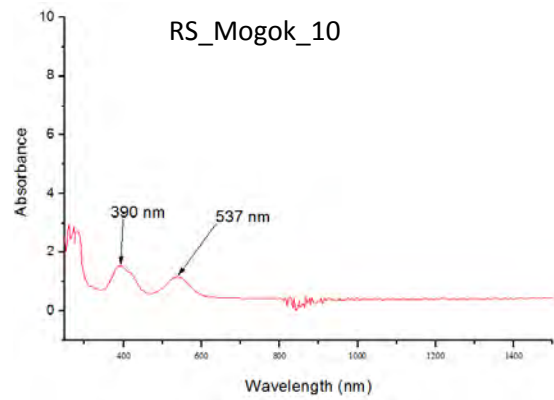
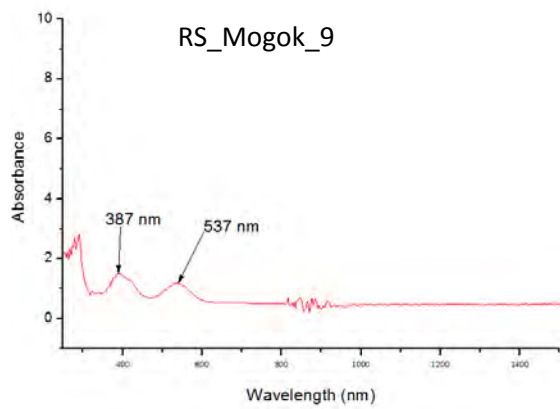
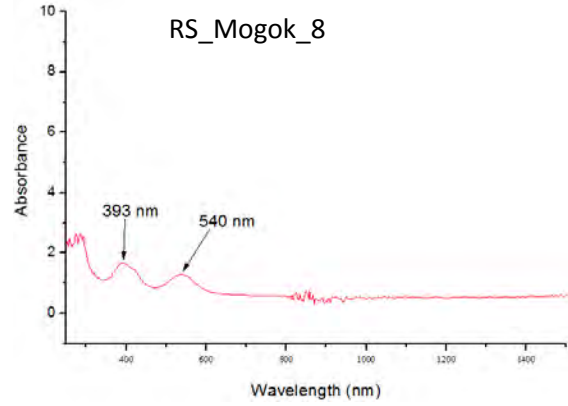
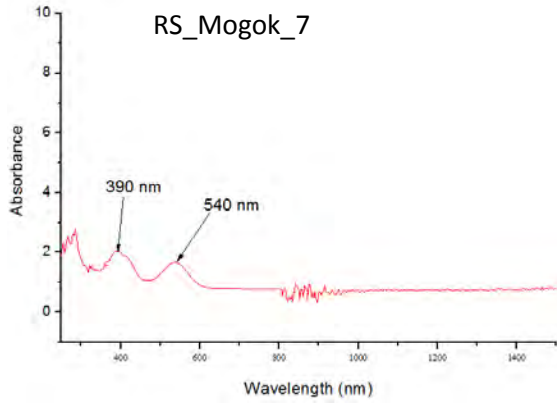


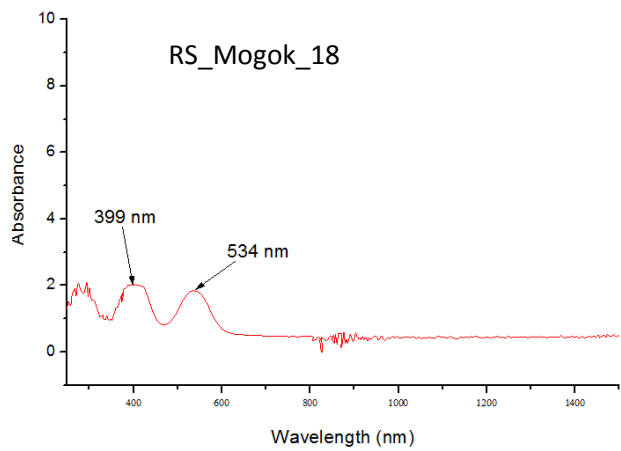
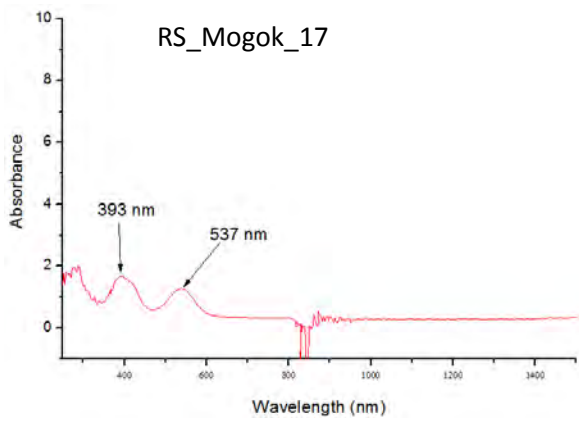
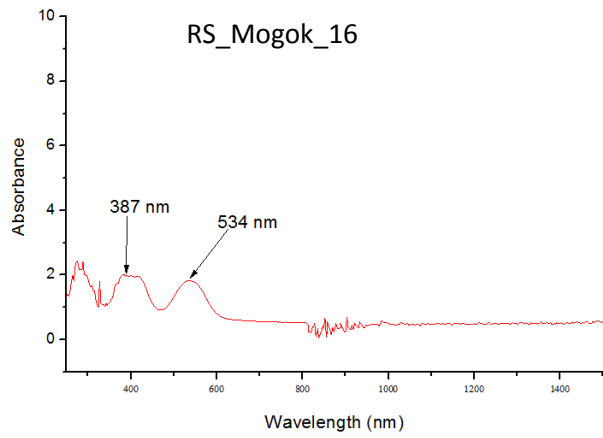
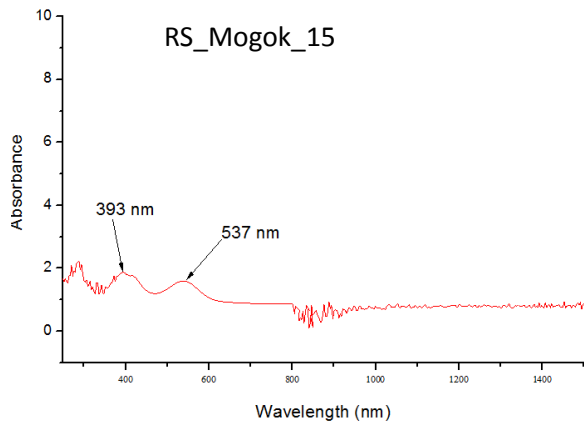
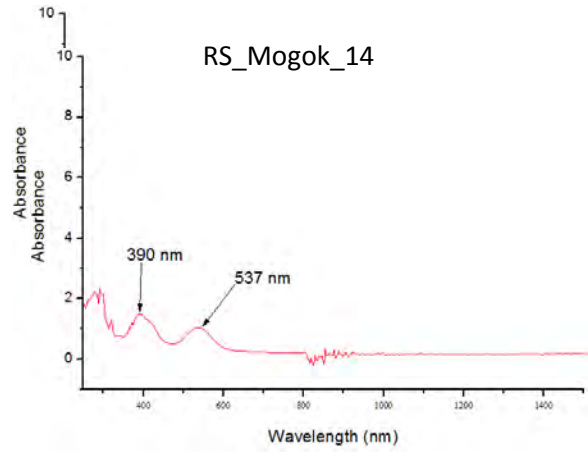
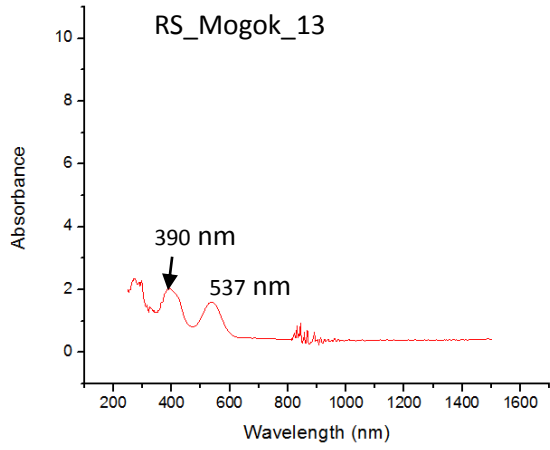
RS_Mogok_5

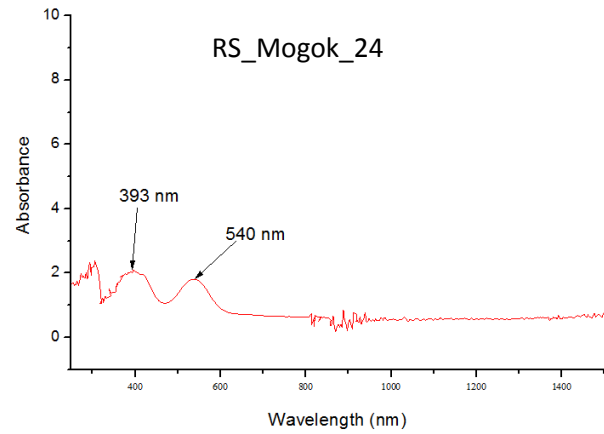
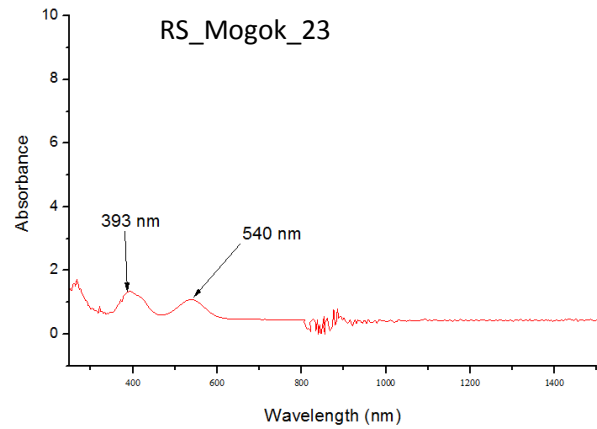
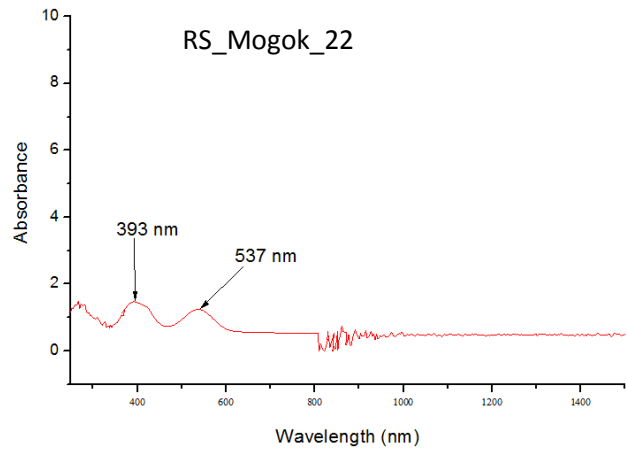
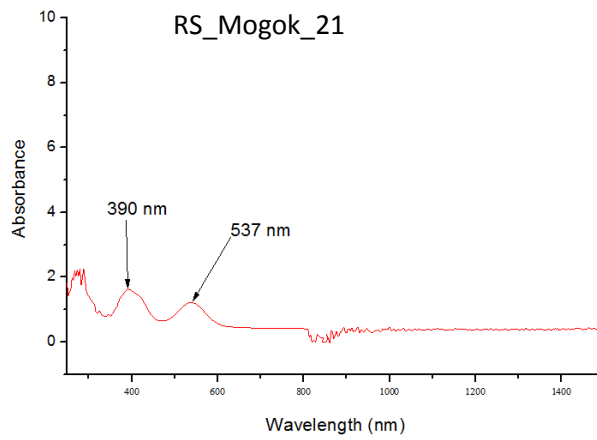
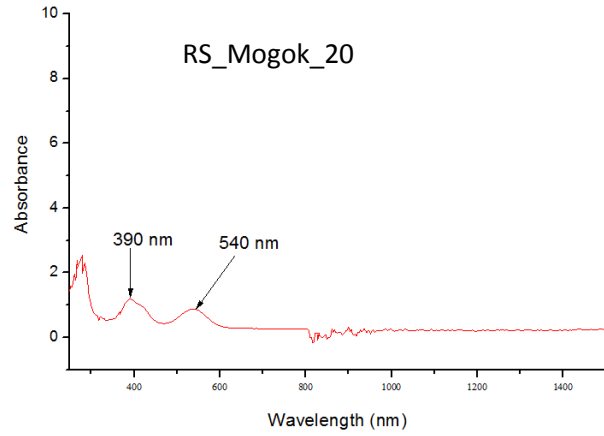
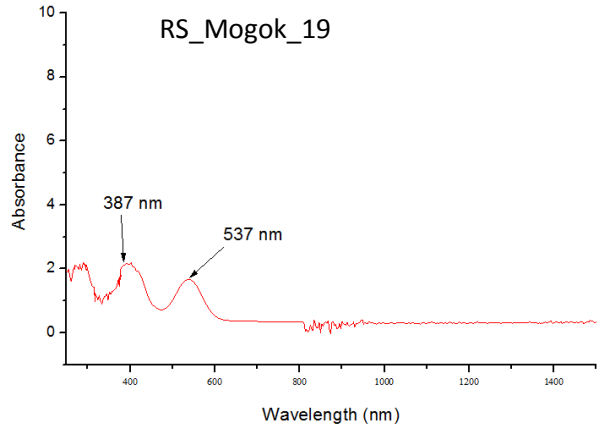


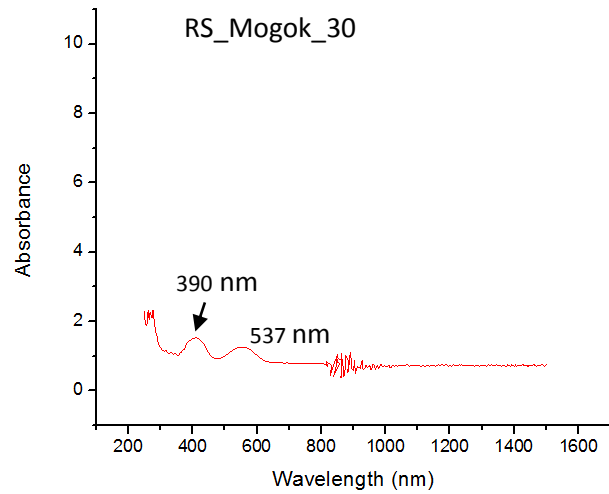
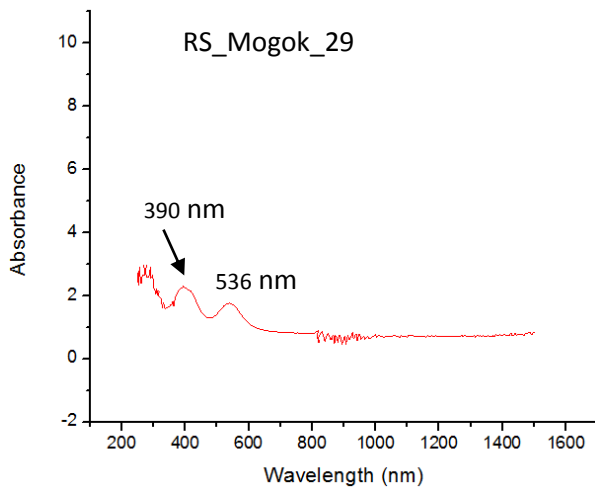
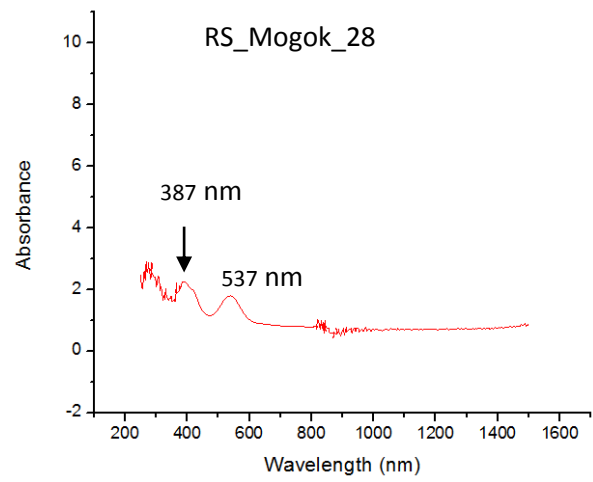
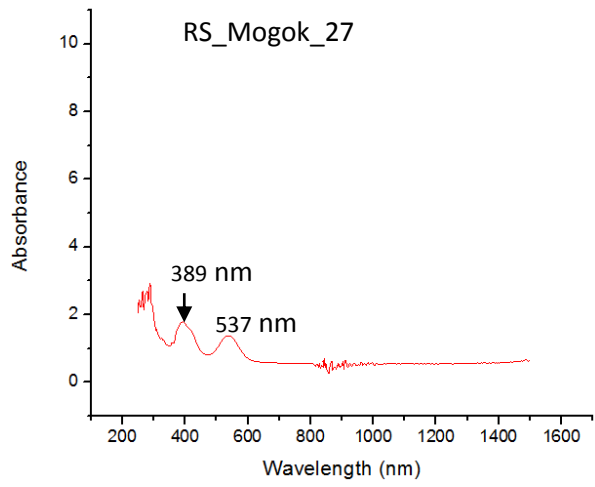
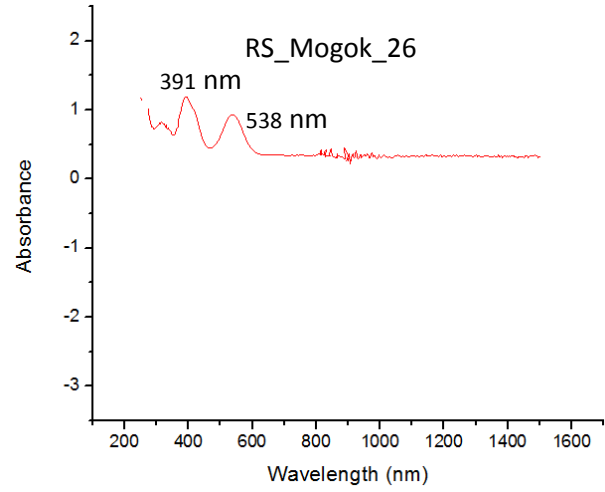
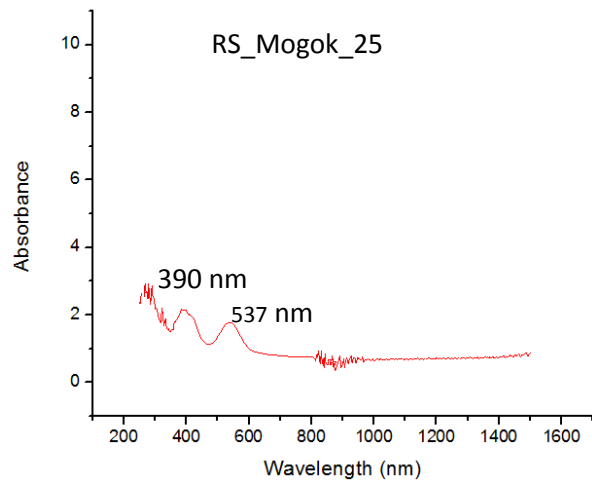
RS_Mogok_6











ภาคผนวก ง

ผลวิเคราะห์เคมีโดย EPMA

cement	RS_M1-1	RS_M1-2	RS_M1-3	RS_M2-1	RS_M2-2	RS_M2-3	RS_M3-1	RS_M3-3	RS_M4-1	RS_M4-2	RS_M4-3	RS_M5-1
SiO ₂	0.03	0.01	0.06	0.00	0.03	0.04	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	69.63	69.69	69.48	70.99	71.13	70.64	70.93	71.15	69.96	69.77	69.97	68.68
TiO ₂	0.02	0.00	0.03	0.13	0.19	0.08	0.07	0.11	0.05	0.07	0.10	0.10
Cr ₂ O ₃	2.30	2.13	2.00	0.98	0.75	0.87	0.86	1.02	2.02	2.08	1.67	3.20
FeO	0.03	0.06	0.04	0.06	0.02	0.05	0.17	0.14	0.16	0.13	0.12	0.11
MnO	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02
MgO	27.64	27.81	28.13	28.29	28.18	27.81	28.17	27.99	28.07	28.18	28.23	28.07
CaO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
ZnO	0.52	0.67	0.76	0.05	0.00	0.02	0.41	0.38	0.12	0.28	0.19	0.15
Total	100.16	100.43	100.50	100.51	100.30	99.53	100.62	100.86	100.39	100.52	100.33	100.34
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.960	1.958	1.951	1.979	1.984	1.987	1.979	1.981	1.961	1.955	1.961	1.934
Ti	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002
Cr	0.043	0.040	0.038	0.018	0.014	0.016	0.016	0.019	0.038	0.039	0.031	0.060
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.983	0.988	0.999	0.997	0.994	0.989	0.994	0.985	0.995	0.998	1.000	0.999
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.009	0.012	0.013	0.001	0.000	0.000	0.007	0.007	0.002	0.005	0.003	0.003
Total	2.997	3.001	3.004	2.999	2.997	2.996	3.001	2.997	3.000	3.002	3.001	3.001

cement	RS_M5- 2	RS_M5- 3	RS_M6- 1	RS_M6- 2	RS_M6- 3	RS_M7- 2	RS_M7- 3	RS_M9- 1	RS_M9- 2	RS_M9- 3	RS_M10- 1	RS_M10- 2
SiO ₂	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03
Al ₂ O ₃	69.34	68.50	70.19	70.40	70.38	70.74	70.74	70.49	70.69	70.90	70.44	70.34
TiO ₂	0.06	0.16	0.13	0.08	0.11	0.00	0.01	0.02	0.05	0.02	0.02	0.11
Cr ₂ O ₃	2.75	3.08	1.90	1.95	1.85	1.09	1.20	0.76	1.31	0.76	1.40	1.34
FeO	0.13	0.10	0.14	0.15	0.13	0.08	0.07	0.19	0.20	0.19	0.12	0.12
MnO	0.02	0.00	0.09	0.03	0.03	0.00	0.01	0.02	0.07	0.00	0.11	0.00
MgO	27.91	27.95	28.28	28.10	28.38	28.07	27.97	28.03	27.86	28.04	27.92	28.19
CaO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	0.18	0.20	0.18	0.03	0.32	0.54	0.49	0.40	0.47	0.39	0.00	0.11
Total	100.40	100.00	100.91	100.76	101.19	100.52	100.55	99.94	100.67	100.30	100.04	100.24
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001
Al	1.948	1.935	1.958	1.964	1.958	1.978	1.977	1.980	1.975	1.984	1.976	1.970
Ti	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002
Cr	0.052	0.058	0.035	0.036	0.034	0.020	0.022	0.014	0.024	0.014	0.026	0.025
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.004	0.004	0.004	0.002	0.002
Mn	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.991	0.998	0.997	0.991	0.998	0.992	0.988	0.995	0.984	0.992	0.990	0.998
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.003	0.004	0.003	0.000	0.006	0.009	0.009	0.007	0.008	0.007	0.000	0.002
Total	2.999	3.000	3.001	2.998	3.002	3.001	2.999	3.002	2.999	3.001	2.998	3.000

cement	RS_M10-3	RS_M11-1	RS_M11-2	RS_M11-3	RS_M12-1	RS_M12-2	RS_M12-3	RS_M13-2	RS_M13-3	RS_M14-3	RS_M15-1
SiO ₂	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.02	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	70.55	71.35	70.71	70.91	70.00	70.02	69.45	70.92	70.54	69.84	70.95
TiO ₂	0.10	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.10	0.05	0.08	0.03
Cr ₂ O ₃	1.33	0.90	1.64	0.82	3.00	3.03	3.03	1.34	1.40	1.48	0.66
FeO	0.05	0.02	0.05	0.06	0.10	0.09	0.14	0.13	0.11	0.09	0.07
MnO	0.00	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.00	0.03	0.06	0.04	0.03
MgO	28.11	28.17	27.81	28.12	27.81	27.43	27.49	28.23	28.11	28.00	27.85
CaO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
ZnO	0.11	0.29	0.47	0.41	0.53	0.54	0.41	0.28	0.11	0.10	0.66
Total	100.32	100.78	100.67	100.36	101.51	101.18	100.57	101.03	100.39	99.68	100.25
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Al	1.973	1.985	1.975	1.983	1.949	1.955	1.951	1.972	1.973	1.968	1.987
Ti	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001
Cr	0.025	0.017	0.031	0.015	0.056	0.057	0.057	0.025	0.026	0.028	0.012
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
Mn	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.994	0.991	0.982	0.994	0.979	0.968	0.976	0.992	0.994	0.997	0.986
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.002	0.005	0.008	0.007	0.009	0.010	0.007	0.005	0.002	0.002	0.012
Total	2.998	2.999	2.997	3.001	2.997	2.993	2.995	3.000	2.999	3.000	3.000

cement	RS_M15-2	RS_M15-3	RS_M16-1	RS_M16-2	RS_M17-1	RS_M17-2	RS_M17-3	RS_M18-1	RS_M18-2	RS_M18-3	RS_M19-1
SiO ₂	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	71.26	70.07	70.62	70.35	70.89	70.23	70.85	69.06	68.58	69.13	69.77
TiO ₂	0.05	0.04	0.00	0.03	0.12	0.07	0.05	0.04	0.00	0.02	0.01
Cr ₂ O ₃	0.73	0.62	1.21	1.07	1.36	1.73	1.29	2.16	2.22	3.03	2.46
FeO	0.06	0.12	0.04	0.06	0.14	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06	0.17
MnO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.03	0.00
MgO	27.69	27.88	27.85	27.27	27.59	27.75	27.83	27.38	27.77	27.34	27.72
CaO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
ZnO	0.60	0.54	0.25	0.14	0.97	1.21	1.01	0.40	0.63	0.63	0.16
Total	100.40	99.29	99.97	98.97	101.09	101.11	101.20	99.12	99.31	100.23	100.33
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Al	1.991	1.981	1.982	1.992	1.976	1.963	1.974	1.963	1.949	1.950	1.959
Ti	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Cr	0.014	0.012	0.023	0.020	0.026	0.032	0.024	0.041	0.042	0.057	0.046
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.001	0.002	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.978	0.997	0.988	0.976	0.972	0.981	0.980	0.984	0.998	0.975	0.984
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.010	0.010	0.004	0.003	0.017	0.021	0.018	0.007	0.011	0.011	0.003
Total	2.996	3.003	2.998	2.993	2.997	3.001	3.000	2.997	3.003	2.996	2.997

cement	RS_M19-2	RS_M19-3	RS_M20-1	RS_M20-2	RS_M20-3	RS_M21-1	RS_M21-2	RS_M21-3	RS_M22-1	RS_M22-2	RS_M22-3
SiO ₂	0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	68.20	69.40	70.24	70.72	70.70	70.58	69.87	69.45	71.03	70.70	70.88
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05	0.03	0.06	0.03	0.10	0.06	0.00
Cr ₂ O ₃	2.89	2.55	1.35	1.40	1.35	1.64	1.62	1.57	1.50	1.49	1.42
FeO	0.18	0.15	0.11	0.11	0.17	0.12	0.12	0.12	0.06	0.01	0.01
MnO	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.02
MgO	27.76	27.78	28.17	27.99	27.71	27.82	27.71	28.24	27.67	27.73	27.84
CaO	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01
ZnO	0.08	0.24	0.16	0.21	0.06	0.83	0.80	0.92	0.04	0.07	0.03
Total	99.11	100.12	100.08	100.53	100.04	101.02	100.18	100.38	100.43	100.09	100.20
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.942	1.954	1.970	1.976	1.982	1.970	1.966	1.954	1.983	1.981	1.983
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000
Cr	0.055	0.048	0.025	0.026	0.025	0.031	0.031	0.030	0.028	0.028	0.027
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.004	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.999	0.989	0.999	0.988	0.982	0.981	0.986	1.004	0.977	0.982	0.984
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.001	0.004	0.003	0.004	0.001	0.014	0.014	0.016	0.001	0.001	0.001
Total	3.001	2.999	3.001	2.998	2.995	2.999	3.000	3.008	2.992	2.994	2.995

cement	RS_M23-1	RS_M23-2	RS_M23-3	RS_M24-1	RS_M24-2	RS_M24-3	RS_M25-1	RS_M25-2	RS_M25-3	RS_M26-1	RS_M26-2
SiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.04	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	70.89	71.13	71.09	70.26	69.65	69.79	70.18	69.80	70.69	70.01	70.37
TiO ₂	0.06	0.08	0.14	0.06	0.09	0.05	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	1.26	1.22	1.33	2.01	2.00	2.00	1.35	1.66	1.19	0.63	0.65
FeO	0.03	0.02	0.04	0.15	0.14	0.17	0.18	0.22	0.22	0.00	0.00
MnO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	27.93	27.70	27.57	27.59	27.54	27.52	27.67	27.61	27.53	27.79	27.92
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	0.00	0.06	0.00	0.81	0.84	0.66	0.59	0.56	0.65	0.16	0.00
Total	100.18	100.20	100.19	100.89	100.31	100.20	100.01	99.84	100.35	98.62	98.97
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
Al	1.982	1.988	1.988	1.965	1.961	1.964	1.975	1.969	1.981	1.987	1.988
Ti	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.024	0.023	0.025	0.038	0.038	0.038	0.026	0.031	0.022	0.012	0.012
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.001	0.000	0.001	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.987	0.979	0.975	0.976	0.980	0.979	0.984	0.985	0.976	0.997	0.997
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.000	0.001	0.000	0.014	0.015	0.012	0.010	0.010	0.011	0.003	0.000
Total	2.995	2.993	2.991	2.997	2.999	2.998	2.999	3.000	2.997	3.000	2.999

cement	RS_M26-3	RS_M27-1	RS_M27-2	RS_M27-3	RS_M28-1	RS_M28-2	RS_M28-3	RS_M29-1	RS_M29-2	RS_M29-3	RS_M30-1
SiO ₂	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.02	0.02	0.01
Al ₂ O ₃	70.09	71.11	71.13	71.38	71.13	70.62	71.06	70.71	70.40	70.67	70.47
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.08	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.67	1.07	1.16	1.18	1.26	1.26	1.28	1.51	1.54	1.55	1.52
FeO	0.03	0.16	0.16	0.18	0.28	0.23	0.18	0.08	0.10	0.11	0.14
MnO	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.01	0.00
MgO	28.27	27.91	27.90	27.75	27.48	27.69	27.84	27.74	27.80	28.08	27.83
CaO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	0.13	1.21	1.14	1.13	0.60	0.45	0.39	0.33	0.28	0.43	0.88
Total	99.25	101.46	101.53	101.66	100.79	100.32	100.80	100.45	100.15	100.85	100.85
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.979	1.977	1.976	1.980	1.985	1.979	1.981	1.978	1.975	1.971	1.970
Ti	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Cr	0.013	0.020	0.022	0.022	0.024	0.024	0.024	0.028	0.029	0.029	0.028
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.001	0.003	0.003	0.004	0.006	0.005	0.004	0.001	0.002	0.002	0.003
Mn	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	1.009	0.981	0.980	0.973	0.969	0.981	0.981	0.981	0.986	0.990	0.984
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.002	0.021	0.020	0.020	0.010	0.008	0.007	0.006	0.005	0.007	0.015
Total	3.004	3.002	3.001	2.999	2.995	2.997	2.997	2.996	2.997	3.000	3.001

cement	RS_T1-2	RS_T1-3	RS_T2-1	RS_T2-2	RS_T2-3	RS_T3-1	RS_T3-2	RS_T3-3	RS_T4-1	RS_T4-2	RS_T4-3	RS_T6-1
SiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
Al ₂ O ₃	71.28	71.54	71.75	71.79	71.36	70.83	71.14	29.25	70.98	70.13	70.19	70.81
TiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.29	0.34	0.43	0.48	0.36	0.36	0.20	0.13	0.31	0.34	0.33	0.36
FeO	0.27	0.27	0.12	0.18	0.16	0.23	0.22	0.15	0.24	0.23	0.23	0.26
MnO	0.00	0.01	0.00	0.07	0.01	0.03	0.06	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01
MgO	27.46	27.25	27.40	27.26	27.31	27.44	27.06	28.97	27.37	27.35	27.28	27.38
CaO	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ZnO	1.25	1.07	1.21	1.38	1.35	1.46	1.39	1.43	1.84	1.79	1.81	2.25
Total	100.56	100.50	100.92	101.16	100.54	100.35	100.08	59.98	100.75	99.84	99.84	101.08
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al	1.995	2.001	1.999	1.999	1.998	1.990	2.001	1.433	1.989	1.984	1.986	1.983
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.005	0.006	0.008	0.009	0.007	0.007	0.004	0.004	0.006	0.006	0.006	0.007
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.005	0.005	0.002	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.972	0.964	0.965	0.959	0.966	0.974	0.962	1.794	0.970	0.978	0.976	0.969
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.022	0.019	0.021	0.024	0.024	0.026	0.025	0.044	0.032	0.032	0.032	0.040
Total	3.000	2.996	2.996	2.996	2.998	3.002	2.998	3.282	3.002	3.005	3.004	3.005

cement	RS_T6-2	RS_T6-3	RS_T7-1	RS_T7-2	RS_T8-1	RS_T8-2	RS_T8-3	RS_T9-1	RS_T9-2	RS_T9-3	RS_T10-1	RS_T10-2
SiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.09	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	70.06	70.10	70.84	70.66	70.54	70.25	70.75	71.02	70.74	71.03	71.07	71.50
TiO ₂	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.37	0.39	0.36	0.33	0.34	0.41	0.30	0.38	0.39	0.43	0.41	0.35
FeO	0.23	0.24	0.15	0.15	0.18	0.17	0.18	0.20	0.23	0.21	0.28	0.28
MnO	0.02	0.02	0.03	0.05	0.00	0.02	0.07	0.02	0.02	0.02	0.04	0.00
MgO	27.36	27.40	27.80	27.97	26.60	26.60	26.54	27.54	27.33	27.51	27.55	27.75
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02
ZnO	2.27	2.34	1.45	1.37	1.25	1.32	1.23	1.80	1.72	1.25	1.55	1.14
Total	100.32	100.48	100.67	100.54	98.94	98.81	99.08	100.95	100.44	100.55	100.90	101.04
Formula	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)	4(O)
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Al	1.978	1.977	1.984	1.981	2.005	2.001	2.008	1.986	1.988	1.989	1.987	1.991
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.007	0.007	0.007	0.006	0.007	0.008	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.007
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.005	0.005	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.004	0.005	0.004	0.006	0.005
Mn	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.977	0.977	0.984	0.991	0.956	0.958	0.952	0.974	0.971	0.974	0.974	0.977
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.040	0.041	0.026	0.024	0.022	0.024	0.022	0.032	0.030	0.022	0.027	0.020
Total	3.007	3.008	3.004	3.006	2.994	2.995	2.993	3.003	3.002	2.999	3.002	3.001

ภาคผนวก จ

ผลวิเคราะห์เคมีโดย EDXRF

sample	Wt%						
	MgO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ga ₂ O ₃
RS_Mogok_2	25.3925	73.4016	0.1265	0.5343	0.0841	0.4125	0.0484
RS_Mogok_10	26.601	72.4895	0.02	0.6677	0.0878	0.1174	0.0166
RS_Mogok_11	25.5069	72.796	0.0313	1.3779	0.1466	0.128	0.0132
RS_Mogok_12	25.7116	71.9138	0.0261	2.1247	0.1041	0.1068	0.0128
RS_Mogok_13	25.6465	72.8885	0.022	1.1673	0.1174	0.1382	0.0201
RS_Mogok_14	25.8697	73.1648	0.0937	0.5376	0.1066	0.2129	0.0147
RS_Mogok_15	25.9762	73.1396	0.1643	0.6482	0.0351	0.0223	0.0143
RS_Mogok_16	25.0218	72.5502	0.1407	1.6857	0.0914	0.4545	0.0558
RS_Mogok_17	25.7276	72.1947	0.1604	1.1252	0.1212	0.6422	0.0287
RS_Mogok_18	25.556	71.7831	0.1454	1.8052	0.1412	0.5114	0.0577
RS_Mogok_19	26.0388	71.682	0.0269	1.9454	0.1452	0.1464	0.0153
RS_Mogok_20	26.1292	72.5927	0.0414	1.0153	0.1022	0.0943	0.0249
RS_Mogok_21	25.6415	72.2492	0.2032	1.1644	0.1095	0.6031	0.029
RS_Mogok_22	25.7996	72.9856	0.0828	1.0596	0.0395	0.0263	0.0067
RS_Mogok_23	26.3525	72.4784	0.0807	1.0075	0.0314	0.0399	0.0097
RS_Mogok_24	25.2184	72.3066	0.1724	1.5736	0.1352	0.5741	0.0197
RS_Mogok_25	25.6668	72.5026	0.1354	1.0298	0.2012	0.4115	0.0526
RS_Mogok_26	25.6092	73.8128	0.0277	0.5341	0.007	0.0037	0.0055
RS_Mogok_27	25.7202	72.3219	0.1504	0.8367	0.1865	0.7627	0.0217
RS_Mogok_28	26.294	72.0681	0.0888	0.8651	0.2494	0.3881	0.0466
RS_Mogok_29	25.6849	72.7346	0.1772	1.0063	0.0904	0.2867	0.02
RS_Mogok_30	25.1302	72.8095	0.23	1.0853	0.1453	0.5581	0.0416

	Wt%						
sample	MgO	Al ₂ O ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ZnO	Ga ₂ O ₃
SPTAN001	25.2999	73.0933	0.1141	0.2549	0.2675	0.9334	0.0369
SPTAN002	25.3951	73.0565	0.0894	0.3035	0.1556	0.9659	0.0339
SPTAN003	25.3283	72.7422	0.1047	0.2577	0.2348	1.2974	0.035
SPTAN004	24.9503	73.1302	0.1157	0.2619	0.2209	1.2859	0.0351
SPTAN005	25.5224	73.4126	0.0886	0.1793	0.1814	0.5858	0.03
SPTAN006	24.8774	72.776	0.1068	0.2913	0.2592	1.6422	0.047
SPTAN007	25.939	72.1745	0.0928	0.3099	0.1654	1.2805	0.0379
SPTAN008	25.9223	72.5008	0.0561	0.2674	0.1942	1.0288	0.0304
SPTAN009	25.7023	72.213	0.1121	0.3578	0.2424	1.3409	0.0315
SPTAN010	25.9848	72.4199	0.0608	0.3409	0.1335	1.0264	0.0337
SPTAN011	25.2086	73.0679	0.0584	0.2725	0.2913	1.064	0.0371
SPTAN012	25.4652	72.8068	0.1108	0.4012	0.2566	0.9244	0.035
SPTAN013	26.0308	72.8896	0.1413	0.258	0.1756	0.464	0.0406