

ลักษณะเฉพาะของพลอยทับทิมจากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

นางสาวซาร่าห์ กัฟฟาร์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

CHARACTERISTICS OF RUBY FROM KILINDI DEPOSIT, TANZANIA

Miss Sarah Gaffar

A Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Bachelor of Science Program in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2016

ซาร่าห์ กัฟฟาร์ : ลักษณะเฉพาะของพลอยทับทิมจากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย.
(CHARACTERISTICS OF RUBY FROM KILINDI DEPOSIT, TANZANIA) อ.ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, 113 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดพลอยทับทิมคิรินดี ในประเทศแทนซาเนีย ประเทศที่เป็นศูนย์รวมแหล่งพลอยแหล่งใหม่ในธุรกิจอัญมณี และมีแนวโน้มในการส่งออกสูงขึ้น โดยการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นพื้นฐาน และขั้นสูงจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) เป็นการพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบพลอยที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดแน่ชัด โดยพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี มีต้นกำเนิดจากหินแอมฟิโบลต์ ที่ตั้งอยู่บริเวณแนวหินแปรอุซาคารัน และถูกควบคุมโดยระบบร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก

ตัวอย่างพลอยทับทิมที่ใช้ในการศึกษาคั้งนี้มีทั้งสิ้น 26 ตัวอย่าง เนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น มีรอยแตกภายในค่อนข้างมาก และมีมลทินภายในที่เห็นชัด มีการการเรียงแสงภายใต้แสงเหนือม่วงช่วงคลื่นยาวเล็กน้อย และไม่แสดงการเรียงแสงในช่วงคลื่นสั้น พบมลทินผลึกแร่รูไทล์, แอมฟิโบล, เซอร์คอน, โครไมต์, การ์เน็ต, และคลอไรต์ นอกจากนี้ยังพบลักษณะรอยแตก มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก และมลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ

เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง แสดงลักษณะแถบสเปกตรัมการดูดกลืนช่วงแสง UV-Vis-NIR มีการดูดกลืนช่วงของโครเมียมสูง และยังแสดงถึงการดูดกลืนช่วงของเหล็ก สำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรดพบว่าพลอยทับทิม แหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนียนี้ แสดงการดูดกลืนของ OH group ณ ความยาวคลื่น 3090, 3320, 3630 และ 3700 cm^{-1} นอกจากนี้ผลองค์ประกอบทางเคมีพบว่ามีธาตุร่องรอยที่เด่นชัด คือ Fe_2O_3 และ Cr_2O_3 ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน การวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่าง $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ กับ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ยังแสดงถึงแนวโน้มที่บ่งชี้แหล่งกำเนิดจากกระบวนการแปรสภาพ และการเทียบสัมพันธ์ด้วยอัตราส่วนระหว่าง V, Fe และ Ga ยังแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบเคมีที่โดดเด่นของพลอยทับทิมจากแหล่งคิรินดี ซึ่งแตกต่างกับพลอยทับทิมจากแหล่งอื่น

ภาควิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา _____ ธรณีวิทยา _____ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก _____

ปีการศึกษา _____ 2559 _____ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม _____

5632707323: MAJOR GEOLOGY

KEYWORDS: RUBY / USAGARAN SYSTEM / EAST AFRICAN RIFT SYSTEM / MINERAL
INCLUSIONS

SARAH GAFFAR: CHARACTERISTICS OF RUBY FROM KILINDI DEPOSIT, TANZANIA.

ADVISOR: ASSOC. PROF.CHAKKAPHAN SUTTHIRAT, Ph.D., 113 pp.

The objective of this research is to study characteristics of Ruby from Kilindi Deposits in Tanzania, which is the new gem deposit of the country and trends to be highly exported. Basic and advanced gem-testing instruments based at The Gem and Jewelry Institute of Thailand were used for this study. The main aim of this study is to develop database for further investigation of ruby's origin. The origin of ruby from Kilindi is from Amphibolite rock, which is located on the Usagaran system in association with East African Rift System.

Twenty six ruby samples under this study are opaque with obvious internal cracks and crystal inclusions. Their luminescences are weak under long wave and inert under short wave UV lamps. Mineral inclusions are identified as rutile, amphibole, zircon, chromite, garnet, and chlorite. In addition, various types of inclusions such as fracture, growth line, and fingerprint are often found.

Based on advanced analyses, strong absorptions of chromium and iron under UV-Vis-NIR are clearly observed. For absorption under Infrared, Kilindi rubies usually show absorption of OH group at 3090, 3320, 3630 and 3700 cm^{-1} . Furthermore, trace element analyses contain relatively high contents of Fe_2O_3 and Cr_2O_3 . Proportional plots between $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ show trend of metamorphic origin; in addition, from other deposits plots of V, Fe and Ga also show the distinctive proportion of ruby from Kilindi.

Department Geology Student's Signature _____

Field of Study Geology Advisor's Signature _____

Academic Year 2016 Co-advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ ซาล่า ที่คอยชี้แนะทางการทำงาน ให้ความรู้ข้อมูลที่สำคัญ ตรวจสอบความถูกต้องของงาน และให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้งานดีขึ้น เปรียบเสมือนอาจารย์ที่ปรึกษาอีกคนที่คอยช่วยเหลือ ดูแลในช่วงเวลาที่อาจารย์ที่ปรึกษาไม่สะดวก

ขอขอบคุณนางสาวนาตยา นิลฮัต, นายทัศนรา ศรีปุ่นจั่น, นายชิตชน ชิตพยัคฆ์ และ พี่ๆจาก สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่คอยสอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ให้ความรู้ และคำแนะนำ รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์ตลอดการดำเนินโครงการวิจัย นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์ และบุคลากร ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมไปถึงบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยเล่มนี้เป็นผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญตาราง	ด
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐาน	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 พื้นที่ศึกษา	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ธรณีแปรสัณฐาน และธรณีโครงสร้างบริเวณแอฟริกาตะวันออก	7
2.2 ธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา	13
2.3 แนวทางวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะพลอยทัพบทิม	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	27
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผล	
4.1 ลักษณะทั่วไป	35
4.2 มลทินภายใต้กล้องจุลทรรศน์	36
4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	52
4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)	53
4.5 องค์ประกอบทางเคมี	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 อภิปรายผล และสรุปผล	56
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	70
ภาคผนวก ค	81
ภาคผนวก ง	95
ภาคผนวก จ	109
ภาคผนวก ฉ	111

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	ภาพจากดาวเทียมแสดงบริเวณพื้นที่ศึกษา แหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย (จาก Google Earth วันที่ 14 ธันวาคม 2558)	3
รูปที่ 1.2	แสดงแผนที่ธรณีวิทยา ประเทศแทนซาเนีย (Avrom, 2011)	4
รูปที่ 1.3	แสดงลำดับชั้นหิน ประเทศแทนซาเนีย (Avrom, 2011)	5
รูปที่ 2.1	แผนที่แสดงแผ่นธรณีภาคคอนด์วานา ในปลายช่วงนีโอโพรเทโรโซอิก (~540 Ma) แสดงการวางตัวของแนวหินจากเหตุการณ์แพน-แอฟริกา (Kröner and Stern, 2004)	7
รูปที่ 2.2	การเกิดรอยต่อแผ่นธรณีเคลื่อนที่ออกจากกัน (Divergent plate boundaries) (Wicander and Monroe, 2010)	9
รูปที่ 2.3	แสดงทะเลแดง ระหว่างแผ่นพื้นทวีปแอฟริกา และแผ่นพื้นทวีปอาหรับ (Wicander and Monroe, 2010)	10
รูปที่ 2.4	แสดงร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก และแนวการแยกตัวของแผ่นพื้นทวีป (Wicander and Monroe, 2010)	10
รูปที่ 2.5	แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Measurement, DEM) แสดงลักษณะภูมิประเทศบริเวณร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (East African Rift System) (Chorowicz, 2005)	11
รูปที่ 2.6	แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Measurement, DEM) แสดงลักษณะภูมิภาคโมซัมบิก ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (East African Rift System) (Chorowicz, 2005)	12
รูปที่ 2.7	แสดงแผนที่ธรณีวิทยาประเทศแทนซาเนีย (จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ, 2557 ดัดแปลงจาก Geological Atlas of Africa, 2006)	18
รูปที่ 2.8	การเปิดหน้าเหมืองบริเวณเหมืองครินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตี ซาลำ)	19
รูปที่ 2.9	คนงานเหมืองกำลังเจาะหินในบริเวณสายแร่ทับทิมบริเวณเหมืองครินดี (ภาพถ่าย โดย อภิสิตี ซาลำ)	20
รูปที่ 2.10	กระเบื้องล้างพลอย ซึ่งใช้น้ำชะล้างตะกอนขนาดเล็กให้สามารถเห็นพลอยทับทิมได้ง่ายขึ้น (ภาพถ่ายโดย อภิสิตี ซาลำ)	20

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.11	แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณกว้างแสดงตำแหน่งของเหมืองทับทิมคิรินดี (Sommer et al.,2005)	20
รูปที่ 2.12	ภาพรวมของเหมืองคิรินดี แสดงบริเวณสายแร่ทับทิมซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหิน 2 ชนิด (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	21
รูปที่ 2.13	หินแอมฟิโบลิต (amphibolites) บริเวณเหมืองคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	22
รูปที่ 2.14	กลุ่มหินสีอ่อน บริเวณเหมืองคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	22
รูปที่ 2.15	บริเวณสายแร่ทับทิมซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหิน 2 ชนิด (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	22
รูปที่ 2.16	แร่ไคยาไนต์ (kyanite) จากแหล่งคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	23
รูปที่ 2.17	ทับทิม จากแหล่งคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธี ซาลำ)	23
รูปที่ 2.18	แซปไฟร์สีส้มอมแดง จากแหล่งคาลาลานี (ภาพถ่ายจาก © GIA โดย Tino Hammid)	24
รูปที่ 2.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่แบ่งแยกระหว่างแซปไฟร์จากหินแปร (metamorphic sapphires) และแซปไฟร์จากหินอัคนี (magmatic sapphires) (Zwaan et al., 2015)	25
รูปที่ 2.20	แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ (ternary phase diagram) แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ti (ppmw) (Zwaan et al., 2015)	26
รูปที่ 2.21	แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-(Cr+V)-Ti (ppmw) (Zwaan et al., 2015)	26
รูปที่ 2.22	แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ga (ppmw) (Zwaan et al., 2015)	26
รูปที่ 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา	27
รูปที่ 3.2	เครื่อง Hydrostatic Balance จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	29

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.3	เครื่อง Refractometer และน้ำยาอาร์ไอ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	30
รูปที่ 3.4	ตู้ UV Lamp จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	30
รูป 3.5	กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope) จากสถาบันวิจัย และพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	31
รูป 3.6	เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700 จากสถาบันวิจัย และพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	32
รูป 3.7	เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและ เครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	32
รูป 3.8	เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Ranishaw จาก สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	33
รูป 3.9	เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและ เครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	33
รูป 3.10	เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100 จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	34
รูปที่ 4.1	ภาพตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R1 , KI_R6, KI_R15, KI_R18)	35
รูปที่ 4.2	ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x40 (KI_R9)	37
รูปที่ 4.3	ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x50 (KI_R16)	37
รูปที่ 4.4	ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x20 (KI_R17)	37
รูปที่ 4.5	ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x32 (KI_R18)	37
รูปที่ 4.6	มลทินผลึกแร่ทรงแทงรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R7)	38
รูปที่ 4.7	มลทินผลึกแร่ทรงแทงรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R7)	38
รูปที่ 4.8	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R9)	38
รูปที่ 4.9	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)	38

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.10	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R13)	38
รูปที่ 4.11	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x40 (KI_R11)	38
รูปที่ 4.12	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x40 (KI_R12)	39
รูปที่ 4.13	มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x32 (KI_R18)	39
รูปที่ 4.14	มลทินผลึกแร่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)	39
รูปที่ 4.15	มลทินผลึกแร่รูปห้าเหลี่ยมด้านไม่เท่า สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R8)	39
รูปที่ 4.16	มลทินผลึกแร่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R3)	39
รูปที่ 4.17	มลทินผลึกแร่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R4)	40
รูปที่ 4.18	มลทินผลึกแร่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x32 (KI_R12)	40
รูปที่ 4.19	มลทินผลึกแร่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)	40
รูปที่ 4.20	มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ กำลังขยาย x50 (KI_R14)	41
รูปที่ 4.21	มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ กำลังขยาย x50 (KI_R13)	41
รูปที่ 4.22	มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ กำลังขยาย x40 (KI_R9)	41
รูปที่ 4.23	มลทินผลึกเนกาทีฟ กำลังขยาย x50 (KI_R25)	42
รูปที่ 4.24	มลทินผลึกแร่ ที่มีมลทินผลึกแร่ซ่อนอยู่ภายใน กำลังขยาย x40 (KI_R17)	42
รูปที่ 4.25	รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R19)	43
รูปที่ 4.26	รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R26)	43
รูปที่ 4.27	รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R5)	43
รูปที่ 4.28	มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก กำลังขยาย x20 (KI_R1)	43
รูปที่ 4.29	มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก กำลังขยาย x32 (KI_R9)	43
รูปที่ 4.30	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R1)	44
รูปที่ 4.31	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R1)	44
รูปที่ 4.32	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R26)	44
รูปที่ 4.33	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R17)	44
รูปที่ 4.34	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x32 (KI_R12)	44
รูปที่ 4.35	รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R14)	44

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.36	รอยแตกผसानรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R10)	45
รูปที่ 4.37	มลทินคราบสนิมเหล็กคล้ายปีกแมลงปอ กำลังขยาย x50 (KI_R3)	45
รูปที่ 4.38	มลทินคราบสนิมเหล็กคล้ายตะไคร้ กำลังขยาย x40 (KI_R10)	45
รูปที่ 4.39	มลทินคราบสนิมเหล็ก แบบเส้นไร้ทิศทาง กำลังขยาย x50 (KI_R16)	45
รูปที่ 4.40	มลทินแถบสี กำลังขยาย x50 (KI_R15)	46
รูปที่ 4.41	มลทินระนาบแฝด กำลังขยาย x40 (KI_R12)	46
รูปที่ 4.42	มลทินระนาบแฝด กำลังขยาย x50 (KI_R22)	46
รูปที่ 4.43	มลทินอนุภาคขนาดเล็ก กำลังขยาย x50 (KI_R10)	47
รูปที่ 4.44	มลทินอนุภาคขนาดเล็ก กำลังขยาย x50 (KI_R15)	47
รูปที่ 4.45	มลทินหม่าขุนขาวน้านม กำลังขยาย x50 (KI_R25)	47
รูปที่ 4.46	มลทินหม่าขุนขาวน้านม กำลังขยาย x50 (KI_R25)	47
รูปที่ 4.47	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่รูไทล์ (Rutile) ของตัวอย่าง KI_R3	48
รูปที่ 4.48	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่แอมฟีโบล (Amphibole) ของตัวอย่าง KI_R6	49
รูปที่ 4.49	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่เซอร์คอนไร้สี (Colorless Zircon) ของตัวอย่าง KI_R3	49
รูปที่ 4.50	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่โครไมต์ (Chromite) ของตัวอย่าง KI_R15	50
รูปที่ 4.51	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่การ์เนต (Garnet) ของตัวอย่าง KI_R17	50
รูปที่ 4.52	รามานสเปกตรัมของมลทินแร่คลอไรต์ (Chlorite) ของตัวอย่าง KI_R16	51
รูปที่ 4.53	ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอย ทับทิม จากแหล่งคิริินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18)	52
รูปที่ 4.54	ตัวอย่างการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด ของพลอยทับทิม จากแหล่งคิริินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18)	53
รูปที่ 5.1	แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอย	59
รูปที่ 5.2	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิม ด้วยอัตราส่วนระหว่าง ออกไซด์ของเหล็ก และโครเมียม	60

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.3	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิม ด้วยอัตราส่วนระหว่าง $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$	61
รูปที่ 5.4	แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ (ternary phase diagram) แสดงองค์ประกอบระหว่าง V-Fe-Ga (ppmw)	63

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4.1	ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย	36
ตารางที่ 4.2	แสดงความถี่ในการพบมลทินแร่ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope	51
ตารางที่ 4.3	สรุปผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EDXRF จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย	54
ตารางที่ 4.4	สรุปผลวิเคราะห์ทางเคมีโดย EPMA จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย	55
ตารางที่ 5.1	ตารางเปรียบเทียบมลทินผลึกแร่ที่พบในพลอยคอร์ันดัม จากแหล่งต่างๆ	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

รัตนชาติ หมายถึง แร่หรือหินบางชนิด หรืออินทรีย์วัตถุธรรมชาติที่นำมาเจียรระไน ตกแต่ง หรือแกะสลัก เพื่อใช้เป็นเครื่องประดับ มีความงาม ทนทาน และหายาก พลอยทับทิม (ruby) เป็นหนึ่งในรัตนชาติที่ได้รับความนิยมสูงเป็นพลอยในตระกูลคอรันดัม (corundum) ที่มีความแข็งตามโมห์สเกลเท่ากับ 9 ซึ่งแข็งเป็นรองเพชรเท่านั้น องค์ประกอบทางเคมีของคอรันดัมเป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และมีรูปลูกอยู่ในระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) ซึ่งพลอยคอรันดัมแต่ละชนิดจะมีสีแตกต่างกัน เนื่องจากธาตุเจือปน เช่น โครเมียม (Cr^{3+}) เป็นธาตุเจือปน ให้สีแดง และเรียกคอรันดัมสีแดงนี้ว่า ทับทิม (ruby) ส่วนคอรันดัมสีอื่นๆ จะเรียกว่าแซปไฟร์ (sapphire) เนื่องจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันอย่างหลากหลายของพลอยคอรันดัม ส่งผลให้พลอยจากแต่ละแหล่งกำเนิดมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกันออกไป เช่น ลักษณะทางกายภาพ สี การเรืองแสง มลทินภายใน ธาตุร่องรอย (trace elements) โดยเฉพาะชนิดของมลทินที่โดดเด่นในแต่ละแหล่งกำเนิด (สุพร อินทโสภา และคณะ, 2545)

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

ในปัจจุบันธุรกิจอัญมณี แหล่งพลอยแต่ละแหล่ง มีความนิยมต่างกัน เช่น ทับทิมพม่าที่ขึ้นชื่อจะมีความนิยมมาก ทำให้มีราคาสูง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดพลอยทับทิมคิรินดี ในประเทศแทนซาเนีย ซึ่งตั้งอยู่ทางตะวันออกของทวีปแอฟริกา จัดเป็นแหล่งพลอยแหล่งใหม่ในธุรกิจอัญมณี ที่มีแนวโน้มในการส่งออกสูงขึ้น

แต่เนื่องด้วยยังขาดข้อมูลสำหรับการตรวจสอบแหล่งกำเนิดพลอยทับทิมจากแหล่งคิรินดีนี้ ดังนั้นการศึกษาลักษณะเฉพาะทางอัญมณี โดยเฉพาะการศึกษาธาตุร่องรอย จากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ การดูดกลืนของแสงช่วงคลื่นที่สำคัญต่างๆ การศึกษามลทิน (inclusion) ภายในพลอย นำไปสู่การสร้างฐานข้อมูลในการตรวจสอบแหล่งกำเนิดอัญมณี นอกจากนี้การศึกษาระบบการเกิด

และการทำเหมือง เพื่อเชื่อมโยงกับเหตุการณ์ทางธรณีวิทยาของประเทศแทนซาเนีย (Avrom, 2011) โดยเฉพาะบริเวณแหล่งคิรินดี ซึ่งเป็นการเปิดหน้าดินตามแนวรอยต่อระหว่างหินที่มีการแปรสภาพสองชนิดที่แตกต่างกัน ระหว่างหินสีเข้มซึ่งคาดว่าเป็นกลุ่มหินแอมไฟโบลิต์ และกลุ่มหินสีอ่อนประกอบด้วยแร่ควอตซ์ ไคยาไนต์ และไมกา (จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ, 2557) ที่ตั้งอยู่บริเวณแนวหินแปรโมซัมบิก

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาลักษณะเฉพาะของพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย สำหรับพัฒนาฐานข้อมูลด้านแหล่งกำเนิดทับทิม

1.3 สมมติฐาน

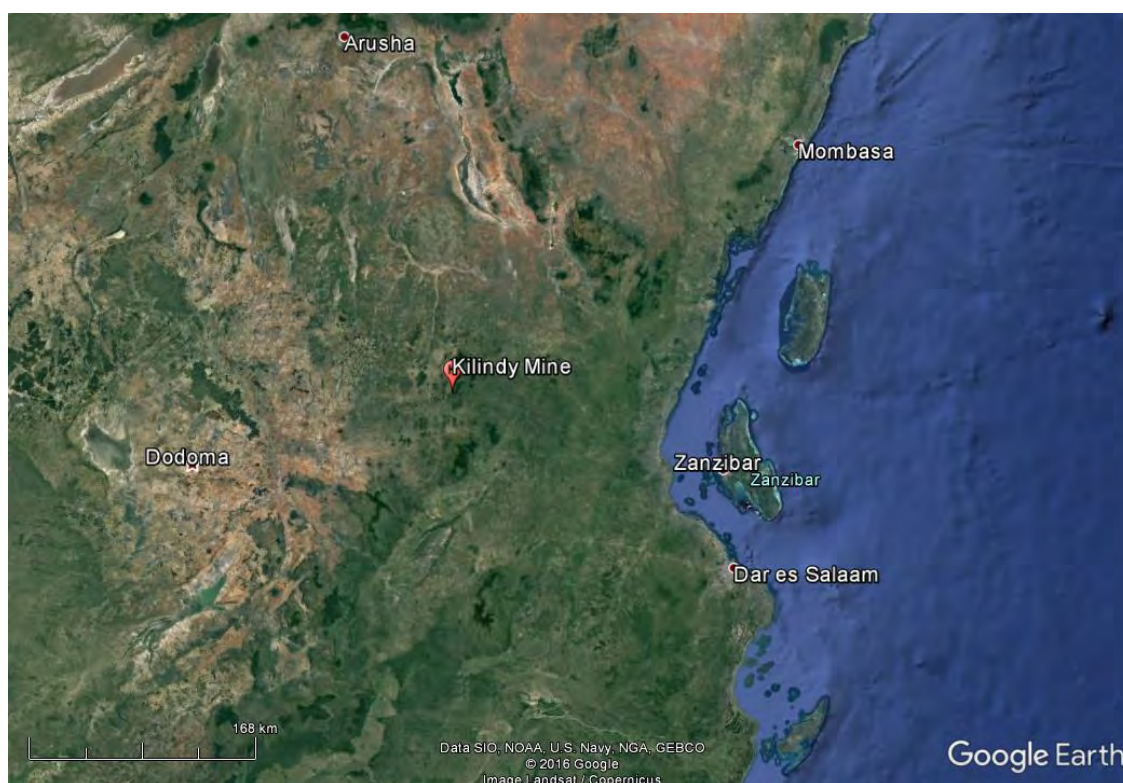
พลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย มีลักษณะเฉพาะทางอัญมณีที่แตกต่างจากแหล่งพลอยทับทิมอื่น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

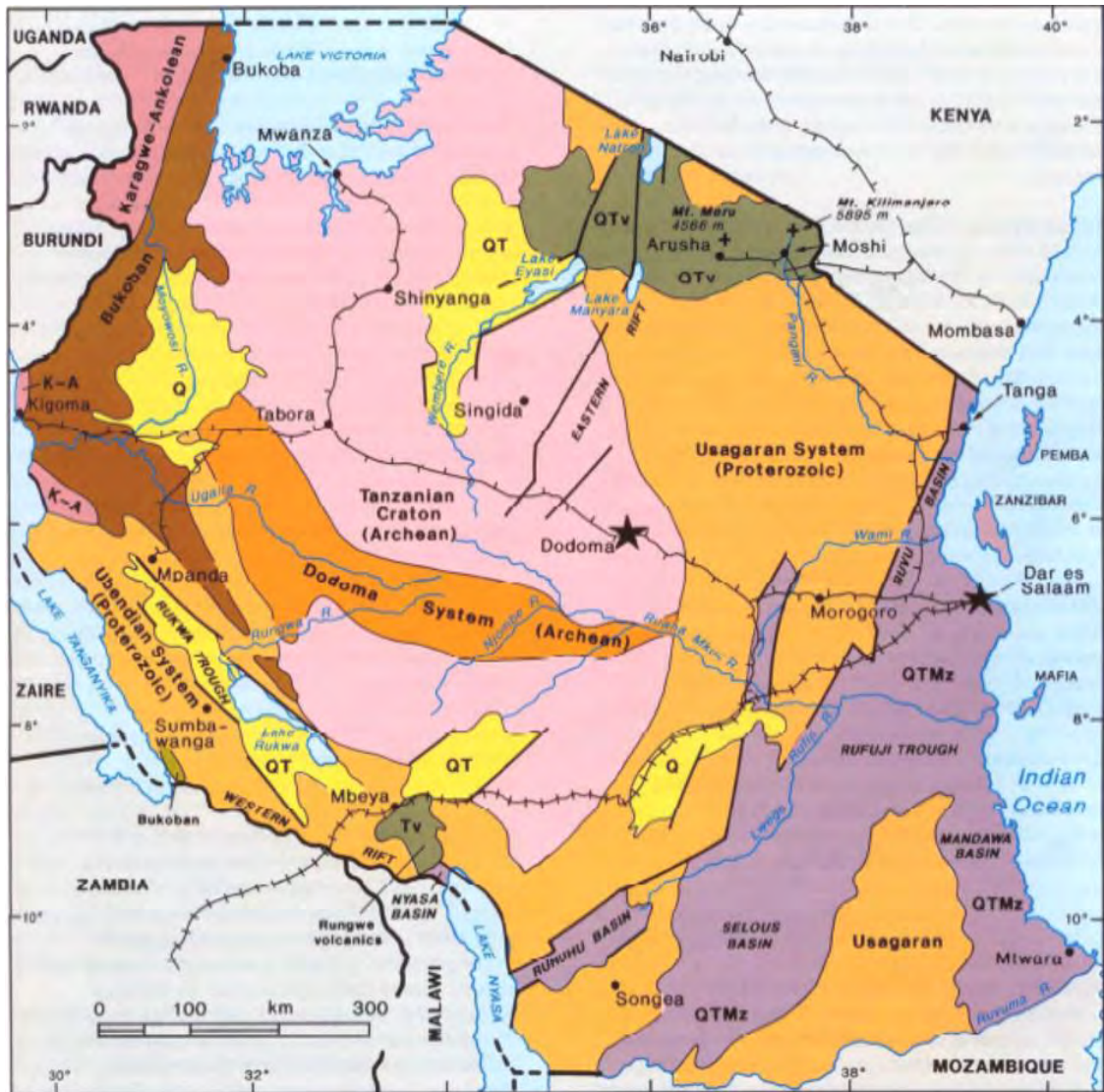
ศึกษาตัวอย่างพลอยทับทิมดิบ จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนียจำนวน 30 ตัวอย่าง โดยศึกษา และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางอัญมณีของพลอย ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ลักษณะทางแสง (optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) โดยใช้เครื่องมือทางอัญมณีขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือทางอัญมณีขั้นสูง

1.5 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ในเมืองคิรินดี เขตทังกา (Tanga) ทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของเมืองดาร์เอสซาลาม (Dar Es Salaam) ไปประมาณ 450 กิโลเมตร ประเทศแทนซาเนีย ทวีปแอฟริกา ละติจูดที่ -5.708565° ลองจิจูดที่ 37.561520° (รูปที่ 1.1) ลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ศึกษาตั้งอยู่บนระบบอุซาคารัน (usagaran system) ซึ่งตั้งอยู่บนแนวเทือกเขาหินแปรโมซัมบิก (mozambique belt) ที่กระจายตัวครอบคลุมบริเวณตอนกลาง และทางตะวันออกของประเทศแทนซาเนีย หินในระบบนี้ ประกอบไปด้วยหินแปรเกรดสูงหลายชนิด ทั้งที่มีต้นกำเนิดจากหินตะกอนและหินอัคนี โดยหินที่พบส่วนมากในระบบนี้ เป็นหินไนส์จำพวกแกรนูไลต์ไนส์ (granulite gneiss) และไบโอไทต์ไนส์ (biotite gneiss) ซึ่งมีหินต้นกำเนิดเป็นพวกตะกอนบก (pelitic sediment) (รูปที่ 1.2 และรูปที่ 1.3)

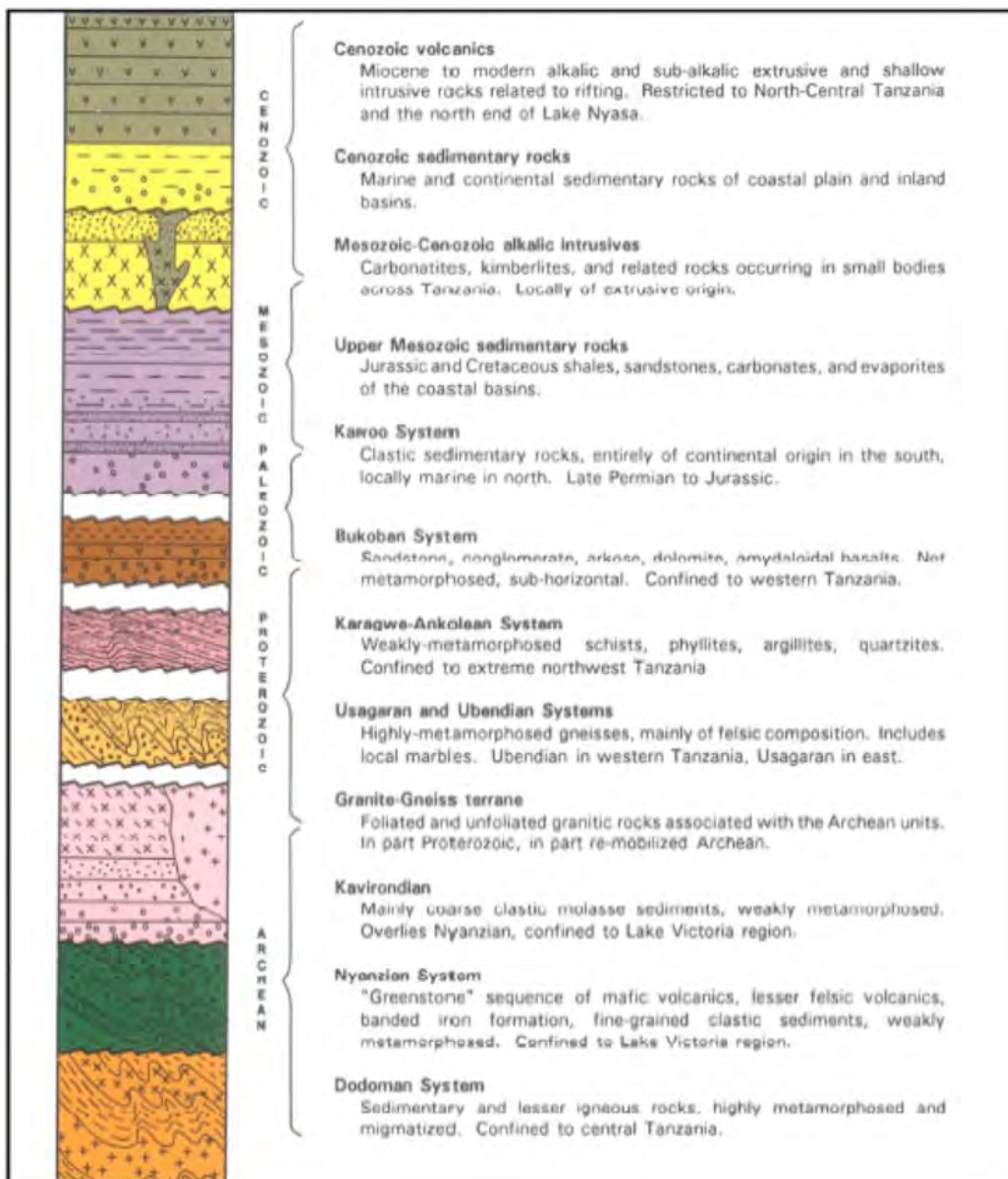


รูปที่ 1.1 ภาพจากดาวเทียมแสดงบริเวณพื้นที่ศึกษา แหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย
(จาก Google Earth วันที่ 14 ธันวาคม 2558)



รูปที่ 1.2 แสดงแผนที่ธรณีวิทยา ประเทศแทนซาเนีย (Avrom, 2011)

คำอธิบายการลำดับชั้นหิน แสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงลำดับชั้นหิน ประเทศแทนซาเนีย (Avrom, 2011)

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

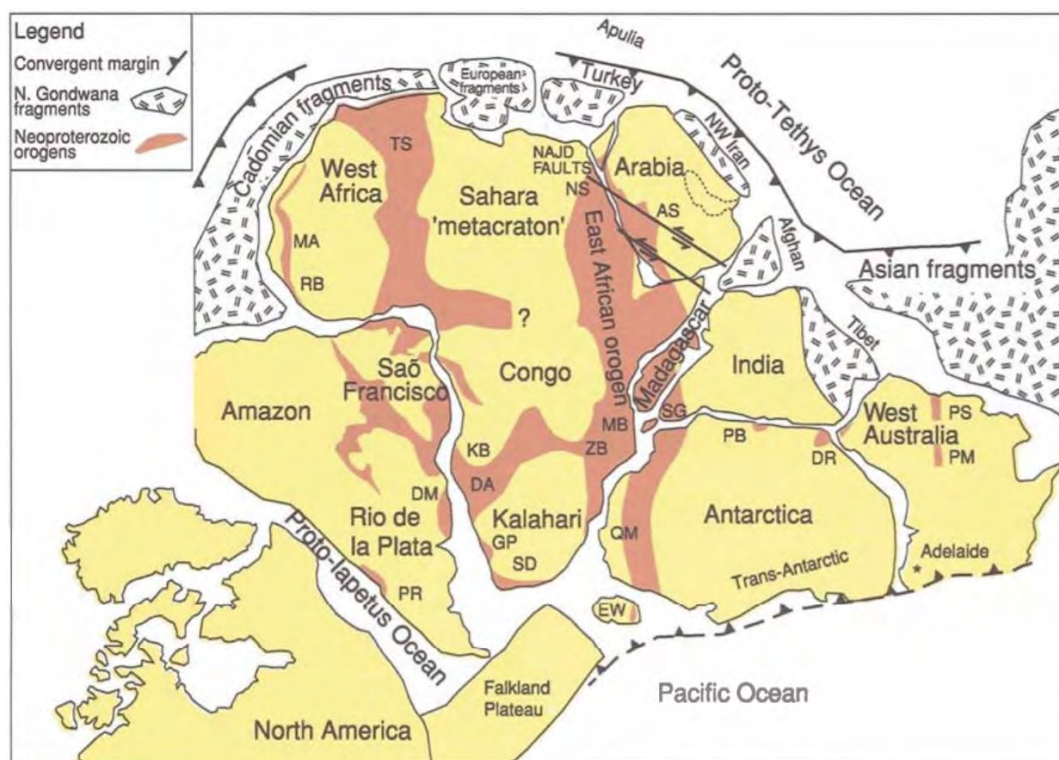
1. ลักษณะเฉพาะของพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย เพื่อนำไปสู่การพัฒนาฐานข้อมูลสำหรับการสนับสนุนการตรวจสอบแหล่งกำเนิดพลอยทับทิม
2. เรียนรู้วิธีการใช้เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์อัญมณี ทั้งเครื่องมือตรวจสอบอัญมณีขั้นพื้นฐานและเครื่องมือวิเคราะห์อัญมณีขั้นสูง
3. ทักษะในการทำงานวิจัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ธรณีแปรสัณฐาน และธรณีโครงสร้างบริเวณแอฟริกาตะวันออก

ธรณีแปรสัณฐานแพน-แอฟริกา (Pan-Africa) เป็นเหตุการณ์ทางธรณีแปรสัณฐานที่เกี่ยวข้องกับบ่ออุณหภูมิ (tectono-thermal event) เกิดขึ้นในช่วง 500 ล้านปีก่อน ซึ่งเป็นช่วงเวลาเดียวกันกับการเกิดแนวหินที่สำคัญ รวมถึงแนวโมซัมบิก (Mozambique Belt) ซึ่งอยู่ระหว่างแผ่นธรณีภาคคอนดีวานาตะวันออก (East Gondwana) บริเวณทวีปออสเตรเลีย, แอนตาร์กติกา, ทางตอนใต้ของอินเดีย และแผ่นธรณีภาคคอนดีวานาตะวันตก (West Gondwana) บริเวณทวีปแอฟริกา และทางตอนใต้ของอเมริกา ตามแนวคิดการแยกตัวของแผ่นธรณีภาคคอนดีวานา (Gondwana) ในปลายช่วงนีโอโพรเทโรโซอิก (Neoproterozoic) (~540 Ma) (Kröner and Stern, 2004) ดังรูป 2.1



รูป 2.1 แผนที่แสดงแผ่นธรณีภาคคอนดีวานา ในปลายช่วงนีโอโพรเทโรโซอิก (~540 Ma)

แสดงการวางตัวของแนวหินจากเหตุการณ์แพน-แอฟริกา

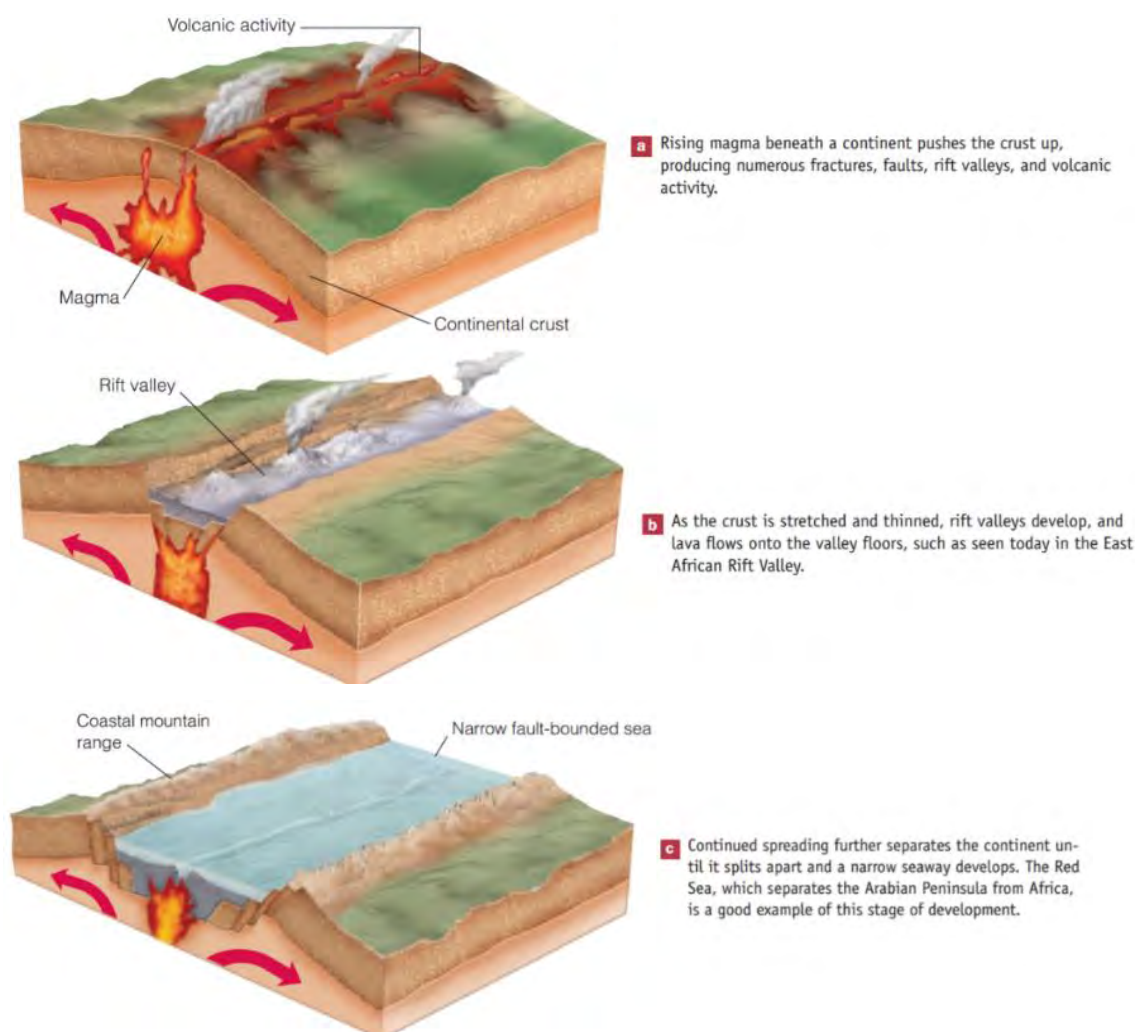
AS, Arabian Shield; BR, Brasiliano; DA, Darmara; DM, Dom Feliciano; DR, Denman Darling; EW, Eilsworth-Whitmore Mountains; GP, Gariep; KB, Kaoko; MA, Mauretides; MB, Mozambique Belt; NS, Nubian Shield; PM, Peterman Ranges; PB, Pryolz Bay; PR, Pampean Ranges; PS, Paterson; QM, Queen Maud Land; RB, Rokelides; SD, Saldania; SG, Southern Granulite Terrane; TS, Trans Sahara Belt; WB, West Congo; ZB, Zambezi. (Kröner and Stern, 2004)

Fritz et al. (2005) อธิบายการเกิดแนวโมซัมบิก จากเหตุการณ์แพน-แอฟริกา (Pan-African Mozambique Belt) ในช่วงนีโอโพรเทโรโซอิก (Neoproterozoic) (650-580 Ma) โดยเกิดรอยเลื่อนย้อน (Thrusting) ไปทางด้านบน และด้านตะวันตกในบริเวณหินฐานธรณีแทนซาเนีย (Tanzania Craton) ส่งผลให้ชั้นระดับตื้นของแผ่นเปลือกโลก (Lower crustal sections) ปรากฏขึ้นมาทางด้านตะวันออก คือแกรนูไลต์ทางด้านตะวันออก (Eastern Granulites) และชั้นระดับกลาง ถึงระดับลึก (Deep to intermediate crustal sections) ปรากฏขึ้นมาด้านตะวันตก ที่เรียกว่าอุซาคารัน (Usagaran) และขอบของหินฐานธรณีแทนซาเนีย (Tanzania Craton Margin) ซึ่งโครงสร้างต่างๆที่เกิดจากเหตุการณ์แพน-แอฟริกาทำให้เกิดชุดลักษณะการแปรสภาพชั้นกรีนชีสต์ (Greenschist facies) ในอุซาคารัน (Usagaran) และเพิ่มไปจนถึงชุดลักษณะการแปรสภาพชั้นแกรนูไลต์ (granulite facies) ในแนวโมซัมบิก (Mozambique Belt) ซึ่งหินในบริเวณเหล่านี้แสดงการแปรสภาพมากกว่าหนึ่งครั้ง เนื่องจากเกิดรอยเลื่อนย้อน (Thrusting) นี้ซ้ำต่อเนื่องกัน

Kröner and Stern (2004) ได้จำแนกแนวโมซัมบิก (Mozambique Belt) ให้เป็นหนึ่งในแนวการแปรสภาพขั้นสูงหลายหน (polydeformed high-grade metamorphic) มักปรากฏออกมาในตอนกลางถึงตอนล่างของแผ่นเปลือกโลก (middle to lower crustal levels) ยกที่จะระบุต้นกำเนิด, สภาพแวดล้อมการสะสมตัว และโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไป หินต้นกำเนิดบริเวณนี้มีอายุมากกว่าช่วงมีโซโพรเทโรโซอิก (Mesoproterozoic) ไปจนถึง มหายุคอาร์เคียน (Archaean) โดยมีการแปรสภาพหลัก และการแปรสภาพขั้นสูงเกิดขึ้น 2 เหตุการณ์หลัก คือ ประมาณ 830 ล้านปีก่อน และประมาณ 620 ล้านปีก่อน ข้อมูลจากการหาอายุสัมบูรณ์ด้วย Rb-Sr แต่ก็อาจมีการแปรสภาพที่เกิดขึ้นในช่วงอายุโบราณกว่าข้างต้นอีกด้วย และต่อมามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงในช่วงนีโอโพรเทโรโซอิก (Neoproterozoic)

เหตุการณ์สำคัญถัดมา ที่มีผลต่อลักษณะทางธรณีวิทยา และธรณีโครงสร้างบริเวณนี้ ก็คือ ร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (East African Rift System) เป็นโครงสร้างทางธรณีวิทยาขนาดใหญ่ ที่สามารถแสดงวิวัฒนาการของการเกิดธรณีแปรสัณฐานของทวีปแอฟริกาตะวันออกได้อย่างชัดเจนที่สุด (Chorowicz, 2005) เป็นกระบวนการการแยกตัวของแผ่นเปลือกโลกด้วยกระบวนการทางหินหนืด (Extensional magmatism) และจากวิวัฒนาการที่หลากหลายของกระบวนการทางภูเขาไฟ ซึ่งทำให้เกิดการแยกตัวที่เกิดขึ้นตั้งแต่สมัยเทอร์เชียรี มาจนถึงปัจจุบัน (Haroarson, 2014) โดยเกิดจากจากหินหนืดที่ดันตัวขึ้นมาจากด้านล่าง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างช้าๆของแผ่นเปลือกโลก (Crust) และชั้นแมนเทิลตอนบน (Upper mantle) ก่อให้เกิดรอยแตก (Fractures) รอยเลื่อน (Faults) ร่องทรุด (Rift valleys) การปะทุของภูเขาไฟ (volcanic activity) (รูปที่ 2.2-a) และที่สำคัญที่สุดคือ ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่แยกออกจากกัน (divergent) ของแผ่นธรณีภาค (Continental crust) ทำให้เกิดร่องทรุดปรากฏเป็นแนวยาว และลึกขึ้น (รูปที่ 2.2-b) จนกระทั่งแผ่น

ธรณีภาคนั้นแยกออกเป็นสองส่วน เกิดมหาสมุทรเล็กและแคบ ระหว่างแผ่นธรณีภาคที่แยกจากกัน (รูปที่ 2.2-c) ซึ่งก็คือ ทะเลแดง (Red Sea) ที่แยกบริเวณคาบสมุทรอาหรับออกจากแอฟริกา (รูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4) (Wicander and Monroe, 2010)



รูปที่ 2.2 การเกิดรอยต่อแผ่นธรณีเคลื่อนที่ออกจากกัน (Divergent plate boundaries) (Wicander and Monroe, 2010)

อภิลีทธี ซาล่า และคณะ (2558) ได้สรุปรายงานอธิบายถึงผลจากการเกิดร่องทรุดแอฟริกา ตะวันออก ซึ่งวางตัวยาวหลายพันกิโลเมตร ในแนวเหนือ-ใต้นี้ ตั้งแต่ทะเลแดงจนถึงทะเลสาบมาลาวี (Lake Malawi) ว่าประกอบด้วยโครงสร้างธรณีวิทยาในหลายลักษณะ เช่น ภูเขาที่มีหน้าผาจากการยุบตัว (Shear escarpment) ตามแนวขอบการทรุดตัวของแผ่นเปลือกโลก (Edge of rift zone) ซึ่ง



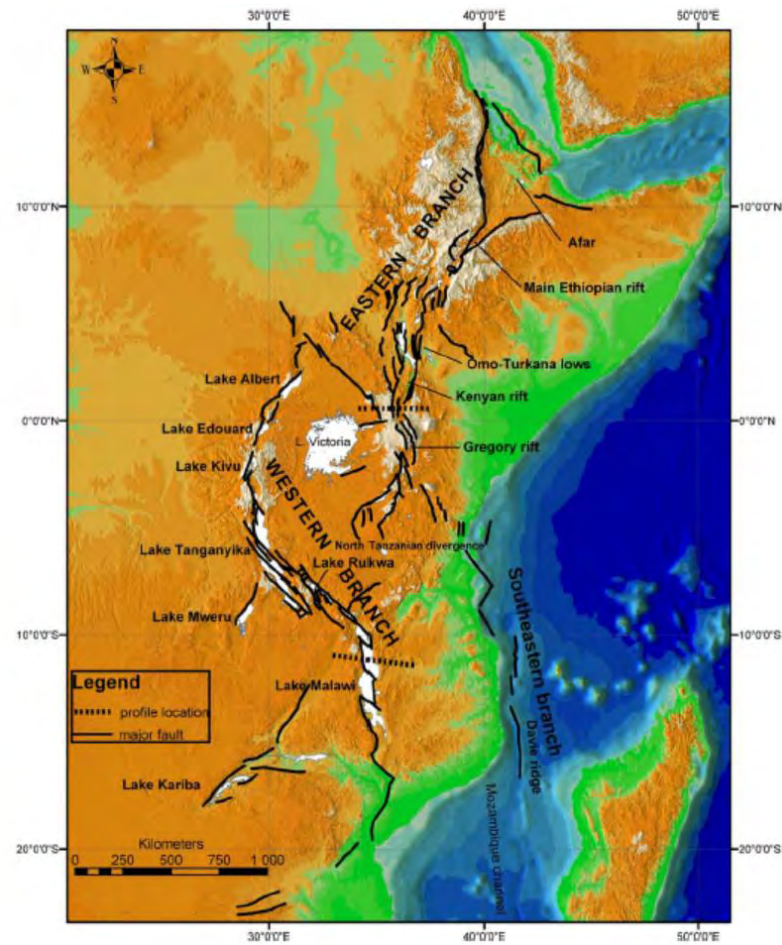
รูปที่ 2.3 แสดงทะเลแดง ระหว่างแผ่นพื้นทวีปแอฟริกา และแผ่นพื้นทวีปอาหรับ (Wicander and Monroe, 2010)

ทำให้เกิดภูมิประเทศแบบหุบเขาร่องลึกรูปตัว Y (Deep Y-shaped valleys) และภูมิประเทศแบบที่ราบสูง (Plateau) เกิดขึ้นในบริเวณนี้ และยังพบการทรุดตัวของแผ่นเปลือกโลกทำให้เกิดทะเลสาบวิกตอเรีย (Lake Victoria) เป็นทะเลสาบที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในทวีปแอฟริกา เกิดการปะทุของกรวยภูเขาไฟ (Volcanic cones) และหินภูเขาไฟตามแนวรอยเลื่อนที่วางตัวในบริเวณใกล้เคียงกับแนวร่องทรุดเหล่านี้อีกด้วย

Chorowicz (2005) ได้ศึกษาลักษณะธรณีฐานของแนวร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก พบว่ามีแนวโครงสร้างหลัก 3 แนว คือ โครงสร้างด้านตะวันออก และโครงสร้างด้านตะวันตกของร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (Eastern and Western branch of East African Rift System) และแนวที่ 3 คือ โครงสร้างด้านตะวันออกเฉียงใต้ของร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (Southeastern branch of East African Rift System) (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.4 แสดงร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก และแนวการแยกตัวของแผ่นพื้นทวีป (Wicander and Monroe, 2010)



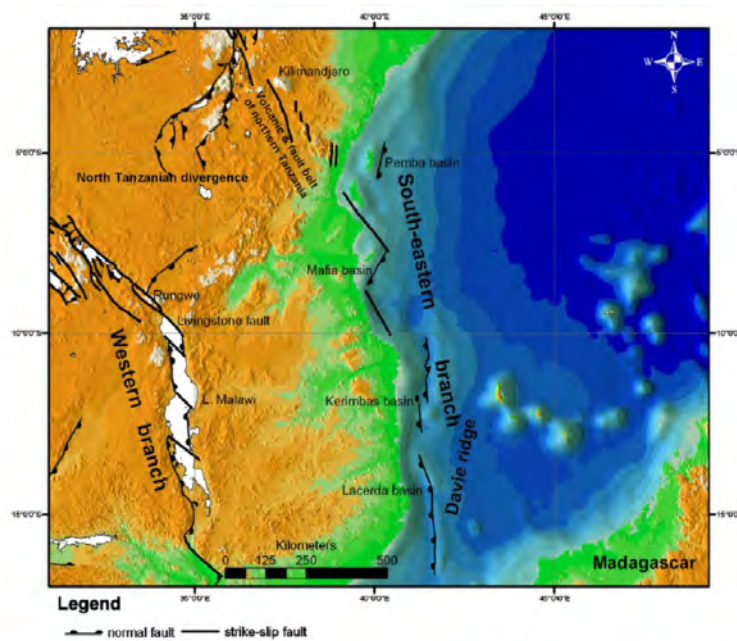
รูปที่ 2.5 แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Measurement, DEM)

แสดงลักษณะภูมิประเทศบริเวณร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (East African Rift System) โดยเส้นสีดำแสดงแนวรอยเลื่อน, พื้นที่สีขาวแสดงทะเลสาบ, พื้นที่สีเทาถึงดำแสดงบริเวณที่มีระดับความสูงต่ำ ในขณะที่พื้นที่สีเทาอ่อนแสดงบริเวณที่มีระดับความสูงสูง (Chorowicz, 2005)

โครงสร้างด้านตะวันออกของร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (Eastern branch of East African Rift System) วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ประมาณ 2,200 กิโลเมตร ตั้งแต่ Afar Triangle ทางตอนเหนือของแอฟริกาตะวันออก ยาวต่อเนื่องลงมาถึงแอ่งแยกตัวแทนซาเนียตอนเหนือ (Basins of the North Tanzanian divergence) โดยพื้นที่ส่วนใหญ่ของโครงสร้างด้านตะวันออกนี้ ครอบคลุมบริเวณของ Afar region, Ethiopian rift region, Omo-Turkana low lands, Kenyan rift region และ North Tanzanian divergence โดย Afar region เป็นบริเวณที่เชื่อมระหว่างแผ่นแอฟริกัน (African Plate), แผ่นอาหรับ (Arabian Plate) และแผ่นโซมาเลีย (Somalian Plate) ส่วน North Tanzanian divergence ตั้งอยู่ใกล้ทะเลสาบนาตรอน (Lake Natron) ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือบริเวณที่เป็นทะเลสาบไอยาซี (Lake Eyasi), ทะเลสาบแมนยารา (Lake Manyara) และที่ราบตอนใต้เทือกเขาควิรีมันจาโร (Elongated plains south of the Kilimanjaro)

โครงสร้างด้านตะวันตกวางตัวยาวประมาณ 2,100 กิโลเมตร จากทะเลสาบอัลเบิร์ต (Lake Albert) ทางตอนเหนือ ไปจนถึงทะเลสาบมาลาวิ (Lake Malawi) ทางตอนใต้

สำหรับโครงสร้างด้านตะวันออกเฉียงใต้ของร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (Southeastern branch of East African Rift System) ประกอบไปด้วยแอ่งที่วางตัวทางด้านเหนือ และด้านตะวันตกของสันเขาใต้ทะเลเดวี (Davie Ridge) เป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลจากวิวัฒนาการของธรณีแปรสัณฐานน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โครงสร้างทางธรณีวิทยาในพื้นที่นี้ ประกอบไปด้วยแอ่งเพมบา (Pemba Basin), แอ่งมาเฟีย (Mafia Basin), แอ่งเคริมบาส (Kerimbass Basin) และแอ่งลาเคอร์ดา (Lacerda Basin) ยังมีแอ่งแบบกึ่งกราเบนที่เกิดจากรอยเลื่อนปกติร่วมอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าแอ่งเคริมบาส และแอ่งลาเคอร์ดา อาจเกี่ยวข้องกับการเกิด Reactivation ของรอยเลื่อนในแนวระดับโบราณ (Ancient strike slip fault) บริเวณสันเขาใต้ทะเลเดวี (Davie Ridge)



รูปที่ 2.6 แผนที่ระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Measurement, DEM) แสดงลักษณะภูมิภาคโมซัมบิก ซึ่งวางตัวอยู่ในแนวร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (East African Rift System) และแสดงโครงสร้างในด้านตะวันออกเฉียงใต้ และด้านตะวันตกของร่องทรุดแอฟริกาตะวันออก (Chorowicz, 2005)

2.2 ธรณีวิทยาบริเวณพื้นที่ศึกษา

2.2.1 ลักษณะธรณีวิทยาประเทศแทนซาเนีย

ลักษณะธรณีวิทยา และโครงสร้างทางธรณีวิทยาในประเทศแทนซาเนีย สามารถบอกให้ทราบถึงประวัติการเปลี่ยนแปลงของแผ่นทวีปแอฟริกา จากหลักฐานทางธรณีศาสตร์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของแผ่นเปลือกโลกตั้งแต่ยุคอาร์เคียน (Archaen) จนถึงปัจจุบัน ทำให้หินบริเวณนี้ถูกแปรสภาพหลายครั้ง (Avrom, 2011) โดยจักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ(2557) ได้รายงานสรุปการลำดับชั้นหิน และการกระจายตัวของหินจากรายงานของ Avrom (2011) ดังนี้

❖ อาร์เคียน (Archaen)

หินฐานธรณียุคอาร์เคียน (Archean Basement) มีอายุมากกว่า 2.5 พันล้านปี โดยส่วนใหญ่ หินที่พบในแทนซาเนียประกอบไปด้วยแนวหินแกรนิต-กรีนสโตน (granite-greenstone belt) ซึ่งเป็นหินตะกอนภูเขาไฟ (volcano-sedimentary) ที่มีลักษณะเป็นแนวหิน (linear belt) วางตัวอยู่ในหินแกรนิตขนาดใหญ่ โดยทั่วไปหินแกรนิตที่พบมีอายุอ่อนกว่าหินกรีนสโตน ในขณะที่บางแห่งอาจมีอายุแก่กว่า ประกอบด้วย

หินฐานธรณีแทนซาเนียน (Tanzanian Craton): หินฐานขนาดใหญ่ กระจายตัวบริเวณตอนกลางของประเทศ ประกอบด้วยหินไนส์ (gneiss) หินชีสต์ (schist) หินควอร์ตไซต์ (quartzite) หินมิกมาไทต์ (migmatite) หินแอมฟีโบลิต (amphibolite) และหินแกรนูลิต (granulite) มีชุดลักษณะการแปรสภาพอยู่ระหว่างชั้นแอมฟีโบลิต (amphibolite facies) ถึงชั้นแกรนูลิต (granulite facies) และพบหินอัคนีภูเขาไฟสีเข้มมาก (ultramafic volcanic rock) ถึงหินอัคนีภูเขาไฟสีอ่อน (felsic volcanic rock) ได้แก่ หินเซอร์เพนไทน์ (serpentinite) หินแกบโบร (gabbro) หินโดเลอไรต์ (dolerite) หินไดออไรต์ (diorite) หินคิมเบอไลต์ (kimberlite) หินแกรนิต (granite) และหินไซยไนต์ (syenite)

ระบบหินโดโดมา (Dodoma System): วางตัวในแนวตะวันออกเฉียงใต้ (East Southeast trending) มีอายุแก่กว่าหินกรีนสโตน และหินแกรนิตโดยรอบ หินส่วนใหญ่เป็นหินที่มีต้นกำเนิดมาจากหินตะกอนที่เกิดร่วมกับหินอัคนีภูเขาไฟสีเข้ม และสีเข้มมาก (mafic and ultramafic) หินที่พบประกอบด้วยหินแปรสภาพชั้นสูง ที่พบมากได้แก่ หินแกรนูลิต (granulite) และหินการ์เนต-แอมฟีโบลิตไนส์ (garnet-amphibolite gneiss) นอกจากนี้ยังพบหินกรีนชีสต์ทัลก์ (greenschist talc) หินคลอไรต์ชีสต์ (chlorite schist) และหินซีริไซต์ชีสต์ (sericite schist)

ระบบหินนัยเซียน (Nyanzian Systems): จัดเป็นลำดับชั้นหินตะกอนภูเขาไฟยุคอาร์เคียน (Archean volcano-sedimentary) หรือแนวหินกรีนสโตน (greenstone belt) ที่เกิดร่วมกับหินแกรนิต-ไนส์ (granite-gneiss) ขนาดใหญ่ของชุดหินบูกานดาโทโร (Buganda Toro) อายุ 2.6 ถึง

3 พันล้านปี โดยมากพบเป็นหินอัคนีภูเขาไฟสีเข้ม (mafic volcanic rock) ไปจนถึงหินอัคนีภูเขาไฟสีอ่อน (felsic volcanic rock) และหินตะกอนเนื้อประสม (immature) ซึ่งหินทั้งสองชนิดมักพบในบริเวณแนวหินกรีนสโตน แสดงลักษณะหินแปรในชุดลักษณะการแปรสภาพชั้นกรีนชีสต์ (greenschist facies) ที่มีการคดโค้งระนาบแกนเอียงชัน (folding with steeply dipping axial plane) และมีแนวแกนการคดโค้งอยู่ในแนวตะวันออก-ตะวันตก

หินที่พบสามารถแยกเป็นหินชุดล่าง (Lower Series) และหินชุดบน (Upper Series) โดยใช้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีในแนวตั้งของหินหลอมเหลว ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแร่สีเข้มไปเป็นแร่สีอ่อนเป็นตัวกำหนดขอบเขต นอกจากนี้ยังพบหินเถ้าภูเขาไฟ (volcanic tuffs) แทรกสลับด้วยชั้นหินตะกอน (interbedded sedimentary rocks)

- หินชุดล่าง ประกอบไปด้วยหินสำคัญได้แก่ หินอัคนีจำพวกหินบะซอลต์ (basalt) หินแอนดีไซต์ (andesite) และหินเดไซต์ (dacite) แสดงลักษณะลาวารูปหมอน (pillow lava) ส่วนหินตะกอนประกอบไปด้วยชั้นแร่เหล็ก (banded iron formation; BIF) หินเชิร์ตตกผลึกใหม่ (recrystallized cherts) หินดินดาน (shale) และหินกรวดมน (conglomerate)
- หินชุดบน ลักษณะเด่นที่พบคือ หินลาวาประเภทเฟลสิก (felsic lava) หินเถ้าภูเขาไฟ (tuff) หินเชิร์ตปนเหล็ก (ferruginous chert) ชุดหินชั้นแร่เหล็ก และหินตะกอนดินแปรสภาพ (meta-pelites) นอกจากนี้ยังยืนยันเขียนกรีนสโตน (Nyanzian greenstone) ยังมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เนื่องจากเป็นแหล่งทองคำที่สำคัญในประเทศ

ระบบหินคาวีรอนเดียน (Kavirondian Systems): พบบริเวณตอนเหนือของแทนซาเนีย วางตัวแบบไม่ต่อเนื่องกับระบบหินนัยเซียน (Nyanzian system) หินส่วนใหญ่เป็นหินกรวดมน (conglomerate) หินทรายอาร์โคสเนื้อหยาบ (coarse arkosic) หินกรวดเฟลด์สปาร์ (feldspathic gritstone) และหินควอร์ตไซต์ (quartzite) เกิดร่วมกับหินแกรนิตที่มีปริมาณแร่ทองคำเล็กน้อย และหินอัคนีภูเขาไฟ (volcanic rock)

❖ โพรเทโรโซอิก (Proterozoic)

ระบบหินอุซาคารัน (Usagaran System): พบมากในบริเวณตอนกลาง และตะวันออกของแทนซาเนีย หินส่วนใหญ่มีการแปรสภาพขั้นสูงที่หลากหลายทั้งที่มีต้นกำเนิดมาจากหินตะกอน และหินอัคนี หินที่พบโดยมากเป็นหินชุดลักษณะการแปรสภาพชั้นแอมฟีโบลิต (amphibolite facies) ที่สัมพันธ์กับกระบวนการเกิดหินแกรนิต (granitization) และกระบวนการหลอมบางส่วน (migmatization) ในขณะที่เกิดกระบวนการเพิ่มความร้อนจากธรณีแปรสัณฐานแพน-แอฟริกัน (Pan-African tectonothermal) ซึ่งเป็นเหตุการณ์เดียวกันที่มีผลกระทบต่อแนวโมซัมบิก (Mozambique

Belt) ดังที่กล่าวแล้วในข้างต้น โครงสร้างทางธรณีวิทยาวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ โดยหินในกลุ่มนี้เป็นแหล่งสะสมอัญมณี และทองคำที่สำคัญในแถบนี้

ระบบหินอุเบนเดียน (Ubendian System): ประกอบด้วยหินที่มีอายุอยู่ในช่วงโพรเทโรโซอิกตอนล่าง (Lower Proterozoic) ถึงอาร์เคียน (Archaen) พบอยู่โดยรอบด้านตะวันตกเฉียงใต้ของหินฐานธรณี หินที่พบเป็นหินที่มีการแปรสภาพขั้นสูงทั้งที่มีต้นกำเนิดมาจากหินตะกอน และหินอัคนี โดยส่วนมากเป็นหินไนส์ (gneiss) ที่เกิดร่วมกับหินอัคนีแทรกซอนสีเข้มถึงเข้มมาก (mafic-ultramafic intrusive) ส่วนใหญ่มีชุดลักษณะการแปรสภาพแบบการ์เนต-แอมฟิโบไลต์ (garnet-amphibolite facies) ในบางครั้งอาจสูงถึงขั้นแกรนูไลต์ (granulite facies) มีโครงสร้างทางธรณีวิทยาวางตัวในแนวตะวันตกเฉียงเหนือ-ตะวันออกเฉียงใต้ นอกจากนี้ หินในกลุ่มนี้เป็นแหล่งสะสมอัญมณี และทองคำที่สำคัญเช่นเดียวกับระบบหินอุซาคารัน (Usagaran System)

ระบบหินคารักเว-แอนโคเรียน (Karagwe-Ankolean System): มีการกระจายตัวในบริเวณตะวันตกของทะเลสาบวิกตอเรีย (Lake Victoria) บริเวณตะวันตกเฉียงเหนือซึ่งอยู่ติดกับประเทศบुरुнді (Burundi) รวันดา (Rwanda) และอูกันดา (Uganda) กลุ่มหินมีอายุอ่อนกว่าอุเบนเดียน และอุซาคารัน โดยมีอายุประมาณ 1.3-1.4 พันล้านปี โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยตะกอนละเอียด (argillaceous) และตะกอนหยาบ (arenaceous) ซึ่งแสดงถึงการสะสมตัวในสภาพแวดล้อมแบบน้ำตื้น (shallow water) และเกิดชุดลักษณะการแปรสภาพขั้นต่ำเป็น หินเซริไซต์ชีสต์ (sericite schist) และหินควอร์ตไซต์ (quartzite) นอกจากนี้ยังพบการแทรกซอนของหินแกรนิตซึ่งเป็นแหล่งสะสมตัวของแร่ดีบุก-ทังสแตนที่พบเป็นสายแร่โดยรอบหินแกรนิตเหล่านี้

ระบบหินบูโคบัน (Bukoban System): กระจายตัวอยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของแทนซาเนีย และพบกระจายตัวเข้าไปในประเทศเคนยา (Kenya) และอูกันดา (Uganda) กลุ่มหินนี้วางตัวอยู่บนชุดหินนัยันเซียน (Nyanzian system) แสดงลักษณะการเปลี่ยนรูป (deformed) เล็กน้อยแต่ยังไม่ถึงขั้นการแปรสภาพ มีอายุอยู่ในช่วงมหายุคโพรเทโรโซอิก (Proterozoic) ถึงมหายุคพาลีโอโซอิก (Paleozoic) ประกอบด้วยหินจำพวกหินตะกอนบก และหินตะกอนทะเล ได้แก่ หินทราย (sandstone) หินควอร์ตไซต์ (quartzite) หินดินดาน (shale) ชั้นหินปูนเนื้อโดโลไมต์สีแดง (red dolomitic limestone) และหินเชิร์ต (chert) เป็นต้น อาจพบผนังหิน (dike) และผนังหินแทรกชั้น (sill) ของหินบะซอลต์ (basalt) และหินแกบโบร (gabbro) ถึงหินโดเลอไรต์ (dolerite) แทรกอยู่ และในชั้นหินอัคนีสีเข้มยังพบเป็นแหล่งสะสมแร่ทองแดงด้วย

❖ พาลีโอโซอิกถึงมีโซโซอิก (Paleozoic-Mesozoic)

ระบบหินคารู (Karoo System): กระจายตัวอยู่ด้านข้าง และวางตัวอยู่บนระบบหินอุซาคารัน (Usagaran System) ทางด้านตะวันออก บริเวณตะวันตกเฉียงใต้-ตะวันออกเฉียงเหนือของชายฝั่งตะวันออกของแทนซาเนีย โดยทั่วไปเป็นหินตะกอนบนทวีปมีอายุอยู่ระหว่างเพอร์เมียน (Permian) ถึงจูแรสซิก (Jurassic) ประกอบด้วย หินทรายเนื้อหยาบ (coarse sandstone) หินดินดาน (shale) และหินทรายแป้ง (siltstone) เกิดร่วมกับถ่านหินที่สะสมตัวเป็นเวลานานระหว่างการยกตัว และผุพังของแผ่นเปลือกโลก หินกลุ่มนี้มีการวางตัวแบบไม่ต่อเนื่องอยู่บนหินอายุพรีแคมเบรียน (Precambrian) และถือเป็นแหล่งถ่านหินที่สำคัญของประเทศ

หินตะกอนยุคมีโซโซอิกตอนบน (Upper Mesozoic sedimentary rocks): พบกระจายตัวอยู่ในแอ่งตะกอนเฉพาะบริเวณชายฝั่ง ประกอบด้วย หินปูน (limestone) หินทราย (sandstone) หินดินดาน (shale) หินมาร์ล (marls) และแร่ระเหย (evaporites) จำพวกยิปซัม (gypsum) แอนไฮไดรต์ (anhydrite) และเกลือ (salt)

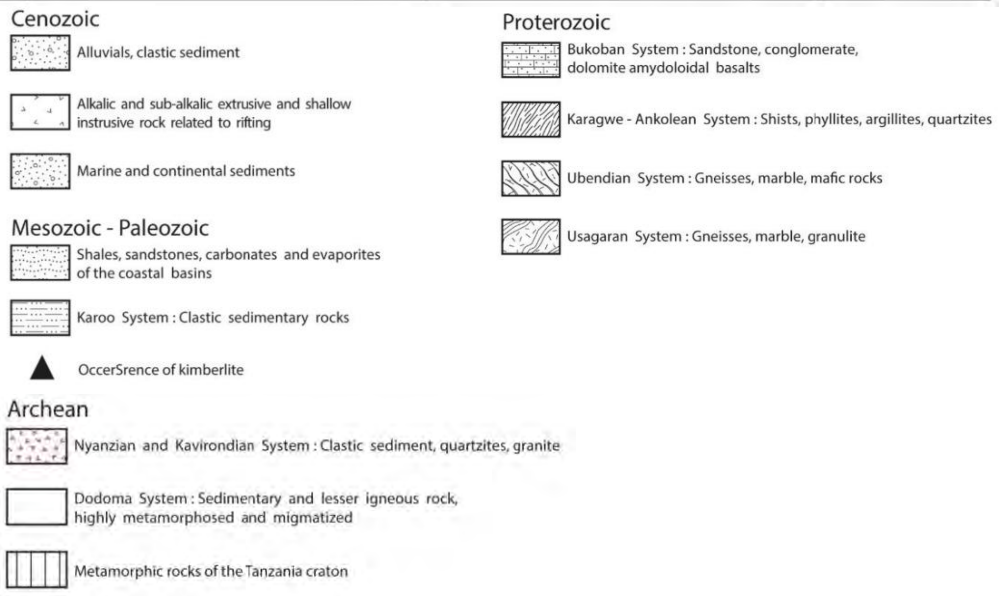
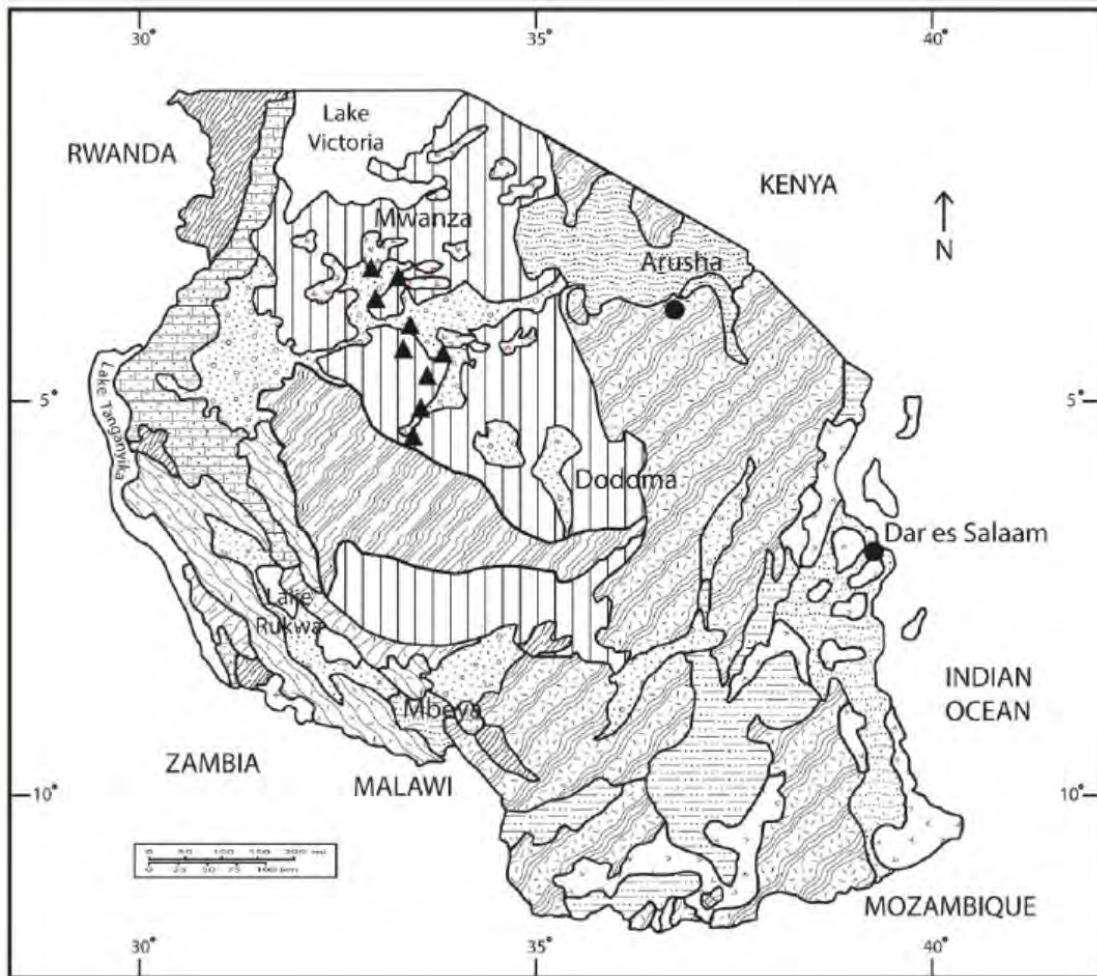
แท่งหินคิมเบอไลต์มหาสมุทรยุคมีโซโซอิก (Mesozoic kimberlite pipes): พบกระจายตัวอยู่ใน 6 จังหวัดด้านตะวันตกของประเทศ (รูปที่ 2.7) ได้แก่ ชินยังกา (Shinyanga) มवादุย (Mwadui) มาบูกิ (Mabuki) อ่าวสปีเค (Speke Gulf) ทะเลสาบไอยาซี (Lake Eyasi) และที่ราบสูงอิรัมบา (Iramba Plateau) โดยทั่วไปพบการกระจายตัวของหินคาร์บอนาไทต์ (carbonatite) ร่วมกับหินคิมเบอไรต์

❖ ซีโนโซอิกถึงปัจจุบัน (Cenozoic- Recent)

หินตะกอนยุคซีโนโซอิก (Cenozoic sedimentary rock): จากการชนกันทางด้านตะวันออกของแผ่นเปลือกโลกแอฟริกันระหว่างช่วงมีโซโซอิก และเกิดรวดเร็วมากขึ้นในช่วงปลายยุคซีโนโซอิก (Late Cenozoic) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางธรณีวิทยาที่สำคัญในแทนซาเนีย ซึ่งระบบแอ่งยุบตัวแอฟริกันตะวันออก (East African Rift system) ประกอบด้วยกราเบน (graben) หลายชุด ทำให้เกิดการสะสมตัวของตะกอนทางทะเล และทางบก (marine and continental sediments) ในแอ่งสะสมตัว

หินอัคนีภูเขาไฟยุคซีโนโซอิก (Cenozoic volcanic rock): การยุบตัว (rifting) สัมพันธ์กับกระบวนการเกิดภูเขาไฟ (volcanic activity) และน้ำพุร้อน (hot spring) ในช่วงไมโอซีน (Miocene) ถึงปัจจุบัน พบการกระจายตัวของหินอัคนีภูเขาไฟจำพวกอัลคาไลน์ (alkaline volcanic rock) และกึ่งอัลคาไลน์ (sub-alkaline volcanic rock) รวมถึงหินอัคนีบาดาลระดับตื้น (shallow intrusive) ในบริเวณอารูชา (Arusha) ทางตอนเหนือของแทนซาเนีย และมเบีย (Mbeya) ตะวันตกเฉียงเหนือของทะเลสาบยาซา (Nyasa) ซึ่งอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ

ดังนั้นสภาพภูมิอากาศตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการผุพังของหินอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความหนาของชั้นศิลาแลง (laterite) และชั้นดินเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงธรณีสัณฐานและโครงสร้างทางธรณีวิทยาอย่างรวดเร็ว ตั้งแต่การยุบตัว (rifting) ไปจนถึงกระบวนการสะสมตัวทางน้ำ (fluvial deposit) ทั้งบริเวณลาดเขาเอียง (elluvial deposit) และที่ราบลุ่ม (alluvial deposit) ทำให้เกิดการสะสมตัวเป็นแหล่งลานแร่ที่สำคัญมากมาย ทั้งทองคำ เพชร และอัญมณีอีกหลากหลายชนิดในประเทศ



รูปที่ 2.7 แสดงแผนที่ธรณีวิทยาประเทศแทนซาเนีย (จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ, 2557 ดัดแปลงจาก Geological Atlas of Africa, 2006)

2.2.2 ลักษณะธรณีวิทยาเหมืองคิรินดี

จากการศึกษาของจักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ (2557) ได้รายงานว่าเหมืองคิรินดี เป็นเหมืองทับทิม (ruby mine) ที่มีการดำเนินการขุดตั้งแต่ปี 2555 ตั้งอยู่ในเมืองคิรินดี (Kilindi) ซึ่งเป็นหนึ่งในแปดเมืองของเขตทังกา (Tanga) ในประเทศแทนซาเนีย โดยอยู่ทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของเมืองดาร์เอสซาลาม (Dar Es Salaam) ไปประมาณ 450 กิโลเมตร การทำเหมืองเริ่มจากการที่มีชาวบ้านในหมู่บ้านพบทับทิมในบริเวณดังกล่าว จึงเป็นจุดเริ่มต้นของการขอสัมปทานในการทำเหมือง

การทำเหมืองคิรินดี เป็นเหมืองเปิดหน้าดิน โดยใช้รถแบล็คโฮล (backhoe) ช่วยในการเปิดหน้าเหมือง เหมือง (รูปที่ 2.8) มีความลึกประมาณ 10 เมตร กว้างประมาณ 2,500 ตารางเมตร ใช้คนงานในการทำเหมืองทั้งหมดประมาณ 150 คน โดยคนงานจะมีหน้าที่หลายส่วนแตกต่างกัน ตั้งแต่การใช้รถขุด การใช้เครื่องมือขุดเจาะเพื่อให้หินที่ติดพลอยแตกออก ตักใส่กระสอบเพื่อรอการล้างร่อนพลอย และกลุ่มที่มีหน้าที่ล้างร่อนพลอย (รูปที่ 2.9 และ 2.10) โดยการทำเหมืองแต่ละวันใช้เงินลงทุนประมาณ 60,000 บาท ในปัจจุบันยังมีการทำเหมือง และส่งผลผลิตออกสู่ตลาดโลกอีกด้วย



รูปที่ 2.8 การเปิดหน้าเหมืองบริเวณเหมืองคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสัทธ์ ซาล่า)

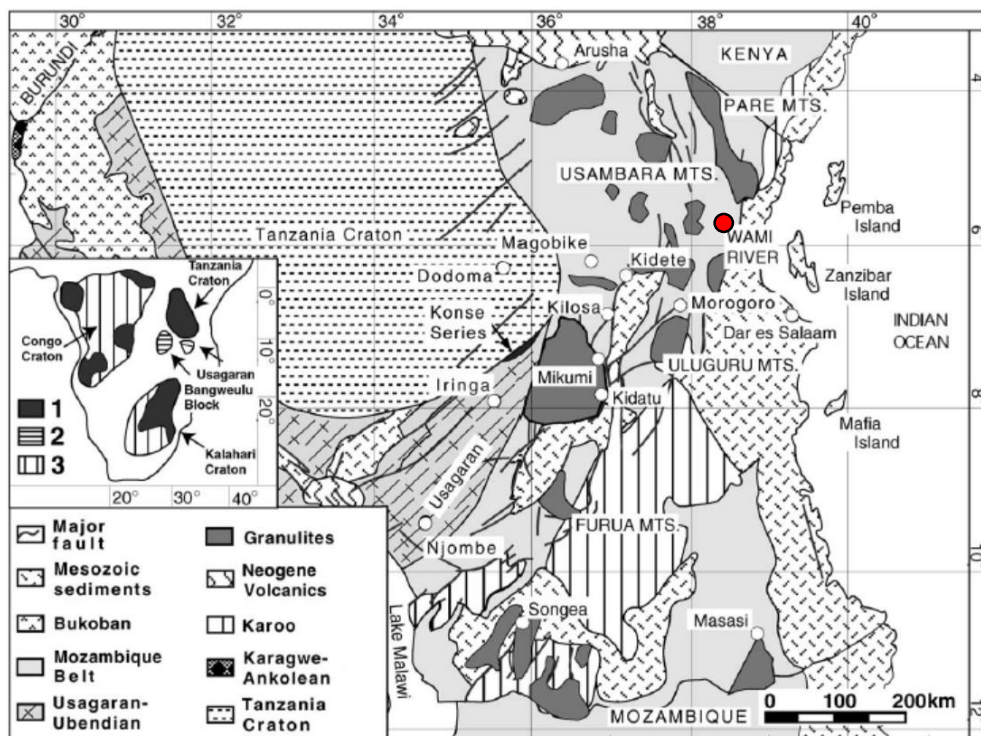


รูปที่ 2.9 คนงานเหมืองกำลังเจาะหินในบริเวณสายแร่ที่บ่อบริเวณเหมืองคิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสัทธ์ ซาล่า)



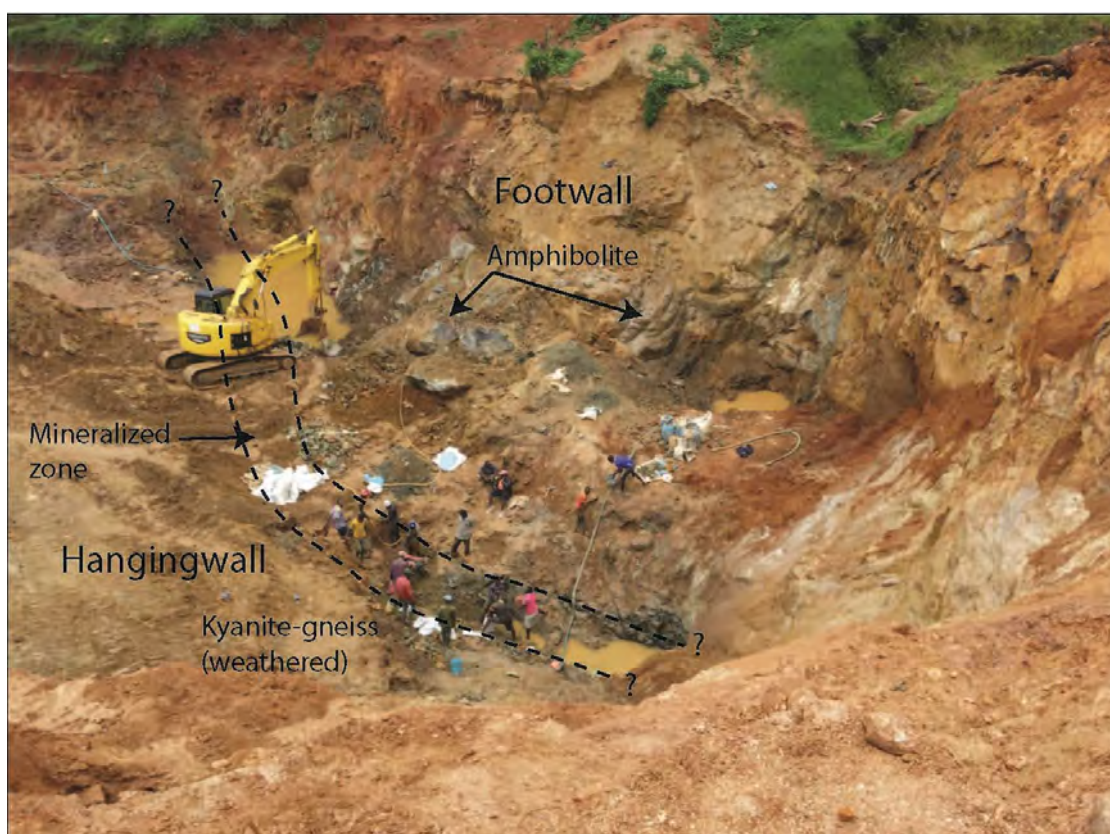
รูปที่ 2.10 กระบะล้างพลอย ซึ่งใช้น้ำชะล้างตะกอนขนาดเล็กให้สามารถเห็นพลอยที่บ่อบริเวณเหมืองคิรินดีได้ง่ายขึ้น (ภาพถ่ายโดย อภิสัทธ์ ซาล่า)

เหมืองที่บ่อบริเวณคิรินดีตั้งอยู่บริเวณระบบหินอุซาการัน (Usagaran System) ทางด้านตะวันออกของหินฐานธรณีแทนซาเนีย โดยรอยเลื่อนหลักในบริเวณแหล่งพลอยนี้ อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งในบริเวณใกล้เคียงกับแหล่งพลอยพบหินแปรแกรนูไลต์ (granulite) กระจายเป็นหย่อมๆ ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.11 แผนที่ธรณีวิทยาบริเวณกว้างแสดงตำแหน่งของเหมืองที่บ่อบริเวณคิรินดี จุดสีแดง (Sommer et al.,2005)

จากบันทึกรายงานการออกภาคสนามส่วนตัวของอภิสิทธิ์ ซาล่า กล่าวว่าพื้นที่ที่ตั้งของเหมืองเป็นเขาสูง ส่วนหินที่พบบริเวณทางเข้าเหมือง โดยเฉพาะตามไหล่ทางที่มีการเปิดหน้าดินเพื่อทำถนนพบหินโผล่ส่วนใหญ่เป็นพวกหินไนส์ (gneiss) แสดงริ้วขนาน (foliation) ชัดเจน การทำเหมืองในบริเวณนี้เป็นการเปิดหน้าดินตามแนวรอยต่อระหว่างหินที่มีการแปรสภาพสองชนิดแตกต่างกัน (รูปที่ 2.12) ระหว่างหินสีเขียวเข้ม ซึ่งคาดว่าจะเป็กลุ่มหินแอมฟิโบลิต์ (amphibolites) (รูปที่ 2.13) และกลุ่มหินสีอ่อน (รูปที่ 2.14) คาดว่าจะเป็นหินไนส์ (gneiss) ประกอบด้วยแร่ควอร์ตซ์ (quartz) ไคยาไนต์ (kyanite) และไมก้า (mica) ซึ่งแนวรอยต่อนี้ มีขนาดความกว้างประมาณ 3 เมตร โดยจะพบทับทิม (ruby) อยู่ในหินแอมฟิโบลิต์ (amphibolites) และบริเวณกลางแนวรอยต่อ ในลักษณะของสายแร่ ซึ่งมีความยาวไม่ต่ำกว่า 100 เมตร (รูปที่ 2.12 และ 2.15)



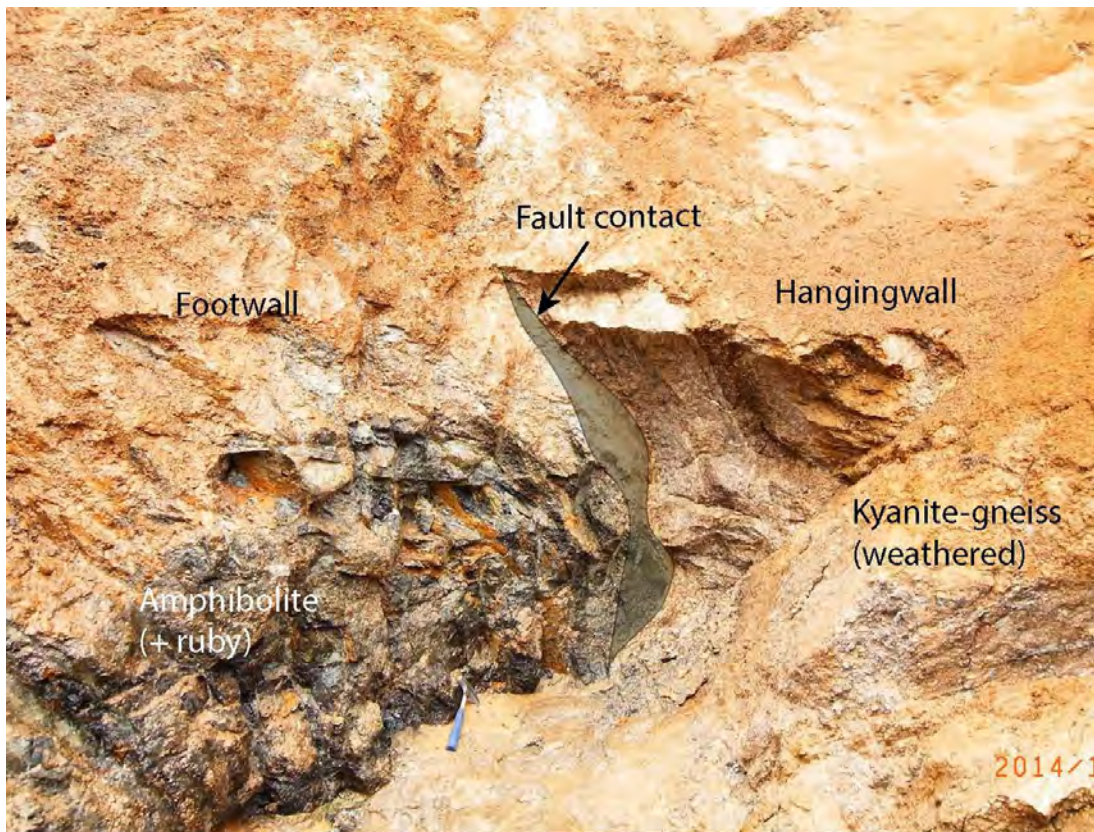
รูปที่ 2.12 ภาพรวมของเหมืองครินติ แสดงบริเวณสายแร่ทับทิมซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหิน 2 ชนิด (ภาพถ่ายโดย อภิสิทธิ์ ซาล่า)



รูปที่ 2.13 หินแอมฟิโบลิต (amphibolites) บริเวณเหมืองคิรินตี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธิ์ ซาล่า)



รูปที่ 2.14 กลุ่มหินสีอ่อน บริเวณเหมืองคิรินตี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธิ์ ซาล่า)



รูปที่ 2.15 บริเวณสายแร่ทับทิมซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างหิน 2 ชนิด (ภาพถ่ายโดย อภิสิตธิ์ ซาล่า)

หินที่พบบริเวณรอยต่อมีลักษณะค่อนข้างผุทำให้สามารถขุดเจาะได้ง่าย แร่ที่พบอยู่ในหินประกอบด้วย แร่ไคยาไนต์สีฟ้า (blue kyanite) รูปผลึกสมบุรณ์ มีขนาดเฉลี่ยประมาณ 1 เซนติเมตร เกิดร่วมกับทับทิม (ruby) และแร่ควอร์ตซ์ (quartz) โดยแร่ไคยาไนต์สามารถบดเป็นผงได้ด้วยมือเปล่า ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นอัญมณีได้ (รูปที่ 2.16)



รูปที่ 2.16 แร่ไคยาไนต์ (kyanite) จากแหล่งศิรินดี
(ภาพถ่ายโดย อภิสิตี ซาล่า)



รูปที่ 2.17 ทับทิม จากแหล่งศิรินดี (ภาพถ่ายโดย อภิสิตี ซาล่า)

ทับทิม (ruby) ที่พบส่วนใหญ่มีสีม่วงแดง โปรงแสง แต่มีรอยแตกค่อนข้างมาก (รูปที่ 2.17) ซึ่งเป็นคุณภาพที่มักนำมาใช้ในการเจียรระโนแบบหลังเบี้ย (cabochon) ในช่วงแรกของการเปิดหน้าเหมืองพบทับทิมคุณภาพดีเล็กน้อย และยังพบการ์เนต (garnet) ขนาดเล็กได้บ้าง ทับทิมขนาดใหญ่สุดที่พบมีขนาด 5 กรัม และผลผลิตที่ได้ประมาณ 6 ถึง 10 กิโลกรัมต่อวัน

2.3 แนวทางวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะพลอยทับทิม

การวิเคราะห์พลอยเพื่อหาลักษณะเฉพาะนั้น มีวิธีการหลากหลายวิธีเพื่อให้ได้มาซึ่งหลักฐานและข้อมูลที่เกี่ยวข้องแก่การระบุแหล่งกำเนิดของพลอยเม็ดนั้นๆ จากงานวิจัยของ Diep (2015) ได้ใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสงในย่านแสงเหนือม่วง-มองเห็น-ใต้แดงใกล้ (UV-Vis-NIR) ตรวจสอบการดูดกลืนของแสง ที่เกิดจากร่องรอย เพื่อให้ได้รูปร่างของสเปกตรัมการดูดกลืนที่ส่งผลให้เกิดสี และสีแฝด (Pleochroism) การใช้เครื่องฟลูออเรสเซนซ์ฟอรัม อินฟราเรด สเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) สังเกตการกระตุ้นตัวอย่างพลอยด้วยพลังงานแสงช่วงแสงใต้แดง (infrared light) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ให้ทราบถึงโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชัน เช่น hydroxyl (-OH) โดยเฉพาะ ALOOH สามารถตรวจสอบการปรับปรุงคุณภาพได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังใช้เครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) เพื่อระบุชนิดของมลทินภายในเม็ดพลอย และท้ายที่สุดเป็นการประยุกต์ใช้เครื่อง EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) เพื่อหาธาตุองค์ประกอบเคมีเชิงปริมาณ ด้วยการวิเคราะห์ที่มีความถูกต้องและความแม่นยำสูง

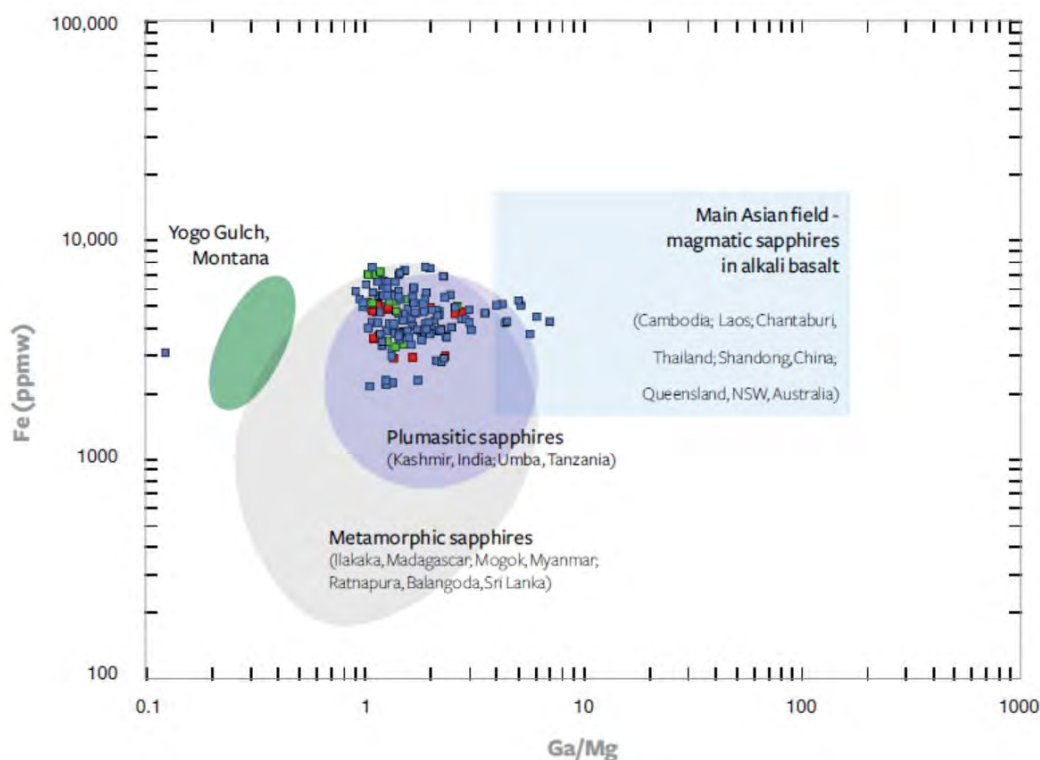
Seifert and Hyrst (1999) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของแซปไฟร์จากแหล่งคาลาลานี (Kalalani) เขตทังกา (Tanga) ประเทศแทนซาเนีย ได้ว่าแซปไฟร์สีส้มอมแดง รูปที่ 2.18 มีค่าดัชนีการหักเหแสง (Refractive index : RI) ระหว่าง 1.768 ถึง 1.777 ได้ว่าค่าไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) เท่ากับ 0.009 คำนวณค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity : SG) เท่ากับ 3.98 ได้ผลจากเครื่อง EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) เป็น 0.9 wt.% Fe_2O_3 และ 0.15 wt.% Cr_2O_3 ส่วนธาตุร่องรอยอื่นๆ มีปริมาณน้อยกว่าค่าขีดจำกัดการตรวจหา (Detection Limit) สเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนอยู่ที่ 700, 693 และ 557 nm แถบที่ 450, 388, และ 376 nm และดูดกลืนชัดเจนที่ 490 nm ไม่แสดงการเรืองแสงภายใต้แสงเหนือม่วง มีมลทินขนาดเล็กมาก ประมาณ 0.05 mm โดยมากพบเป็นแผ่นและแสดงเส้นแฝด (twin lines)



รูปที่ 2.18 แซปไฟร์สีส้มอมแดง จากแหล่งคาลาลานี
(ภาพถ่ายจาก © GIA โดย Tino Hammid)

นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Zwaan et al. (2015) ที่ได้นำค่าปริมาณธาตุองค์ประกอบจากเครื่องแอลเอไอซีพีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Laser Ablation-Inductively Couple Plasma-Mass Spectrometer, LA-ICP-MS) เพื่อใช้ระบุแหล่งกำเนิดของพลอย โดยการสร้างกราฟปริมาณธาตุร่องรอย กับอัตราส่วน โดยใช้ อัตราส่วน Ga/Mg เทียบกับ Fe (ppm) ดังรูปที่ 2.19 แยกระหว่างแซปไฟร์จากหินแปร (metamorphic sapphires) และแซปไฟร์จากหินอัคนี (magmatic sapphires) เช่นที่พบในหินอัลคาโลบะซอลต์ (alkali basalts) และหินไซยีนิต (syenite) แซปไฟร์จากแปรสภาพแบบแทนที (metasomatic) (หรือเรียกอย่างเฉพาะเจาะจงว่า “plumasitic”) ก็สามารถแยกด้วยกราฟนี้ได้เช่นกัน โดยจะสัมพันธ์กับของเหลวที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างหินอัลตราเมฟิก หรือหินเมฟิก เช่น หินเซอร์เพนทีไนต์ (serpentinites) หินแอมฟิโบไลต์ (amphibolites) และหินอ่อน

(marbles) กับหินเฟลสิก ที่มีปริมาณอลูมิเนียมสูง (aluminum-rich rocks) เช่น หินแกรนิต (granites) หินเพกมาไทต์ (pegmatites) และหินพาราไนส์ (paragneisses)

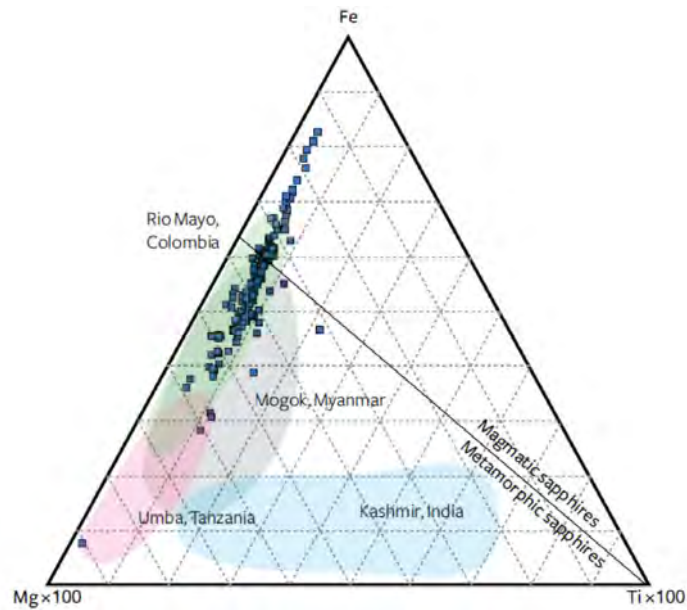


รูปที่ 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ที่แบ่งแยกระหว่างแซปไฟร์จากหินแปร (metamorphic sapphires) และแซปไฟร์จากหินอัคนี (magmatic sapphires)

แสดงองค์ประกอบของแซปไฟร์จากที่ราบลุ่มมอนตানা (alluvial Montana sapphires)

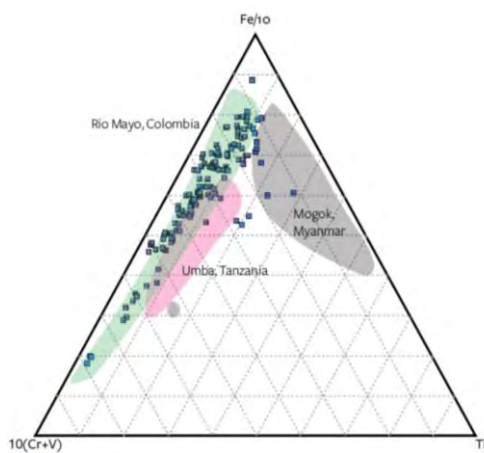
สี่เหลี่ยมสีฟ้า เขียว และแดง ซึ่งแสดงถึงธาตุมลทินที่แตกต่างกัน (Zwaan et al., 2015)

จากแผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ (ternary phase diagram) รูปที่ 2.20 แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ti (ppm) จะเห็นว่าตัวอย่างแซปไฟร์จากที่ราบลุ่มมอนตানা (alluvial Montana sapphires) มีแนวโน้มขององค์ประกอบไปในทิศทางเดียวกันกับแซปไฟร์จากอุมบา (Umba) ริโอ มาโย (Rio Mayo) และโคลอมเบีย (Colombia) แม้ว่าแซปไฟร์จากที่ราบลุ่มมอนตানা จะแสดงออกมาทั้งสองฝั่งของเส้นแบ่งแยกระหว่างแซปไฟร์จากหินแปร (metamorphic sapphires) และแซปไฟร์จากหินอัคนี (magmatic sapphires) แต่เห็นได้ชัดว่าไม่ได้อยู่ในบริเวณที่เป็นแนวโน้มของฝั่งแซปไฟร์จากหินอัคนี ในด้าน Fe-Ti จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นแซปไฟร์จากหินแปรมากกว่า นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าแม้จะมีการซ้อนทับกันกับแซปไฟร์จากโมกอก (Mogok) แต่ก็สามารถแยกได้จากแซปไฟร์จากแคชเมียร์ (Kashmir sapphires) ที่มีองค์ประกอบของ Ti สูง ได้อย่างชัดเจน

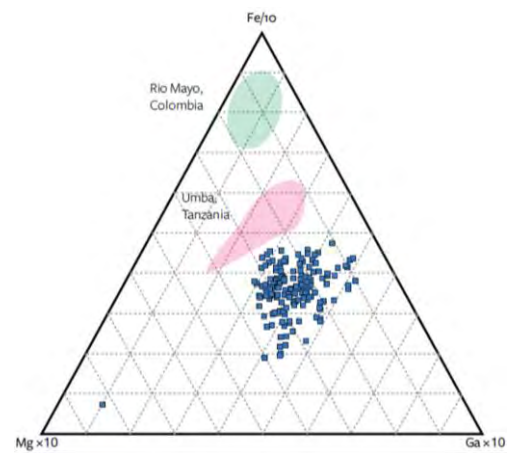


รูปที่ 2.20 แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ (ternary phase diagram) แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ti (ppmw) (Zwaan J.C. et al., 2015)

การซ้อนทับกันนี้สามารถใช้แบ่งแหล่งกำเนิดได้อีกในแผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ ที่แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-(Cr+V)-Ti (ppm) รูปที่ 2.21 แม้แซปไฟร์จากมอนตানা จะมีแนวโน้มขององค์ประกอบไปในทิศทางเดียวกันกับแซปไฟร์จากโคลอมเบีย (Colombia) และอุมบา (Umba) แต่สามารถแยกแซปไฟร์จากโมกอก (Mogok) ออกได้อย่างชัดเจน เช่นเดียวกับแผนภาพที่แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ga (ppm) ที่สามารถแยกแซปไฟร์จากมอนตানা (Montana) ริโอมาโย (Rio Mayo) และจากอุมบา (Umba) ออกจากกันอย่างชัดเจน (รูปที่ 2.22)



รูปที่ 2.21 แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-(Cr+V)-Ti (ppmw) (Zwaan J.C. et al., 2015)



รูปที่ 2.22 แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ แสดงองค์ประกอบระหว่าง Fe-Mg-Ga (ppmw) (Zwaan J.C. et al., 2015)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

สำหรับโครงการวิจัยในหัวข้อ “ลักษณะเฉพาะของพลอยทับทิมจากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย” ได้แบ่งลำดับขั้นตอนวิธีวิจัยออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา ดังรูป 3.1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

3.1.1. รวบรวม ศึกษา และประมวลผลข้อมูลทางด้านทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวบรวม ศึกษา และประมวลผลจากหนังสือ รายงาน เอกสาร และงานวิจัยเก่า ที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการทางธรณีวิทยาบริเวณที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา แหล่งคิรินดี (Kilindi) เขตทานกา (Tanga) ประเทศแทนซาเนีย (Tanzania) ทั้งวิวัฒนาการทางธรณีแปรสัณฐาน และโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่สำคัญ รวมไปถึงการทำเหมือง และกลุ่มหินในท้องที่ ศึกษาการเลือกใช้เครื่องมือและวิธีการที่จะนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างพลอย เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ศึกษาลักษณะของพลอยทับทิม และแซปไฟร์จากประเทศแทนซาเนีย และแหล่งอื่นๆ เพื่อสามารถนำมาประยุกต์เป็นข้อมูลเบื้องต้น เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ และได้มาซึ่งผลสรุปที่น่าเชื่อถือ มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

3.1.2. วางแผนการดำเนินงาน คัดเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างพลอยเพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือขั้นสูง

คัดเลือก และจัดเตรียมตัวอย่างพลอย โดยเลือกตัวอย่างแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Random Sampling) จากพลอยทับทิมดิบ แหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย ซึ่งเป็นพลอยภายใต้โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT พลอยทับทิมจำนวน 26 เม็ด ที่มีคุณภาพดีรอยแตกน้อยเหมาะแก่การศึกษาวิจัย ได้ถูกคัดเลือกมาขัดเงาหน้าพลอยตั้งฉากแกนแสง เป็นหน้าเรียบบาง ให้แสงสามารถส่องผ่านได้ เพื่อให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์พลอยตัวอย่างด้วยเครื่องมือขั้นพื้นฐาน และเครื่องมือขั้นสูงในลำดับถัดไป

3.1.3 ตรวจสอบสมบัติพื้นฐานทางอัญมณี

1. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทั่วไปของอัญมณี เช่น สี, รูปร่าง และขนาด และใช้เครื่องมือ Hydrostatic Balance, UV lamp, Refractometer และ Gemological Microscope
2. ตรวจสอบลักษณะทางแสง ด้วยเครื่องมือ UV-VIS-NIR Spectrophotometer และ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) และ Laser Raman Spectroscope
3. ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี ของตัวอย่างทับทิมโดยวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก และธาตุองค์ประกอบรองด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer และ Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)

3.1.4. รวบรวมผลข้อมูลที่ได้จากการศึกษา ทำการวิเคราะห์ และแปลความหมาย

นำผลข้อมูลจากการศึกษาในแต่ละขั้นตอน โดยเฉพาะผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง เช่น ธาตุองค์ประกอบ, การดูดกลืนแสง, องค์ประกอบภายในโมเลกุล และชนิดมลทิน ทำการทำการวิเคราะห์ และแปลความหมาย

3.1.5. อภิปราย สรุป และนำเสนอโครงการวิจัย

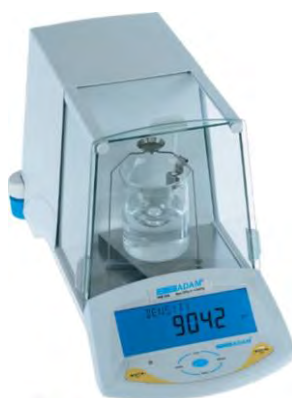
ศึกษาแนวโน้มลักษณะเฉพาะของพอลอยทาบิซึมจากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย เปรียบเทียบกับพอลอยทาบิซึมจากแหล่งอื่น และจากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดนำมาเชื่อมโยงกับลักษณะทางธรณีวิทยาในรายงานการวิจัยต่างๆที่ได้ทำการศึกษาในขั้นตอนแรก เพื่อให้ทราบถึงแหล่งกำเนิด และลักษณะเฉพาะทางธรณีวิทยาบริเวณแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย นำเสนอในรูปแบบสัมมนา และจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

❖ **ศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Physical properties) ประกอบด้วย**

Hydrostatic Balance

เครื่องมือชั่งน้ำหนัก ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ชั่งในอากาศ และในน้ำ เพื่อคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะของอัญมณี โดยมีกระจกใสล้อมรอบเพื่อป้องกันการเกิดค่าความคลาดเคลื่อนจากสภาวะแวดล้อมภายนอก (รูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 เครื่อง Hydrostatic Balance

จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Refractometer

เครื่องมือวัดค่าดัชนีหักเหของแสง ซึ่งใช้ร่วมกันกับน้ำยาเมทิลีนไอโอดีน หรือน้ำยาอาร์ไอ (RI liquid) ที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.81 (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เครื่อง Refractometer และน้ำยาอาร์ไอ
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

UV Lamp

หลอดรังสีเหนือม่วงคลื่นสั้น และคลื่นยาว ใช้ตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณีภายใต้รังสีเหนือม่วงคลื่นสั้น และคลื่นยาว (รูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 ตู้ UV Lamp
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

❖ **ศึกษาลักษณะทางแสง (Optical properties) ประกอบด้วย**
กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope)

เครื่องมือศึกษาลักษณะผิวภายนอก และลักษณะภายในของอัญมณี โดยหากใช้แสงไฟแบบธรรมดา เมื่อส่องผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะแยกความแตกต่างระหว่างมลทินกับเนื้อพลอยได้ยาก เพราะตัวอย่างมักจะมีควมใส หรือโปร่งแสงเช่นเดียวกับมลทิน หรือมีแสงสะท้อนทำให้เห็นเฉพาะผิวภายนอก ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อัญมณีจึงมีระบบ dark field เพื่อใช้แยกมลทินได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 3.5)



รูป 3.5 กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope)
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

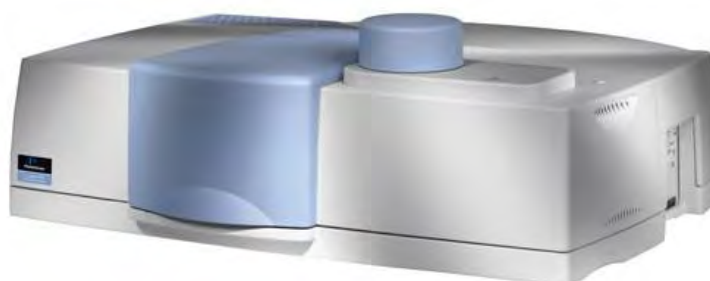
เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบภายในโมเลกุล จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorption) หรือการให้แสงผ่าน (transmission) เนื่องจากปฏิกิริยาระดับอะตอมขององค์ประกอบโมเลกุลของพลอยที่เกิดขึ้นเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด สามารถใช้ในการตรวจสอบการปรับปรุงคุณภาพบางประเภท และอาจจะเป็นข้อมูลประกอบการบ่งชี้แหล่งกำเนิดทางธรณีวิทยาบางประเภท โดยพิจารณาจากรูปแบบการดูดกลืน หรือการให้แสงผ่านจากคลื่นแสงอินฟราเรด (รูป 3.6)



รูป 3.6 เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

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

เครื่องมือวัดค่าการส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างย่าน Ultraviolet (UV), Visible (ViS) และ Near Infrared (NIR) เมื่อตกกระทบตัวอย่างทดสอบ ใช้ในการศึกษาสาเหตุการเกิดสีในอัญมณี เพื่อให้ทราบถึงธาตุร่องรอยบางชนิด ที่อาจบ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดอัญมณีบางประเภทได้ โดยเครื่องที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ Perkin Elmer Precisely และ Lambda950 เป็นเครื่องตรวจจับและดูการดูดกลืนในช่วงคลื่นตั้งแต่ 250-1500 นาโนเมตร (รูป 3.7)



รูป 3.7 เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Laser Raman Spectroscopy

เครื่องมือศึกษาแบบปรากฏการณ์ Raman Shift จากการสั่นแบบยืด(stretching) หรือแบบงอ (bending) เมื่ออะตอม หรือโมเลกุลในโครงสร้างพลอยได้รับพลังงานจากแสงเลเซอร์ ทำให้อะตอม หรือโมเลกุล เกิดการสั่น และมีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่ของแสงตกกระทบเดิม เรียกว่า การเลื่อนตัวของรามาน (Raman Shift) โดยอัญมณี และมลทินแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลื่อนตัวของรามานแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของโครงสร้างของโมเลกุล (Raman Shift Patterns) จึงสามารถใช้บอกชนิดของมลทินในอัญมณีได้ โดยเลือกดู Raman Shift ที่ 200-1500 (รูป 3.8)



รูป 3.8 เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Renishaw จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

❖ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis)

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer

เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียม โดยมีหลักการคือ ปล่อยรังสีเอ็กซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมในธาตุนั้นหลุดออกไป อิเล็กตรอนวงนอกถัดมาจะเข้ามาแทนที่ และคายพลังงานออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence) ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของธาตุนั้น (รูป 3.9)



รูป 3.9 เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA)

เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ถึงระดับไมโครเมตร (micro-analysis) โดยหลักการคือ ยิงลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งทำให้องค์ประกอบภายในตัวอย่างปล่อยอิเล็กตรอน และรังสีเอ็กซ์เรย์ในลักษณะเฉพาะของแต่ละธาตุ โดยปริมาณธาตุที่สนใจ และนำมาศึกษาวิเคราะห์ คือ Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 , FeO , MnO , TiO_2 , SiO_2 , CaO , V_2O_5 , K_2O และ Ga_2O_3 (รูป 3.10)



รูป 3.10 เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100
จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*หมายเหตุ รูปภาพเครื่องมือรูปที่ 3.2 ถึง 3.10 จากเว็บไซต์ออนไลน์

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

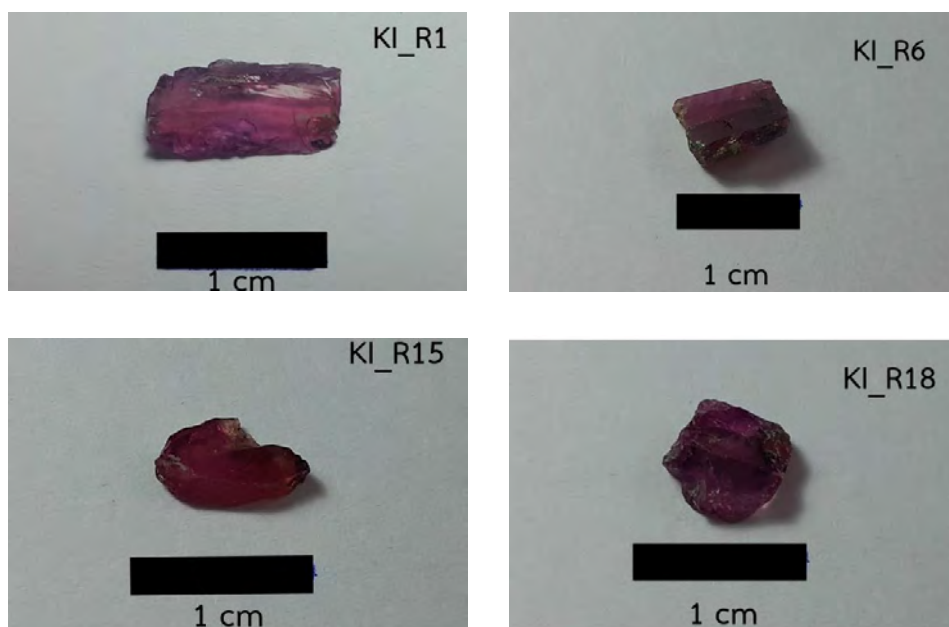
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ลักษณะทั่วไป

ตัวอย่างพลอยทับทิมที่นำมาศึกษานั้นเป็นตัวอย่างพลอยทับทิมจากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย ซึ่งเป็นพลอยภายใต้โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT จำนวนทั้งหมด 26 ตัวอย่าง มีลักษณะสีแดงอมม่วง ความโปร่งใส (Transparency) หรือระดับของการยอมให้แสงส่องผ่าน คือ กึ่งทึบแสง (Semi-opaque) ถึง โปร่งแสง (Translucent) คุณภาพต่ำ เพราะเนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น มีรอยแตกภายในค่อนข้างมาก และมีมลทินภายในที่เห็นชัด เนื่องจากมีสีเข้มกว่าเนื้อพลอย โดยตัวอย่างพลอยนี้ผ่านการเจียรใน 2 ด้าน ตั้งฉากแกนแสงของพลอยแต่ละเม็ด

ตัวแทนกลุ่มตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยภาพตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก



รูปที่ 4.1 ภาพตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R1 , KI_R6, KI_R15, KI_R18)

ตัวอย่างทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทางอัญมณีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณี ดังได้สรุปไว้ในตาราง 4.1 และรายละเอียดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

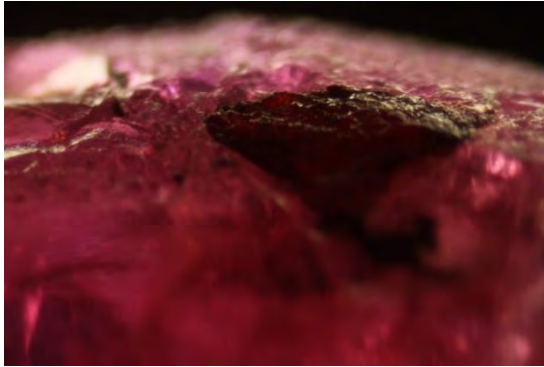
Color	Transparency	Weight (ct)	SG (g/cm ³)	RI		Birefringence	Fluorescence	
				no	ne		LW	SW
Purple red	Semi-opaque to Translucent	0.891- 7.6055 (2.9150)	3.822- 4.059 (3.917)	1.761- 1.765 (1.763)	1.771- 1.775 (1.772)	0.006-0.011 (0.008)	Weak Red	Inert

4.2 มลทินภายใต้กล้องจุลทรรศน์

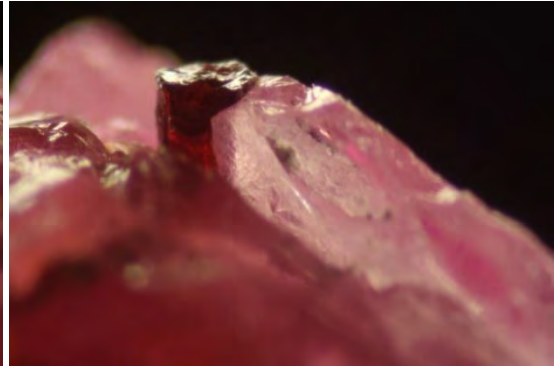
การศึกษามลทินเนื้อในภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี ในตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย พบว่าเนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น มีรอยแตกภายในค่อนข้างมาก และมีปริมาณมลทินภายในค่อนข้างมาก และเห็นได้ชัด เนื่องจากมลทินมีสีเข้มกว่าเนื้อพลอย โดยในเม็ดพลอยกลุ่มที่มีมลทินผลึกแร่มาก มักมีลักษณะค่อนข้างโปร่งแสง ส่วนเม็ดพลอยกลุ่มที่มีรอยแตกมาก มักมีเนื้อค่อนข้างสกปรก พบมลทินผลึกแร่อ่อนข้าน้อย มลทินที่พบส่วนใหญ่เป็น มลทินผลึกแร่ (mineral inclusion) และมลทินอื่นๆที่พบ ได้แก่ มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal), มลทินผลึกแร่ ที่มีมลทินผลึกแร่อ่อนภายใน (Two-phase inclusion), รอยแตก (Fracture), มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก (Growth line), มลทินรอยแตกผสมลายนิ้วมือ (Fingerprint), มลทินคราบสนิมเหล็ก (iron strain), มลทินแถบสี (Color banding), มลทินระนาบแฝด (Twin plane), มลทินอนุภาคขนาดเล็ก (minute particles), และมลทินหม่าขุ่นขาวนํ้านม (milky cloud)

- **ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย**

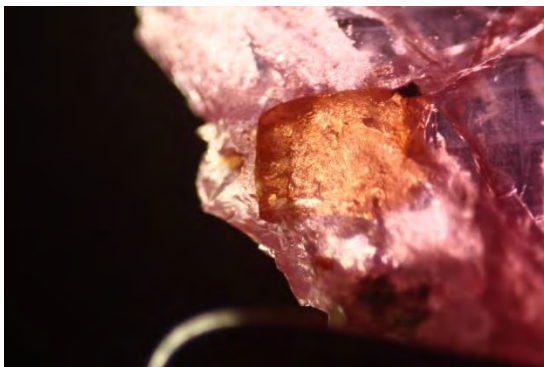
สำหรับมลทินผลึกแร่ที่ปรากฏบริเวณใกล้ผิวอัญมณี จะถูกนำไปวิเคราะห์ชนิดของแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope และ EPMA เพื่อให้ทราบถึงชนิดของมลทินนั้นๆ



รูปที่ 4.2 ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x40 (KI_R9)



รูปที่ 4.3 ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x50 (KI_R16)



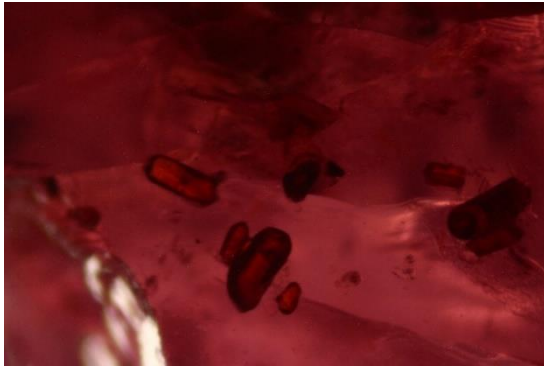
รูปที่ 4.4 ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x20 (KI_R17)



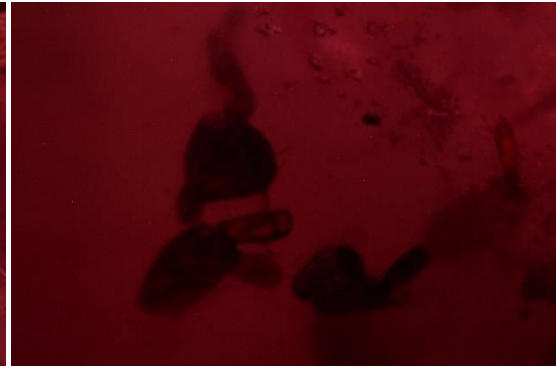
รูปที่ 4.5 ผลึกแร่บริเวณผิวเม็ดพลอย กำลังขยาย x32 (KI_R18)

- **มลทินผลึกแร่ (Mineral inclusion)**

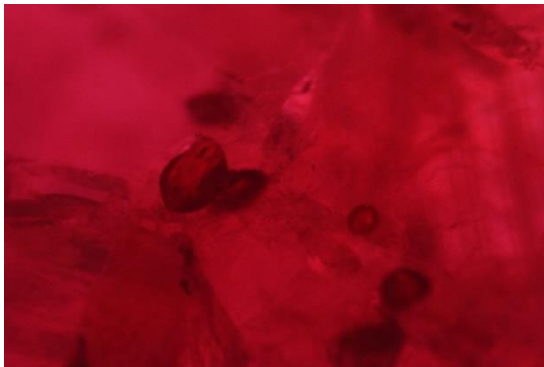
มลทินผลึกแร่ ที่พบเป็นส่วนใหญ่ คือมลทินผลึกทรงกลมถึงทรงรี มักอยู่เกาะกลุ่มกันเป็นกระจุก ซึ่งตัวมลทินมีสีแดงเข้มกว่าเนื้อพลอย ทำให้ในเม็ดพลอยตัวอย่างที่มีมลทินประเภทนี้ขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นมลทินได้ชัดเจน แม้มองด้วยตาเปล่า (รูปที่ 4.6-4.13)



รูปที่ 4.6 มลทินผลึกแร่ทรงรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R7)



รูปที่ 4.7 มลทินผลึกแร่ทรงรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R7)



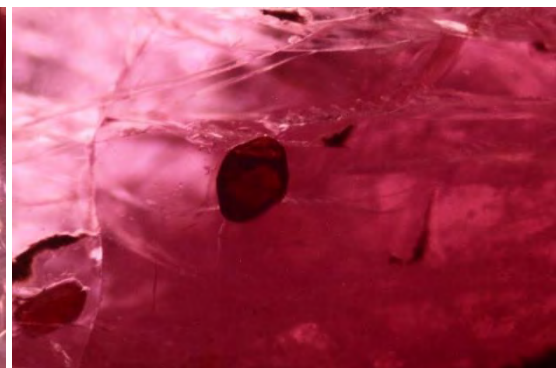
รูปที่ 4.8 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R9)



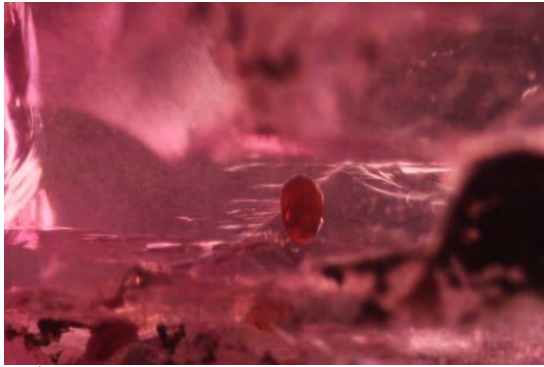
รูปที่ 4.9 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)



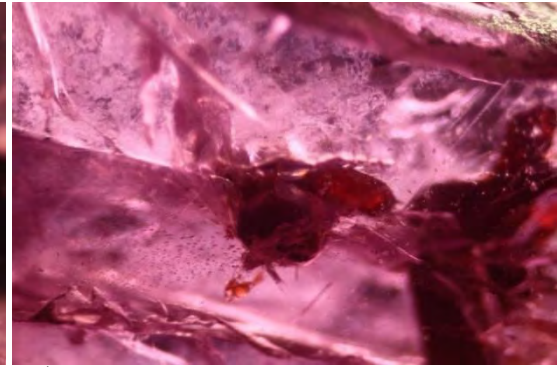
รูปที่ 4.10 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R13)



รูปที่ 4.11 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x40 (KI_R11)

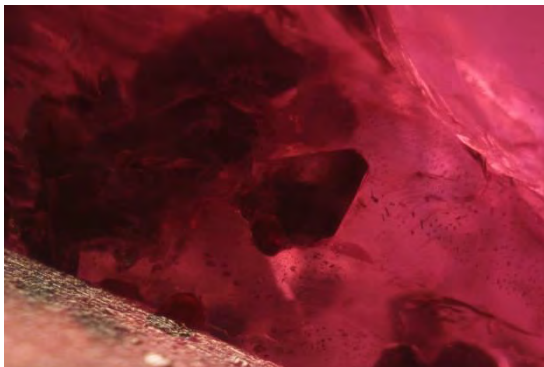


รูปที่ 4.12 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x40 (KI_R12)



รูปที่ 4.13 มลทินผลึกแร่กลมรี สีแดงเข้ม กำลังขยาย x32 (KI_R18)

นอกจากนี้ยังพบมลทินผลึกแร่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน (รูปที่ 4.14) บ้างมีรูปทรงห้าเหลี่ยม ด้านไม่เท่า (รูปที่ 4.15) ขอบค่อนข้างมน สีแดงเข้มถึงเข้มมาก มักพบเป็นผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ หรือพบเป็นกลุ่ม แต่จะมีขนาดเล็ก (รูปที่ 4.16)



รูปที่ 4.14 มลทินผลึกแร่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)

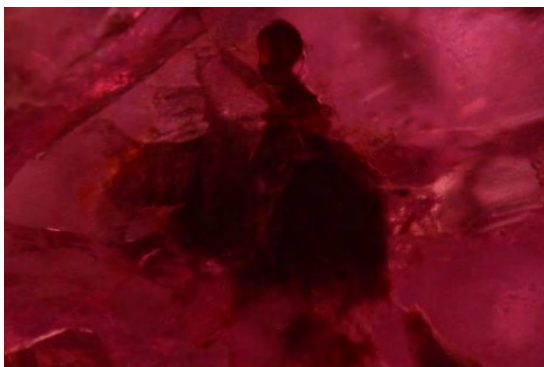


รูปที่ 4.15 มลทินผลึกแร่รูปห้าเหลี่ยมด้านไม่เท่า สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R8)

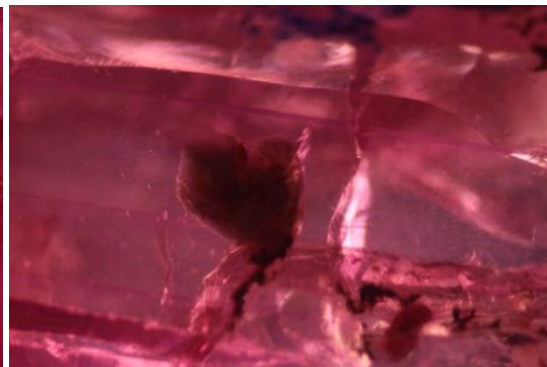


รูปที่ 4.16 มลทินผลึกแร่รูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R3)

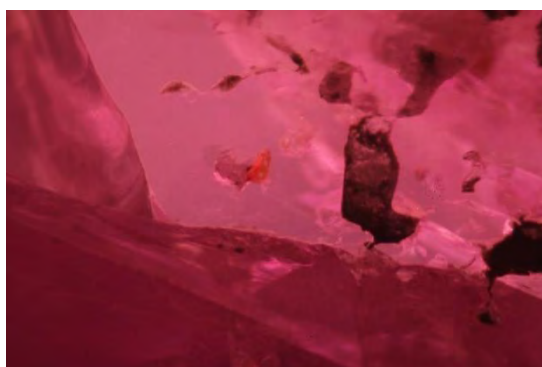
มลทินผลึกแร่ที่ไม่มีรูปร่างชัดเจน มักมีขอบไม่ชัดเจน บางด้านของขอบผลึกจะจางหายไปกับเนื้อพลอย บ้างกลายเป็นเส้นแนวยาวคล้ายหยากไย่ออกมาจากตัวมลทินนั้นๆ โดยมีสีแดงเข้มมาก (รูปที่ 4.17-4.19)



รูปที่ 4.17 มลทินผลึกแร่ที่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม
กำลังขยาย x50 (KI_R4)

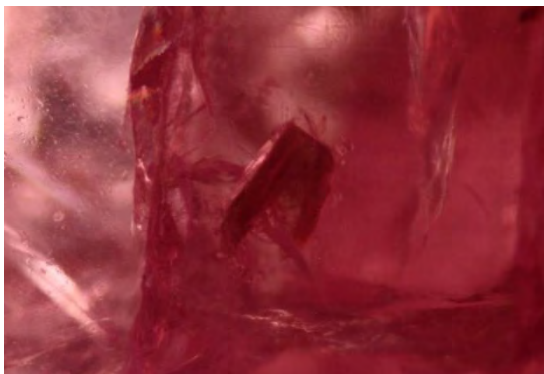


รูปที่ 4.18 มลทินผลึกแร่ที่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม
กำลังขยาย x32 (KI_R12)



รูปที่ 4.19 มลทินผลึกแร่ที่ไม่มีรูปร่างชัดเจน สีแดงเข้ม กำลังขยาย x50 (KI_R6)

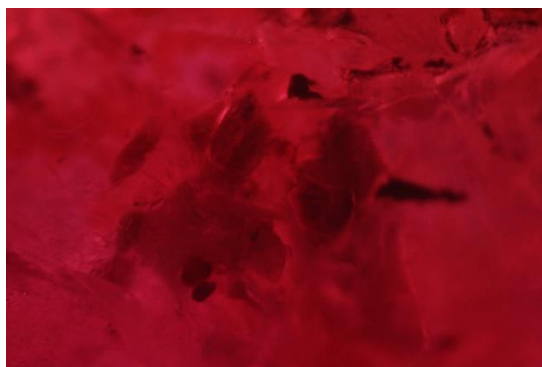
และมลทินผลึกแร่แบบสุดท้ายที่พบ นั้นคือมลทินผลึกแร่ที่พบเป็นรูปทรงแปลกประหลาด มีสี
แดงทึบ ไม่มีรูปร่าง หรือลักษณะที่แน่นอน (รูปที่ 4.20-4.22)



รูปที่ 4.20 มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ
กำลังขยาย x50 (KI_R14)



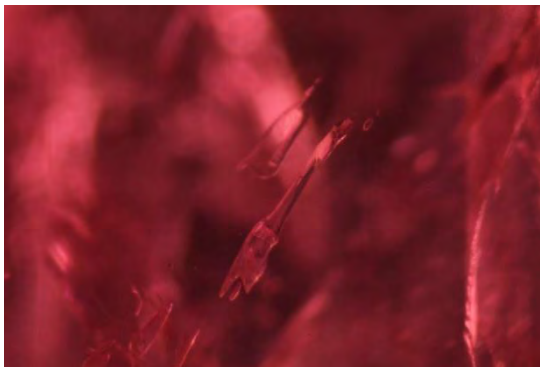
รูปที่ 4.21 มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ
กำลังขยาย x50 (KI_R13)



รูปที่ 4.22 มลทินผลึกแร่รูปทรงแปลกประหลาด สีแดงทึบ กำลังขยาย x40 (KI_R9)

- **มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal)**

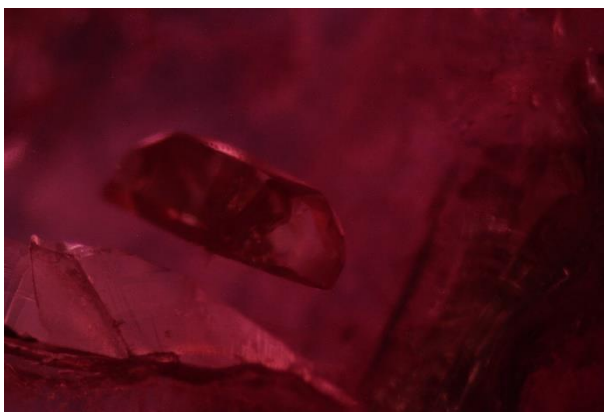
เป็นมลทินที่เกิดจากการเย็นตัวตามผลึก เกิดช่องว่างในเนื้อพลอยตามลักษณะของผลึก พบเป็นเส้นแนวยาวไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 4.23 มลทินผลึกเนกาทีฟ กำลังขยาย x50 (KI_R25)

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

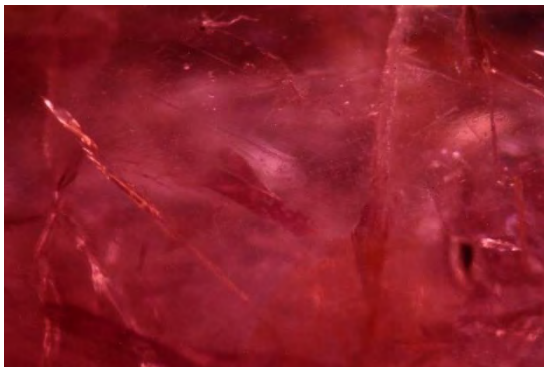
มลทินผลึกแร่ซ้อนภายใน โดยมลทินภายนอกมีลักษณะเป็นทรงรี มีความเหลี่ยมเล็กน้อย ส่วนมลทินภายในมีลักษณะเป็นทรงกลมค่อนรี สีแดงเข้ม ซึ่งมลทินภายในนี้ เป็นมลทินชนิดที่พบมากในพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



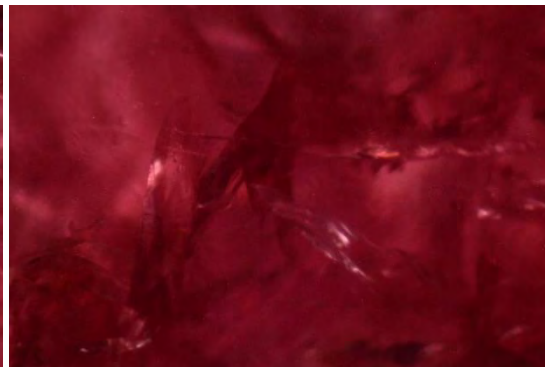
รูปที่ 4.24 มลทินผลึกแร่ ที่มีมลทินผลึกแร่ซ้อนอยู่ภายใน กำลังขยาย x40 (KI_R17)

- รอยแตก (Fracture)

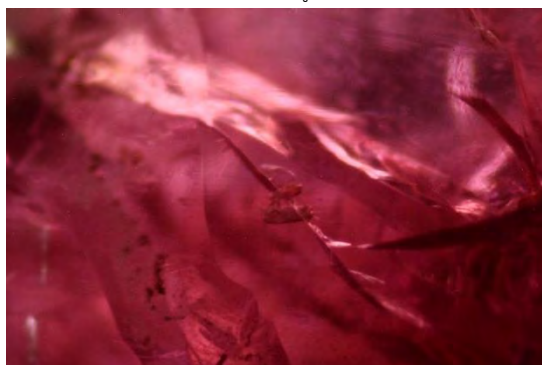
ภายในเนื้อพลอยมักพบรอยแตกกระจายอยู่โดยทั่ว โดยเป็นรอยแตกที่ซ้อนทับซับซ้อนกันไปมา (รูปที่ 4.25-4.26) บ้างพบเป็นรอยแตกที่ตัดแทรกมลทินชนิดอื่น เช่น มลทินผลึกแร่ ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.25 รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R19)



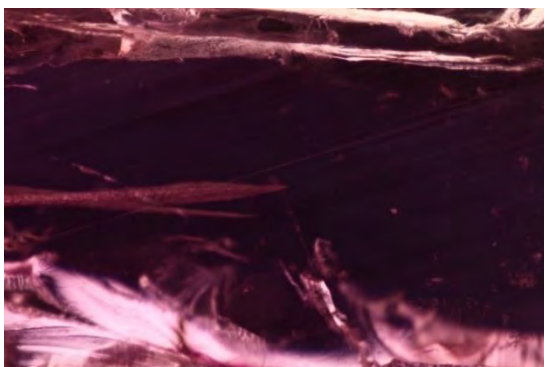
รูปที่ 4.26 รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R26)



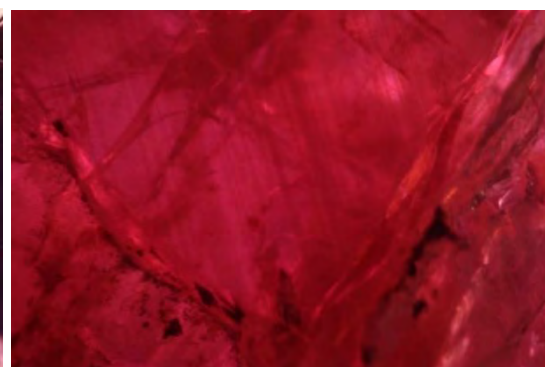
รูปที่ 4.27 รอยแตก กำลังขยาย x50 (KI_R5)

- มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก (Growth line)

มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก พบมากภายในเม็ดพลอย กระจายอยู่ทั่วเนื้อเม็ดพลอย แต่ มักเห็นได้ไม่เด่นชัด เท่ามลทินผลึกแร่



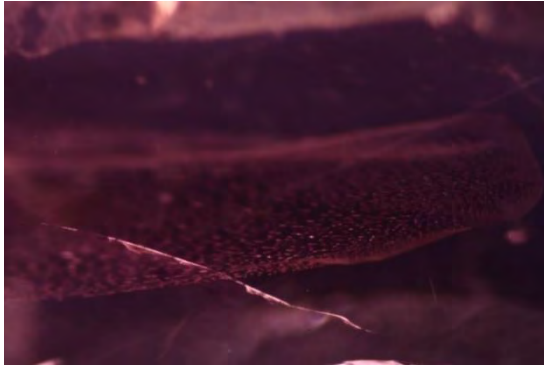
รูปที่ 4.28 มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก
กำลังขยาย x20 (KI_R1)



รูปที่ 4.29 มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก
กำลังขยาย x32 (KI_R9)

- **มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ (Fingerprint)**

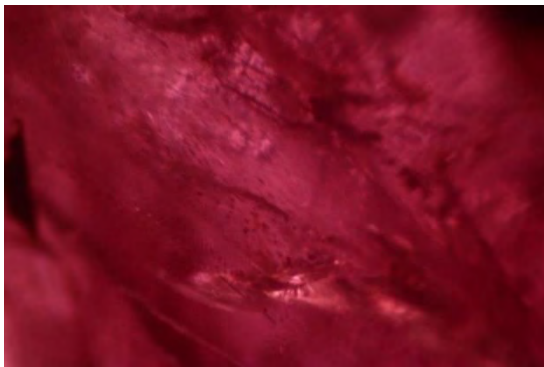
มลทินรอยแตกผสานลายนิ้วมือ พบได้โดยทั่วไป ในเม็ดพลอย บ้างพบเป็นแผ่นเดี่ยว (รูปที่ 4.30-4.35) บ้างก็พบเป็นสองแผ่นตัดกัน (รูปที่ 4.36)



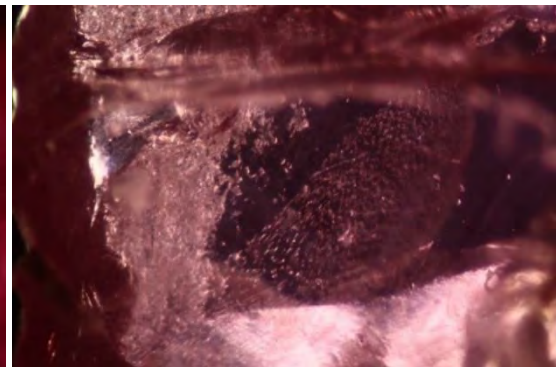
รูปที่ 4.30 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R1)



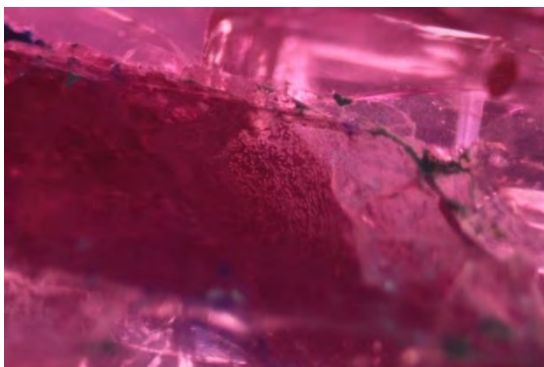
รูปที่ 4.31 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R1)



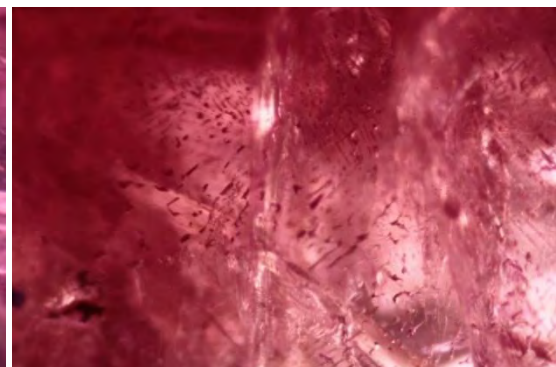
รูปที่ 4.32 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R26)



รูปที่ 4.33 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R17)



รูปที่ 4.34 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x32 (KI_R12)



รูปที่ 4.35 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x50 (KI_R14)



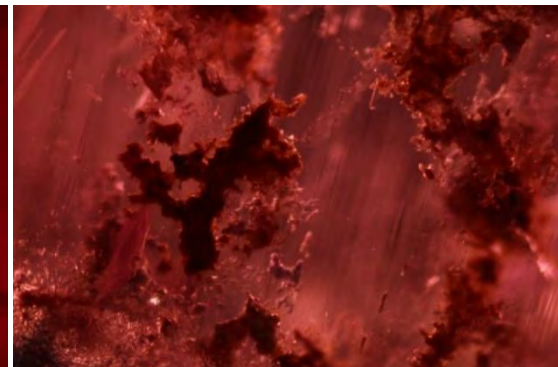
รูปที่ 4.36 รอยแตกผสานรอยนิ้วมือ กำลังขยาย x40 (KI_R10)

- **มลทินคราบสนิมเหล็ก (iron stain)**

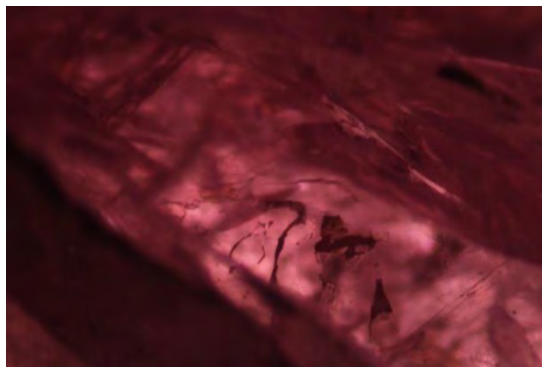
มลทินคราบสนิมเหล็ก สีแดงเข้ม พบน้อยมาก ในพลอยเพียงแค่บางเม็ด โดยพบในรูปแบบที่คล้ายปีกแมลงปอ (รูปที่ 4.37) บ้างพบในรูปแบบที่คล้ายตะไคร้ (รูปที่ 4.38) หรือพบเป็นเส้นที่ไม่มีรูปแบบทิศทางแน่นอน (รูปที่ 4.39)



รูปที่ 4.37 มลทินคราบสนิมเหล็กคล้ายปีกแมลงปอ กำลังขยาย x50 (KI_R3)



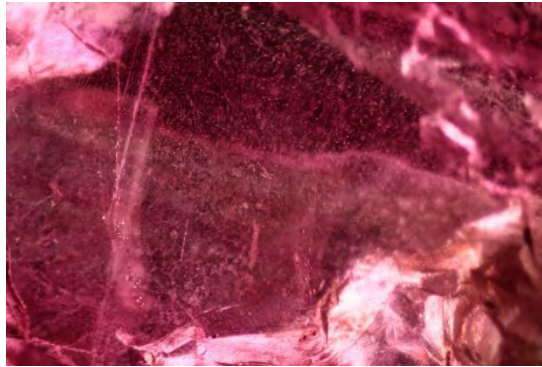
รูปที่ 4.38 มลทินคราบสนิมเหล็กคล้ายตะไคร้ กำลังขยาย x40 (KI_R10)



รูปที่ 4.39 มลทินคราบสนิมเหล็ก แบบเส้นไร้ทิศทาง กำลังขยาย x50 (KI_R16)

- มลทินแถบสี (Color banding)

มลทินแถบสี พบได้น้อยมาก และมักแสดงลักษณะได้อย่างไม่ชัดเจน



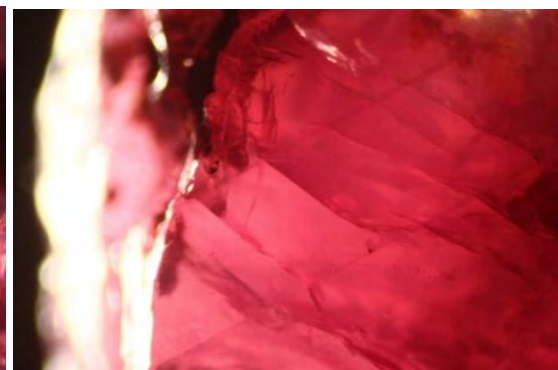
รูปที่ 4.40 มลทินแถบสี กำลังขยาย x50 (KI_R15)

- มลทินระนาบแฝด (Twin plane)

มลทินระนาบแฝด พบได้น้อย แสดงลักษณะได้ไม่ชัดเจนนัก



รูปที่ 4.41 มลทินระนาบแฝด กำลังขยาย x40 (KI_R12)



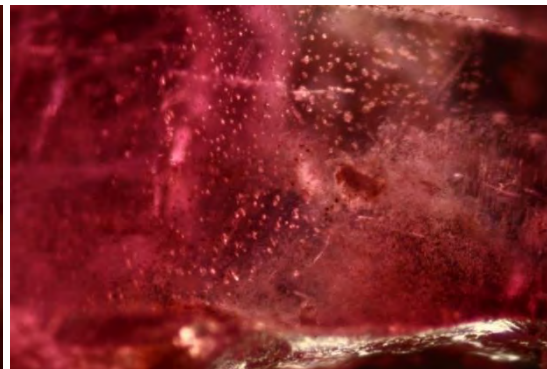
รูปที่ 4.42 มลทินระนาบแฝด กำลังขยาย x50 (KI_R22)

- **มลทินอนุภาคขนาดเล็ก (minute particles)**

มลทินอนุภาคขนาดเล็ก พบกระจายอยู่โดยทั่วไป โดยมักพบร่วมกันเป็นกลุ่มก้อน หรือเป็นแถบ ระบาย



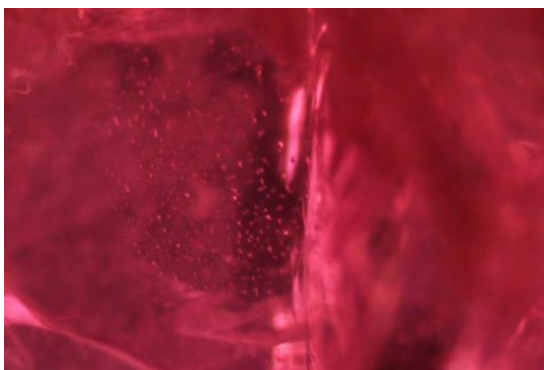
รูปที่ 4.43 มลทินอนุภาคขนาดเล็ก กำลังขยาย x50 (KI_R10)



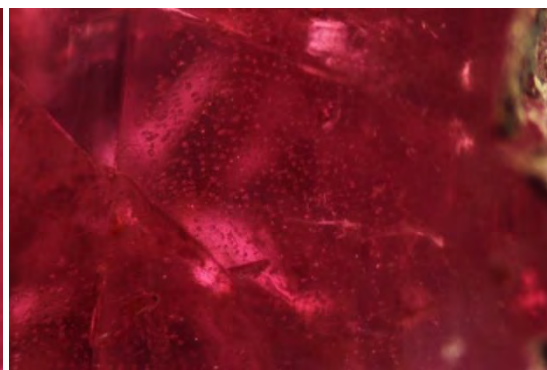
รูปที่ 4.44 มลทินอนุภาคขนาดเล็ก กำลังขยาย x50 (KI_R15)

- **มลทินหม่าขุนขาวน้ำนม (milky cloud)**

มลทินหม่าขุนขาวน้ำนม พบกระจายอยู่โดยทั่วไป โดยมักพบร่วมกันเป็นกลุ่มก้อน หรือเป็นแถบ ระบาย คล้ายกับมลทินอนุภาคขนาดเล็ก แต่มีขนาดเล็กกว่ามาก



รูปที่ 4.45 มลทินหม่าขุนขาวน้ำนม กำลังขยาย x50 (KI_R25)

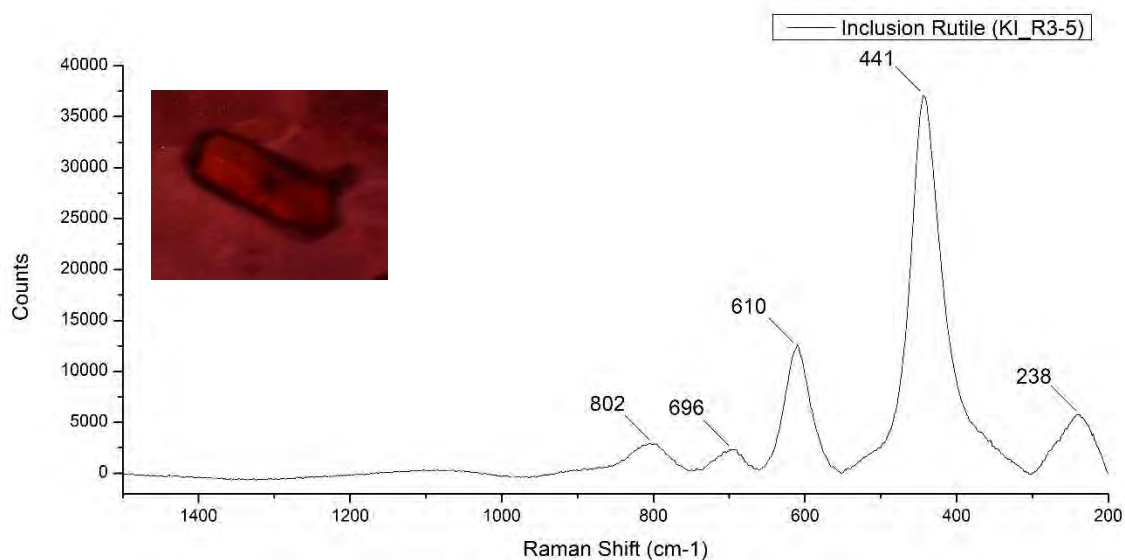


รูปที่ 4.46 มลทินหม่าขุนขาวน้ำนม กำลังขยาย x50 (KI_R25)

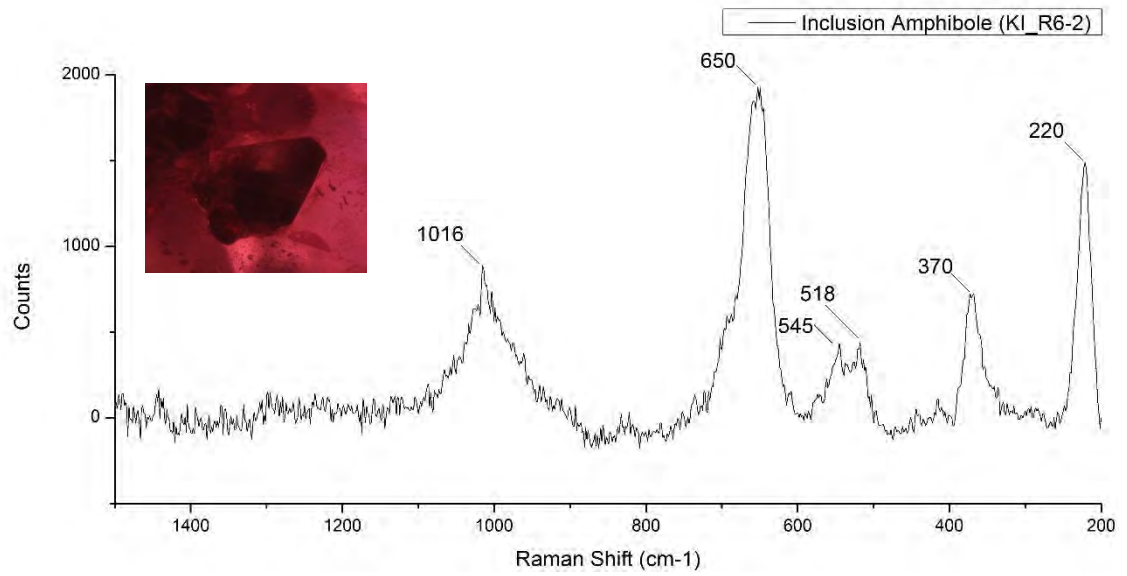
- การวิเคราะห์มลทินแร่ด้วยรามาน (Raman Spectroscopy)

วิเคราะห์มลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy โดยเปรียบเทียบรูปแบบการเลื่อนตัวของรามาน (Raman shift) ทำให้ทราบว่ามลทินผลึกแร่ที่พบมากในพลอยทับทิม แหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย ได้แก่ รูไทล์ (Rutile), แอมฟิโบล์ (Amphibole), เซอร์คอน (Zircon), โครไมต์ (Chromite), การ์เนต (Garnet), และคลอไรต์ (Chlorite) โดยอ้างอิงรูปแบบการเลื่อนตัวของรามาน จากฐานข้อมูล GIT-GTL Spectral Database Libraries และฐานข้อมูล Renishaw Minerals and Inorganic Materials Database

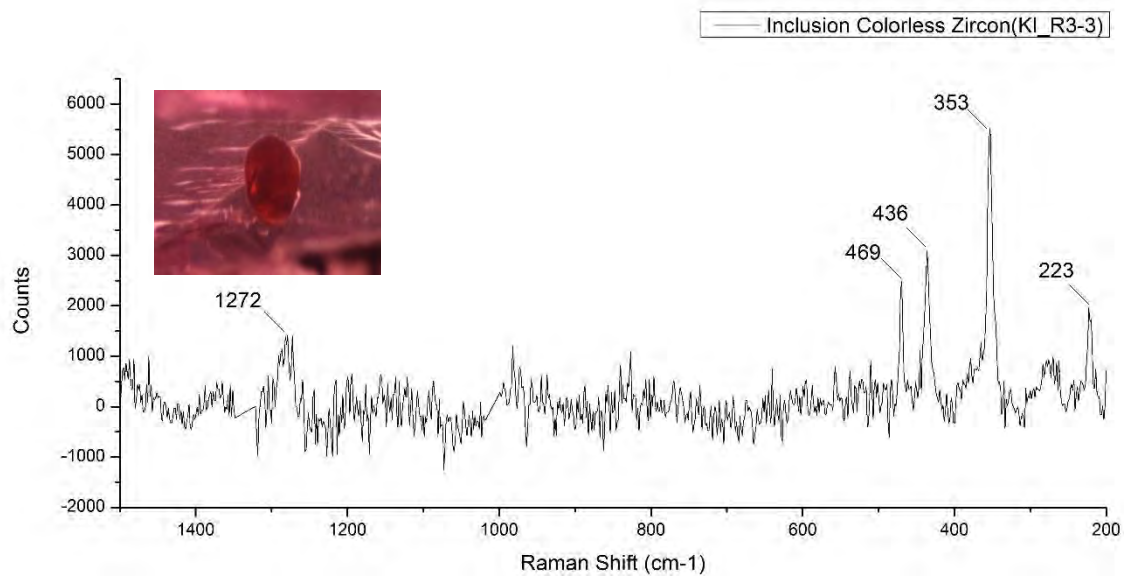
ตัวอย่างรามานสเปกตรัม ของมลทินที่ปรากฏบริเวณผิวของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย ดังแสดงในรูป 4.47-4.52 และรามานสเปกตรัมของมลทินทั้งหมดรวบรวมไว้ใน ภาคผนวก ข



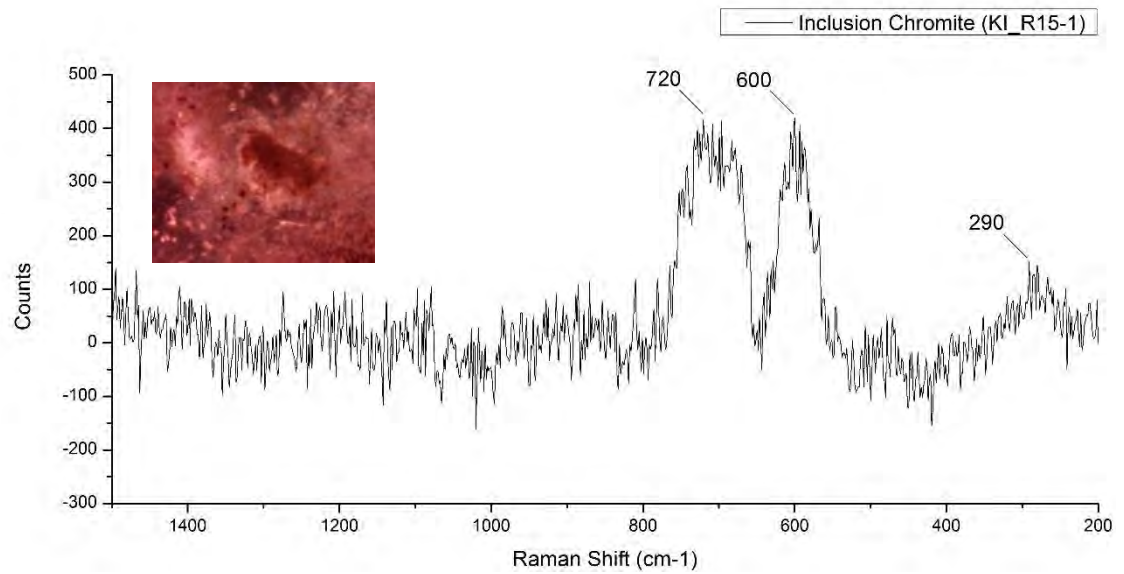
รูปที่ 4.47 รามานสเปกตรัมของมลทินแร่รูไทล์ (Rutile) ของตัวอย่าง KI_R3



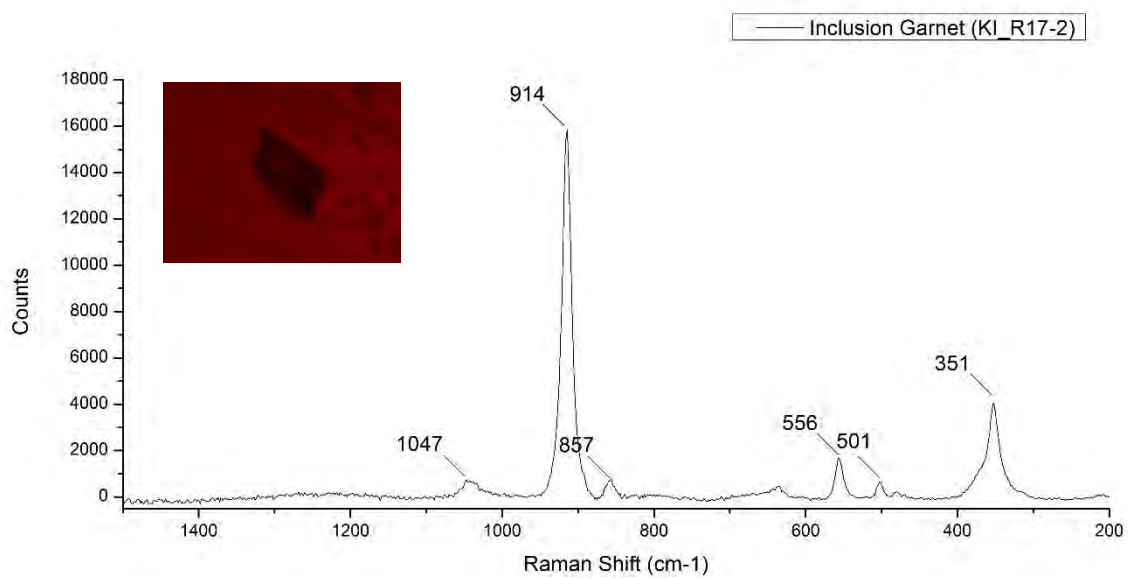
รูปที่ 4.48 รามานสเปกตรัมของมลทินแร่แอมไฟโบล์ (Amphibole) ของตัวอย่าง KI_R6



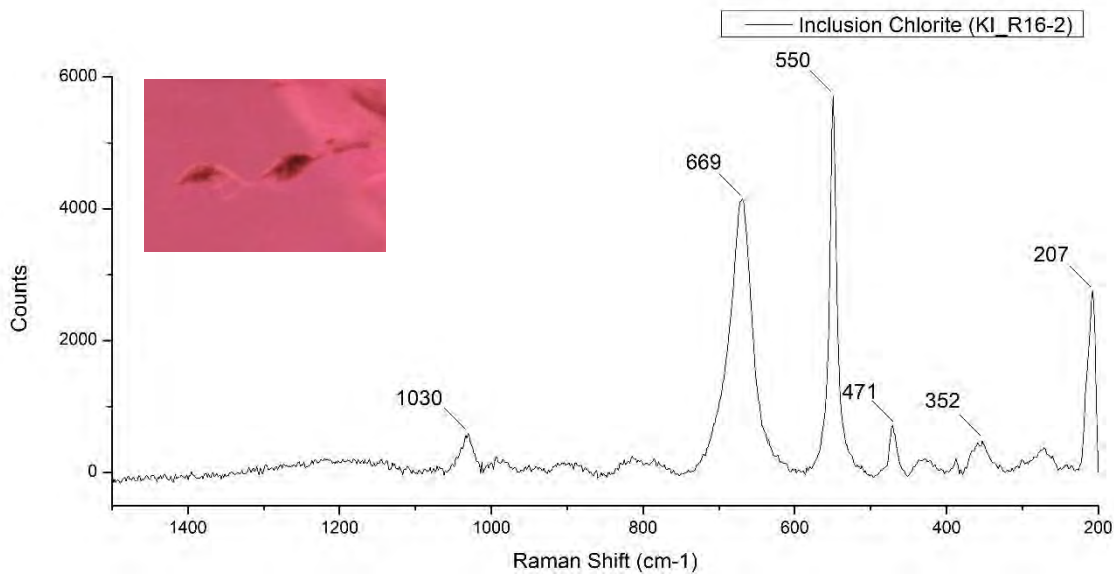
รูปที่ 4.49 รามานสเปกตรัมของมลทินแร่เซอร์คอนไร้สี (Colorless Zircon) ของตัวอย่าง KI_R3



รูปที่ 4.50 รามานสเปคตรัมของมลทินแร่โครไมต์ (Chromite) ของตัวอย่าง KI_R15



รูปที่ 4.51 รามานสเปคตรัมของมลทินแร่การ์เนต (Garnet) ของตัวอย่าง KI_R17



รูปที่ 4.52 รามานสเปคตรัมของมลทินแร่คลอไรต์ (Chlorite) ของตัวอย่าง KI_R16

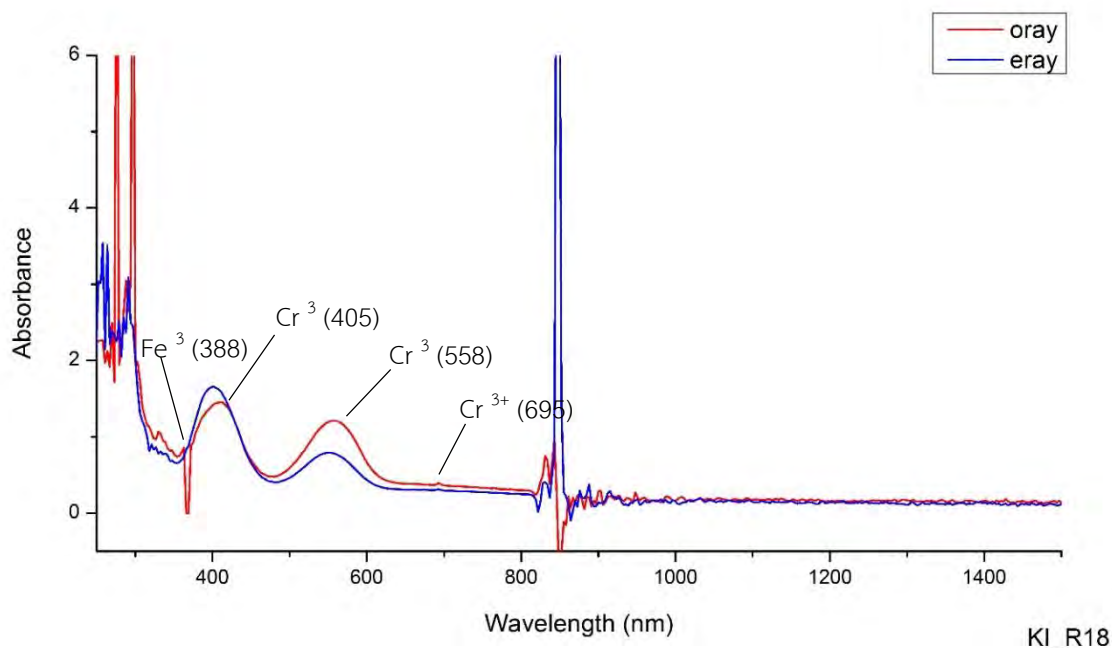
จากการวิเคราะห์มลทินแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope จะพบว่ามลทินแร่แต่ละชนิด มีความถี่ที่พบแตกต่างกัน โดยมีความถี่ที่พบมลทินแร่แต่ละชนิด ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงความถี่ในการพบมลทินแร่ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope

ประเภทมลทินแร่	พบบ่อยมาก	พบปานกลาง	พบน้อย
รูไทล์	✓		
แอมฟิโบล์	✓		
เซอร์คอน	✓		
โครไมต์		✓	
การ์เนต			✓
คลอไรต์			✓

4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR

ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย ดังแสดงในรูป 4.53 และสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ค



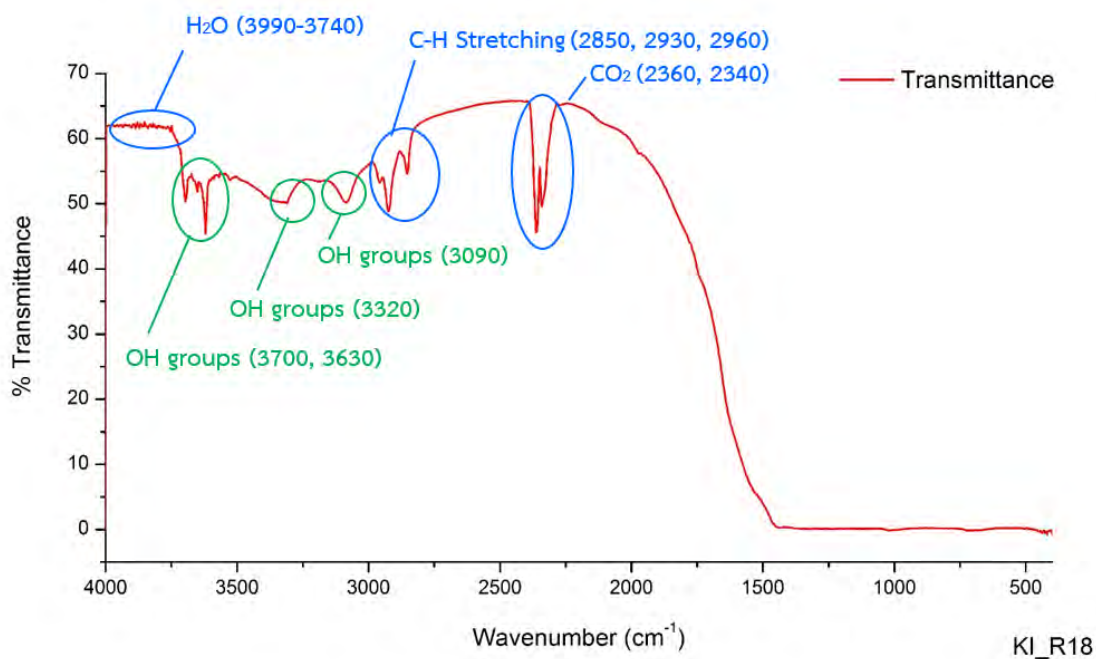
รูปที่ 4.53 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18)

โดยตัวอย่างทั้งหมดแสดงรูปแบบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกัน โดยพิจารณาที่รูปที่ 4.53 ด้วยยอดการดูดกลืนที่ 405, 558 และ 695 nm ซึ่งเป็นผลมาจากธาตุมลทิน Cr^{3+} และการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงดังกล่าวของ Cr^{3+} มีผลให้ทับทิมเกิดสีแดง ส่วนบริเวณ 388 nm มีการดูดกลืนจาก Fe^{3+} ซึ่งส่งผลให้เกิดสีอมม่วงในเม็ดพลอยทับทิมจากแหล่งครินดีนี้ โดยจะเห็นว่า ณ ตำแหน่งที่ความยาวคลื่น 402 nm จะมีการดูดกลืนของรังสีอี (E-Rays) มากกว่า และ ณ ตำแหน่งที่ความยาวคลื่น 558 nm จะมีการดูดกลืนของรังสีโอ (O-Rays) มากกว่า ซึ่งการดูดกลืนของแต่ละรังสีในช่วงคลื่นที่ต่างกันนี้ส่งผลให้เกิดสีที่แตกต่างกันนั่นเอง

4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

ลักษณะทั่วไปของการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) ที่พบในพลอยทับทิมจากแหล่งคิริินดี ประเทศแทนซาเนียนี้ แสดงการดูดกลืนของ H₂O จากความชื้นในอากาศในช่วงประมาณ 3400 - 3980 cm⁻¹ การดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ (CO₂) ในช่วงประมาณ 2300–2400 cm⁻¹ การดูดกลืนของ C-H Stretching ที่ตำแหน่งประมาณ 2850 และ 2920 cm⁻¹ อันเนื่องมาจากความสกปรกของสารไฮโดรคาร์บอนบนผิว หรือภายในรอยแตก ซึ่งสามารถพบลักษณะการดูดกลืนที่กล่าวมานี้ได้ในทุกแหล่งพลอย ถือเป็น การดูดกลืนทั่วไป

ที่สำคัญคือ พบการดูดกลืนที่เป็นลักษณะพิเศษ ณ ตำแหน่ง 3320 cm⁻¹ ดังรูปที่ 4.54 ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ OH groups ซึ่งโดยปกติจะแสดงค่าการดูดกลืน ในช่วงประมาณ 3100–3400 cm⁻¹ ที่เกิดจาก O-H Stretching ของอนุมูลไฮดรอกซิลอิสระ (free OH) ซึ่งมักพบในพลอยทับทิมที่ไม่ผ่านการเผา



รูปที่ 4.54 ตัวอย่างการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด ของพลอยทับทิม จากแหล่งคิริินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18)

4.5 องค์ประกอบทางเคมี

- ผลวิเคราะห์โดย EDXRF

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ Al_2O_3 และองค์ประกอบของธาตุร่องรอยในตัวอย่างหลายชนิด จากการศึกษาได้เลือกวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ ตามรูปแบบขององค์ประกอบออกไซด์ที่มักพบบ่อยในพลอยทับทิม ซึ่งธาตุบางธาตุ ถือเป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดสี ดังแสดงในตาราง 4.3 โดยแสดงเป็นช่วงสูงสุด ถึงต่ำสุด ในหน่วยร้อยละน้ำหนักโมเลกุล และค่าเฉลี่ยทั้งหมดในหน่วยร้อยละน้ำหนักโมเลกุลของตัวอย่างพลอยทั้งหมด โดยผลวิเคราะห์ทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก จ

ตารางที่ 4.3 สรุปผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EDXRF จากพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

Al_2O_3 (wt%)	Cr_2O_3 (wt%)	Fe_2O_3 (wt%)	TiO_2 (wt%)	V_2O_5 (wt%)	Ga_2O_3 (wt%)
98.4522-99.4080	0.2144-0.6794	0.2517-0.8106	0.0094-0.0523	0.0050-0.0410	0.0083-0.0296
(99.1556)	(0.3988)	(0.3846)	(0.0298)	(0.0184)	(0.0129)

- ผลวิเคราะห์โดย EPMA

แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย ซึ่งผลวิเคราะห์มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลวิเคราะห์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF คือ มีองค์ประกอบหลักคือ Al_2O_3 ได้เลือกวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ โดยได้สรุปผลวิเคราะห์ EPMA ในตาราง 4.4 โดยแสดงเป็นช่วงสูงสุด ถึงต่ำสุด ในหน่วยร้อยละโดยมวล และค่าเฉลี่ยทั้งหมด ในหน่วยร้อยละโดยมวล ของตัวอย่างพลอยทั้งหมด โดยผลวิเคราะห์ทั้งหมดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 4.4 สรุปผลวิเคราะห์ทางเคมีโดย EPMA จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

Al_2O_3 (Mass%)	FeO (Mass%)	Cr_2O_3 (Mass%)	SiO_2 (Mass%)	Ga_2O_3 (Mass%)	TiO_2 (Mass%)
97.374 - 99.622 (98.615)	0.153 - 0.726 (0.273)	0.095 - 0.439 (0.2716)	0 - 0.083 (0.0316)	0 - 0.069 (0.0176)	0 - 0.076 (0.0164)

MnO (Mass%)	CaO (Mass%)	V_2O_5 (Mass%)	MgO (Mass%)	K_2O (Mass%)
0 - 0.038 (0.0076)	0 - 0.023 (0.0073)	0 - 0.025 (0.0067)	0 - 0.017 (0.0044)	0 - 0.02 (0.0039)

บทที่ 5

อภิปรายผล และสรุปผล

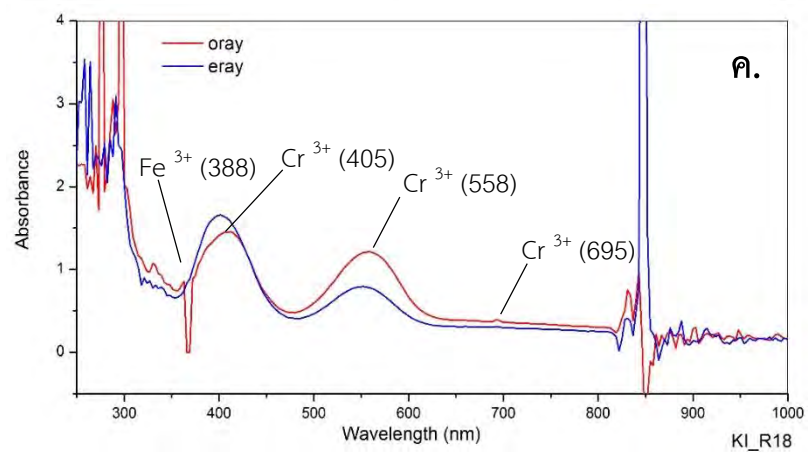
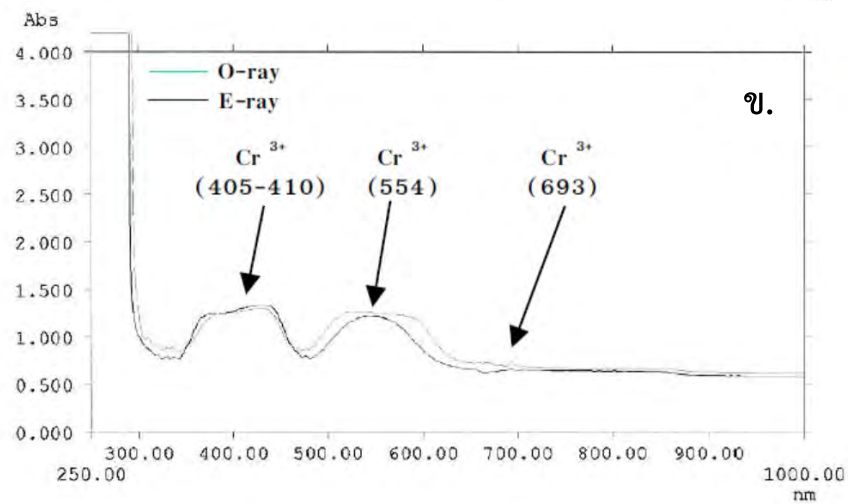
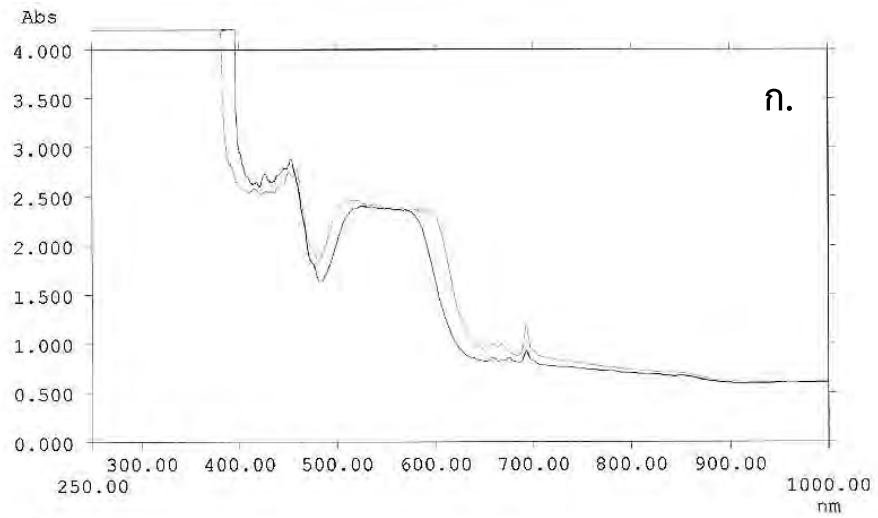
จากการศึกษาตัวอย่างพลอยทับทิม แหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย ทั้ง 26 เม็ด สีแดงอมม่วง พบว่ามีคุณภาพค่อนข้างต่ำ เนื้อพลอยค่อนข้างขุ่น เนื่องจากการมีรอยแตก และมลทินภายใน พลอยทับทิมนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงอยู่ในช่วงปกติของพลอยทับทิมทั่วไปคือ ค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ย 3.917 ค่าดัชนีหักเห 1.763-1.772 ค่าไบรีฟรินเจนซ์ (Birefringence) เท่ากับ 0.008 และการเรืองแสงภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์ โดยไม่เรืองแสง ที่ความยาวคลื่นสั้น แต่เรืองแสงสีแดงเล็กน้อย ที่ความยาวคลื่นยาว

โดยมลทินที่พบโดยมาก เป็นมลทินผลึกแร่ และมลทินอื่นๆที่พบ ได้แก่ มลทินผลึกเนกาทีฟ (negative crystal), มลทินผลึกแร่ซ้อนภายใน (two-phase inclusion), รอยแตก (fracture), มลทินแถบการเจริญเติบโตของผลึก (growth line), มลทินรอยแตกผสมลายนิ้วมือ (fingerprint), มลทินคราบสนิมเหล็ก (iron strain), แถบสี (color banding), มลทินระนาบแฝด (twin plane), มลทินอนุภาคขนาดเล็ก (minute particles), และมลทินหม่าขุ่นขาวน้ำนม (milky cloud) และจากผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของมลทินผลึกแร่โดยเครื่อง Raman Spectroscope พบว่าโดยมากเป็นมลทินผลึกแร่รูไทล์ (rutile) ส่วนผลึกแร่อื่นๆ พบเป็นแร่แอมฟีโบล (amphibole), แร่เซอร์คอน (zircon), แร่โครไมต์ (chromite), แร่การ์เนต (garnet), และแร่คลอไรต์ (chlorite)

นอกจากนี้ มลทินที่พบในแต่ละแหล่ง ก็จะมีแตกต่างกันไป ซึ่งชนิดมลทินผลึกแร่ที่พบสามารถนำมาสรุปผลลงตารางเปรียบเทียบมลทินผลึกแร่ที่พบในพลอยคอร์ันดัม จากแหล่งต่างๆ (ตาราง 5.1) เมื่อนำมลทินที่พบในพลอยจากแหล่งครินดีมาบันทึกลงตารางเปรียบเทียบนี้ จะเห็นได้ว่าพลอยครินดี มีชนิดมลทินผลึกแร่ที่พบแตกต่างจากพลอยจากแหล่งอื่น

การดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis-NIR แสดงยอดการดูดกลืน Cr^{3+} มีความยาวคลื่น 405 และ 558 nm ซึ่งยอดการดูดกลืน Cr^{3+} ส่งผลให้พลอยทับทิม แหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนียนี้มีสีแดง นอกจากนี้เมื่อเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอย ดังภาพที่ 5.1 พบว่าพลอยทับทิม จากประเทศไทย ที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์ (รูปที่ 5.1 ก.) และพลอยทับทิม จากโมกก ประเทศเมียนมาร์ ที่มีกำเนิดจากกระบวนการทางหินแปร (รูปที่ 5.1 ข.) มีรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18) (รูปที่ 5.1 ค.) จะเห็นได้ชัดว่ามีรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนคล้ายกับพลอยทับทิม จากโมกก ประเทศเมียนมาร์ ที่มีกำเนิดจากกระบวนการทางหินแปร จึงสามารถสรุปได้ว่า

พลอยทับทิม จากแหล่งคีรีนดี ประเทศแทนซาเนีย นั้น มีแนวโน้มที่จะกำเนิดจากกระบวนการทางหิน
แปร จากผลของการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis-NIR

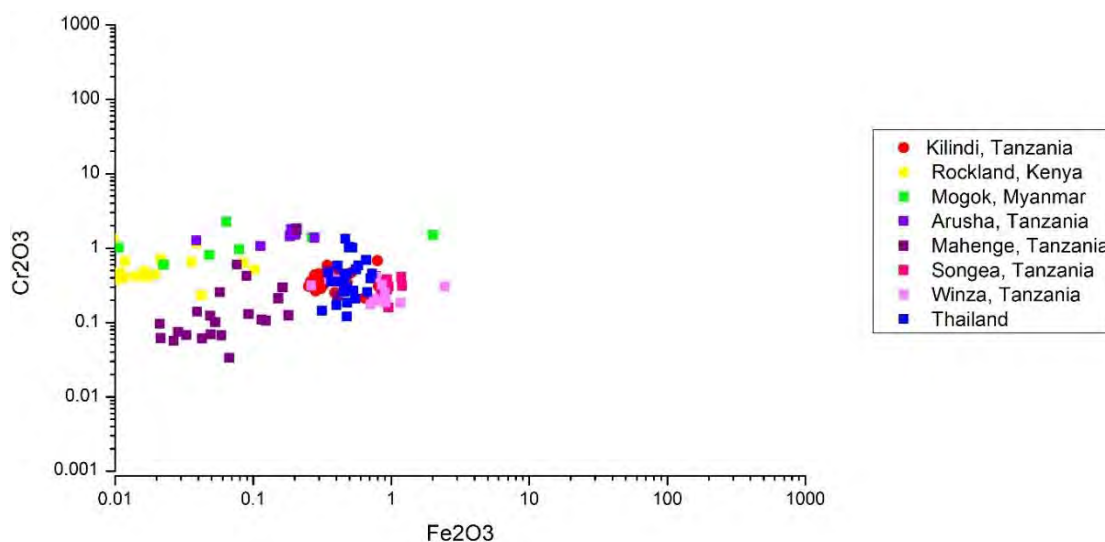


รูปที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของพลอย

- ก. พลอยทับทิม จากประเทศไทย ที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์ (อินทโสภา, 2545)
- ข. พลอยทับทิม จากโมกก ประเทศเมียนมาร์ ที่มีกำเนิดจากกระบวนการทางหินแปร (อินทโสภา, 2545)
- ค. พลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย (KI_R18)

การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด โดยเครื่อง FTIR แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH group โดยในส่วนของ OH group สามารถบ่งชี้ได้ว่าพลอยทับทิม แหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนียนั้น มีแหล่งกำเนิดมาจากหินแปร จากการดูดกลืนแสง ณ ความยาวคลื่น 3090, 3320, 3630 และ 3700 cm^{-1} ที่บ่งชี้ถึงสภาพแวดล้อมที่เกิดหินแปร ซึ่งจะแสดงลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนของ OH ที่ 3310 cm^{-1} โดยถ้าหากเป็นทับทิมจากแหล่งกำเนิดที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์จะไม่แสดงลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนของ OH ในช่วง $3000\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ นอกจากนี้ การดูดกลืน OH group ยังสามารถบ่งชี้ได้ถึงมลทินผลึกแร่ที่พบภายในเม็ดพลอย อย่างมลทินผลึกแร่แอมฟีโบล์ ซึ่งเป็นหลักฐานอีกอย่างหนึ่งของการแปรสภาพ

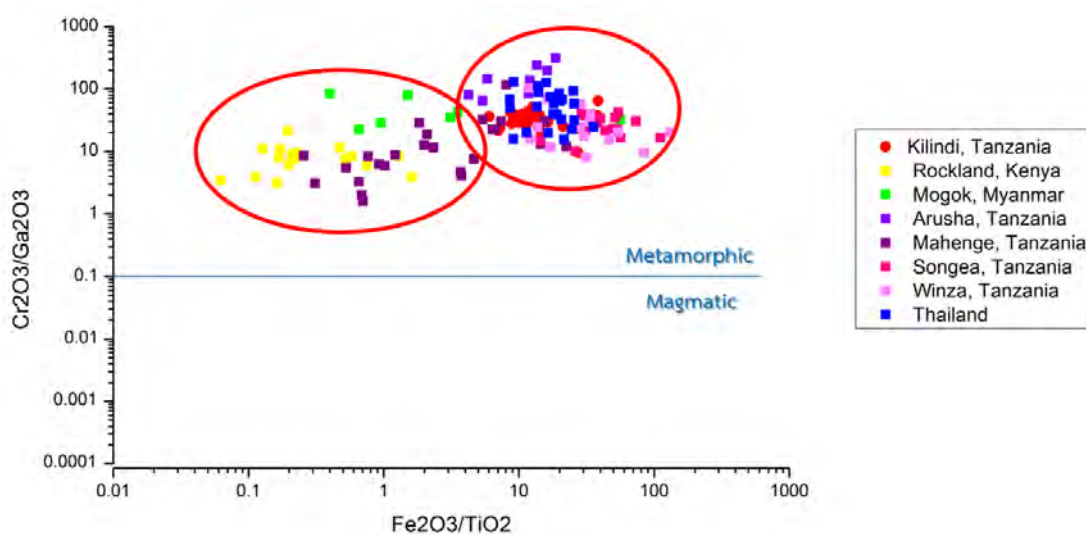
ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี จากเครื่อง EDXRF และ EPMA ได้ผลการวิเคราะห์ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าธาตุองค์ประกอบหลักคือ Al_2O_3 ซึ่งเป็นองค์ประกอบเคมีของคอร์ันดัมโดยทั่วไป ส่วนธาตุร่องรอยที่มีปริมาณรองลงมาคือ Cr_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนธาตุร่องรอยอื่นๆที่พบน้อยมาก ได้แก่ SiO_2 , Ga_2O_3 , TiO_2 , MnO , CaO , V_2O_5 , MgO และ K_2O จากผลของ EPMA ตามลำดับ ซึ่งโดยปกติหากมี Cr_2O_3 ในปริมาณ 0.1% จะให้สีแดงเลือดนกบริสุทธิ์ แต่ผลที่ได้ คือ 0.3988 จาก EDXRF และ 0.2716 จาก EPMA ทั้งยังมี Fe^{3+} และ V^{3+} ซึ่งให้สีอมม่วง ทำให้พลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี นี้มีสีแดงอมม่วง



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิม ด้วยอัตราส่วนระหว่าง ออกไซด์ของเหล็ก และโครเมียม (ข้อมูลแหล่งพลอยอื่นจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT)

นอกจากนี้ ได้นำผลองค์ประกอบทางเคมีของพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี มาอภิปรายร่วมกับผลองค์ประกอบทางเคมีจากแหล่งพลอยแหล่งอื่น โดยใช้ข้อมูลแหล่งพลอยอื่นจากสถาบันวิจัย

และพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิมพบว่า ตัวอย่างพลอยทับทิมจากแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกันจะมีองค์ประกอบเคมีที่โดดเด่นแตกต่างกัน จากการเทียบสัมพันธ์ด้วยอัตราส่วนระหว่าง ออกไซด์ของเหล็ก และโครเมียม (รูปที่ 5.2) จากเครื่องEDXRF จะเห็นว่าพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี จะอยู่ในกลุ่มด้านขวา ซึ่งมีปริมาณออกไซด์ของเหล็กสูง เมื่อเทียบกับแหล่งอื่นๆ

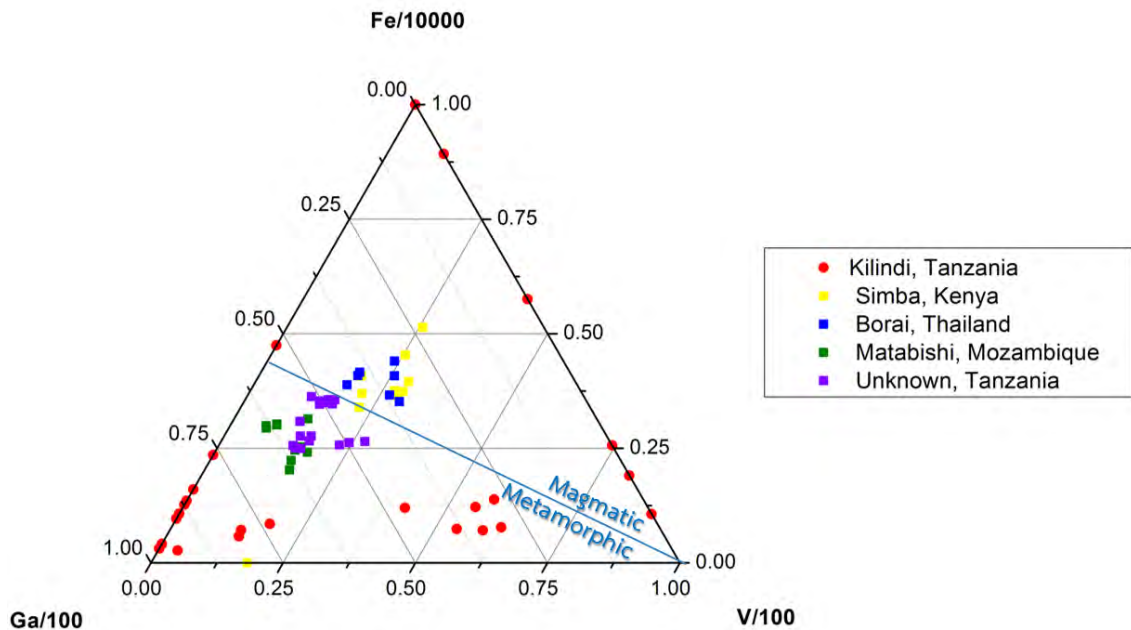


รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิม ด้วยอัตราส่วนระหว่าง $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ และ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (ข้อมูลแหล่งพลอยอื่นจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT)

รูปที่ 5.3 ทำการเปรียบเทียบเช่นเดิม แต่เลือกใช้อัตราส่วนระหว่างธาตุออกไซด์ที่สำคัญในพลอยทับทิม คือ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ กับ $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ทำให้สามารถแบ่งพลอยทับทิมได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ โดยกลุ่มด้านขวา คือ แหล่งคิรินดี แหล่งอาร์ชัว แหล่งซองเกีย แหล่งวินซ่า ประเทศแทนซาเนีย และประเทศไทย เป็นกลุ่มเหล็กสูง ส่วนกลุ่มด้านซ้าย แหล่งร็อคแลนด์ ประเทศเคนยา แหล่งมะเฮงเก้ ประเทศแทนซาเนีย และแหล่งโมกก ประเทศพม่า จัดเป็นกลุ่มเหล็กต่ำ นอกจากนี้ การเทียบความสัมพันธ์ในรูปแบบนี้ ยังสามารถบอกได้ว่าข้อมูลพลอยทับทิมทั้งหมดนี้ เป็นพลอยจากแหล่งที่มีต้นกำเนิดจากหินแปร เพราะถ้าหากมีต้นกำเนิดจากแหล่งกำเนิดที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์ ค่าของ $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ จะอยู่ต่ำกว่า 0.1 (Zaw et al., 2006) แต่เนื่องด้วยยังขาดข้อมูลพลอยทับทิมจากแหล่งกำเนิดที่สัมพันธ์กับหินบะซอลต์ จึงขาดข้อมูลที่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้

ซึ่งจากข้อมูลหลายๆด้านประกอบกัน ที่สนับสนุนว่าพลอยทับทิมจากแหล่งครินดี มีต้นกำเนิดจากหินแปร โดยนับเป็นผลจากการวิเคราะห์ที่สัมพันธ์กับข้อเท็จจริงของการเกิดพลอยทับทิม ในบริเวณนี้ เนื่องจากพบพลอยทับทิมร่วมกับหินแปร คือหินแอมฟิโบไลต์ (amphibolites) และในบริเวณรอบข้างที่ใกล้เคียงพบหินโผล่ที่ส่วนใหญ่เป็นหินไนส์ (gneiss) แสดงริ้วขนาน (foliation) นอกจากนี้มีลทินที่พบยังเป็นแร่รูไทล์ และแร่แอมฟิโบล์ ซึ่งเป็นแร่ที่พบโดยทั่วไปในสภาวะอุณหภูมิต่ำและความดันสูง พบได้ในหินอัคนี และหินแปร

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาองค์ประกอบเคมีเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบพลอยทับทิม แหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย กับพลอยทับทิมจากแหล่งอื่น (รูปที่ 5.4) โดยนำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจากเครื่อง EPMA เปรียบเทียบกับฐานข้อมูล LA-ICP-MS จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดทับทิมพบว่า ตัวอย่างพลอยทับทิมจากแหล่งครินดี มีองค์ประกอบเคมีที่โดดเด่นแตกต่างกันกับพลอยทับทิมจากแหล่งอื่น จากการเทียบสัมพันธ์ด้วยอัตราส่วนระหว่าง V, Fe และ Ga แม้ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EPMA อาจมีจุดบกพร่องไปในบางส่วน เนื่องจากค่าของขีดจำกัดการตรวจหา (Detection limit) ที่สูงเกินไป จึงอาจมีผลคลาดเคลื่อน ในจุดที่อยู่บริเวณขอบของแผนภาพ และผิดเพี้ยนไปในบางส่วน แต่ยังมีแนวโน้มอยู่ในบริเวณด้านขวาล่าง ทำให้สามารถแยกลักษณะเฉพาะนี้ของพลอยทับทิมจากแหล่งครินดี ออกจากพลอยจากแหล่งอื่นได้ โดยในแผนภาพนี้ สามารถแยกพลอยทับทิมที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์ คือ แหล่งซิมบ้า ประเทศเคนย่า และแหล่งบ่อไร่ ประเทศไทย กับพลอยทับทิมที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับกระบวนการทางหินแปร คือ แหล่งมาตาบิชู ประเทศโมซัมบิก, ประเทศแทนซาเนีย แหล่งอื่นๆ และแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย ด้วยเส้นตัดแบ่งสีน้ำเงินดังภาพ



รูปที่ 5.4 แผนภาพระบบ 3 องค์ประกอบ (ternary phase diagram) แสดงองค์ประกอบระหว่าง V-Fe-Ga (ppmw) (ข้อมูลแหล่งพลอยอื่นจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน), สวอ. หรือ GIT)

จากผลวิเคราะห์ และการอภิปรายผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงสามารถสรุปได้ว่าลักษณะเฉพาะของอัญมณีในแต่ละแหล่ง โดยเฉพาะองค์ประกอบทางเคมีสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกแหล่งที่มาของอัญมณีที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดที่แน่ชัดได้ แม้ในการจำแนกแหล่งที่มาของพลอยทับทิมจะมีการวิจัยไม่มากนัก ต่างจากพลอยแซปไฟร์ ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพในการจำแนกแหล่งที่มาของพลอยทับทิม จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่ต้องศึกษา ค้นคว้า และปรับปรุงฐานข้อมูล เพื่อให้มีข้อมูลเพียงพอแก่การจำแนกแหล่งที่มาของพลอยทับทิมได้อย่างครอบคลุม และแม่นยำยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- จักรพันธ์ สุทธิรัตน์., วิลาวณิชย์ อติชาติ., พรสวาท วัฒนกุล., อภิสิตธี จรัสทรัพย์., พรหมณี ขำเลิศ., นาดยา นิลยัต., สมพร วงษ์ลักษณ์., แสงทิพย์ แสงบัวงามล้ำ. 2557. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการการศึกษาศักยภาพและโอกาสการเข้าถึงแหล่งวัตถุดิบอัญมณีในประเทศแทนซาเนีย."
กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- สุพร อินทโสภา., วิลาวณิชย์ อติชาติ., วิสุทธิ พิสุทธิอานนท์., บุญทวี ศรีประเสริฐ. 2545. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการศึกษามลทินในพลอยคอร์ันดัมเพื่อการจัดแบ่งแหล่งกำเนิดและมาตรฐาน."
กรุงเทพมหานคร: กรมทรัพยากรธรณี.
- อภิสิตธี ซาล่าและคณะ. 2558. "รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการการศึกษาศักยภาพและโอกาสการเข้าถึงแหล่งวัตถุดิบอัญมณีในประเทศแอฟริกา (แอฟริกาตะวันออก)."
กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- Avrom, E.H. 2011. A brief introduction to the geology and mining industry of Tanzania.
Ontario: Sika resources incorporated.
- Chorowicz, J. 2005. The East African rift system. *Journal of African Earth Sciences*, Vol 43 : 379–410.
- Diep, P. 2015. Internal characteristics, chemical compounds and spectroscopy of sapphire as single crystals. Mainz.
- Fritz, H., Tenczer, V., Hauzenberger, C.A., Wallbrecher, E., Hoinkes, G., Muhongo, S., and Mogessie, A. 2005. Central Tanzanian tectonic map: A step forward to decipher Proterozoic structural events in the East African Orogen. *Tectonics*, Vol 24.
- Haroarson, B.S. 2014. Structural geology of the western branch of the east African rift: Tectonics, Volcanology and geothermal activity. *Geothermal Resources*.
- Kröner, A., and Stern, R.J. 2004. Africa. *Encyclopedia of Geology* 1 : 1-12.
- Seifert A.V., and Hyrsl J. 1999. Sapphire and garnet from Kalalani, Tanga province, Tanzania. *Gems & Gemology*, Vol 35, No 2 : 108-121.

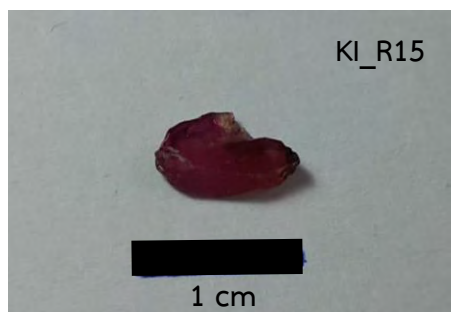
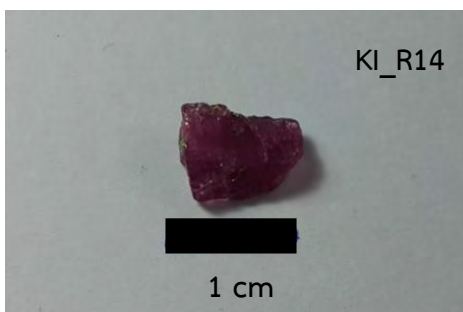
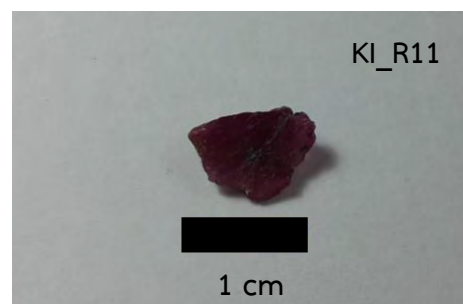
- Sommer, H., Kröner, A., Hauzenberger, C., and Muhongo, S. 2005. Reworking of Archaean and Palaeoproterozoic crust in the Mozambique belt of central Tanzania as documented by SHRIMP zircon geochronology. *Journal of African Earth Sciences*, Vol 43 : 447–463.
- Wicander, R., and Monroe, J.S. 2010. *Historical Geology: Evolution of Earth and Life Through Time*, Sixth Edition. Belmont, CA : Brooks/Cole.
- Zaw, K., Sutherland, F.L., Dellapasqua, F., Ryan, C.G., Yui, T., Mernagh, T.P., and Duncan, D. 2006. Contrasts in gem corundum characteristics, eastern Australian basaltic fields: trace elements, fluid/melt inclusions and oxygen isotopes. *Mineralogical Magazine*, Vol. 70, No 6 : 669–687
- Zwaan, J.C., Buter, E., Mertz-Kraus, R., and Kane, R.E. 2015. Alluvial sapphires from Montana: inclusions, geochemistry, and indications of a metasomatic origin. *Gems & Gemology*, Vol 51, No 4 : 370-391.

ภาคผนวก ก

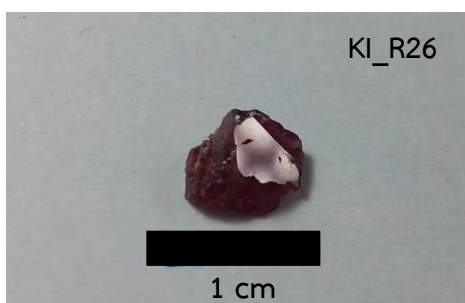
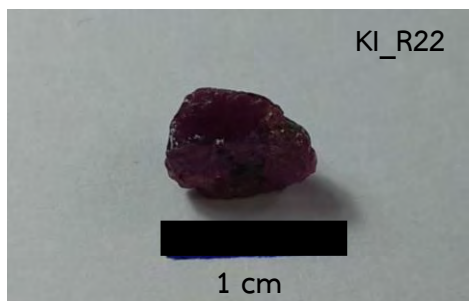
ภาพถ่ายอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย

ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย

ภาพตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ภาพตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



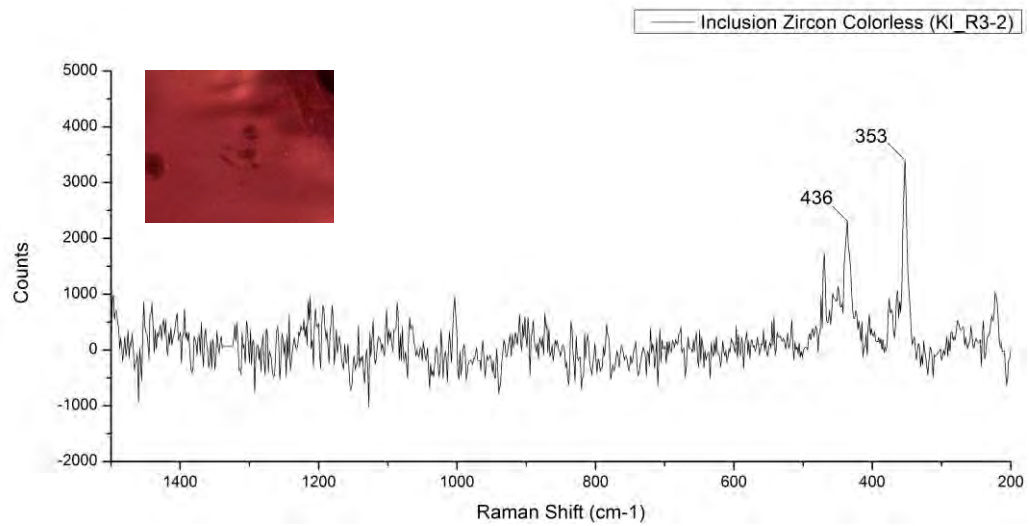
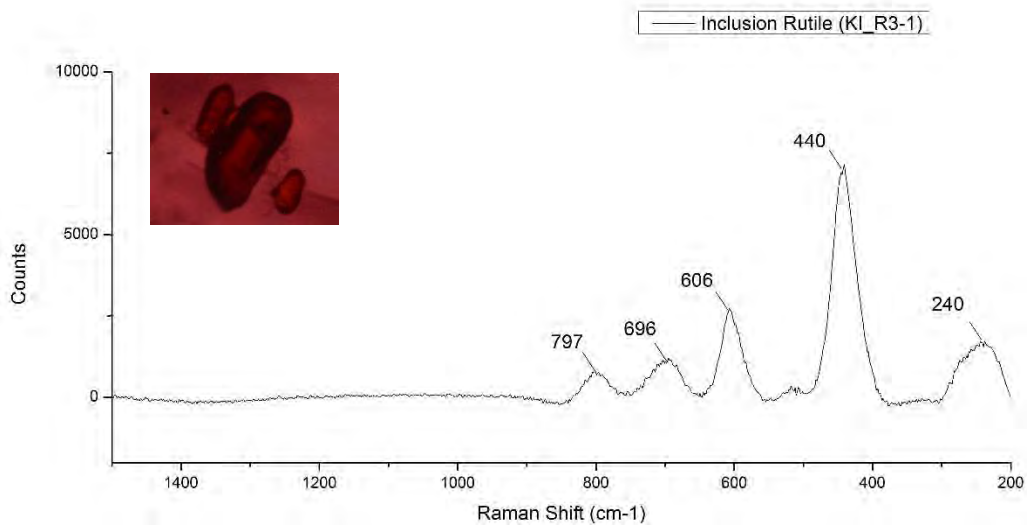
ลักษณะทางกายภาพ และสมบัติเฉพาะทางอัญมณีของตัวอย่างพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

Sample	Weight	SG	RI		Birefringence	Fluorescence	
	(ct)	(g/cm ³)	no	ne		LW	SW
KI_R1	1.8925	3.884	1.761	1.771	0.010	Weak Red	Inert
KI_R2	7.6055	3.914	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R3	4.3775	3.978	1.762	1.772	0.010	Mo. Red	Inert
KI_R4	3.6340	3.929	1.762	1.771	0.009	Weak Red	Inert
KI_R5	4.5375	3.822	1.763	1.772	0.009	Mo. Red	Inert
KI_R6	3.5625	3.919	1.762	1.771	0.009	Weak Red	Inert
KI_R7	4.1720	3.947	1.763	1.773	0.010	Mo. Red	Inert
KI_R8	2.9345	3.942	1.762	1.770	0.008	Weak Red	Inert
KI_R9	2.2430	3.897	1.762	1.770	0.008	Weak Red	Inert
KI_R10	2.0870	3.958	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R11	2.4495	3.989	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R12	1.8765	3.935	1.762	1.771	0.009	Mo. Red	Inert
KI_R13	1.6985	3.893	1.765	1.771	0.006	Mo. Red	Inert
KI_R14	2.6560	3.891	1.762	1.772	0.010	Mo. Red	Inert
KI_R15	0.8910	3.827	1.765	1.772	0.007	Weak Red	Inert
KI_R16	1.1365	3.901	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R17	1.8035	3.914	1.765	1.775	0.010	Weak Red	Inert
KI_R18	1.4875	4.059	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R19	1.9265	3.943	1.762	1.771	0.009	Weak Red	Inert
KI_R20	2.1675	3.921	1.765	1.772	0.007	Weak Red	Inert
KI_R21	1.8395	3.921	1.762	1.770	0.008	Weak Red	Inert
KI_R22	2.7190	3.912	1.765	1.772	0.007	Weak Red	Inert
KI_R23	1.4055	3.932	1.761	1.772	0.011	Weak Red	Inert
KI_R24	1.4875	3.851	1.762	1.772	0.010	Weak Red	Inert
KI_R25	1.0950	3.910	1.762	1.771	0.009	Weak Red	Inert
KI_R26	1.5880	3.864	1.765	1.773	0.008	Mo. Red	Inert

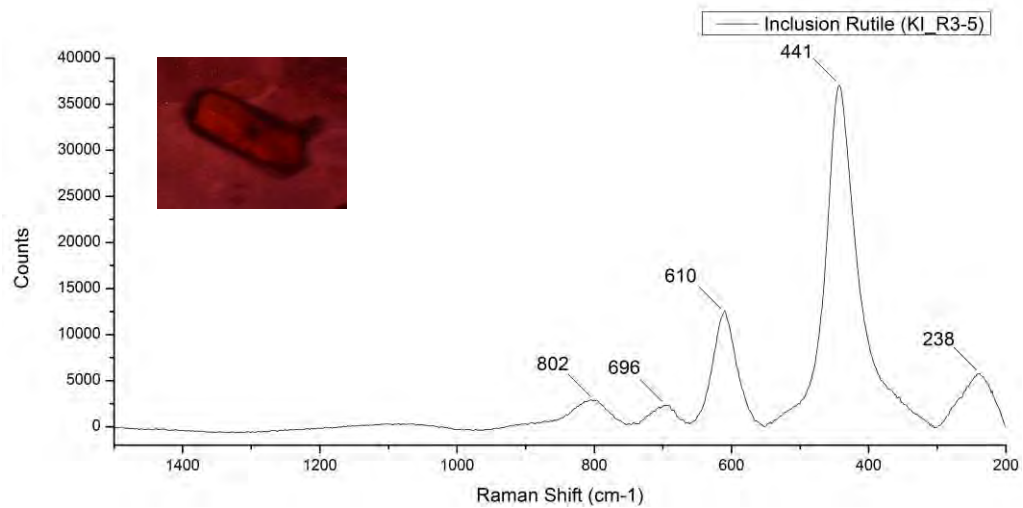
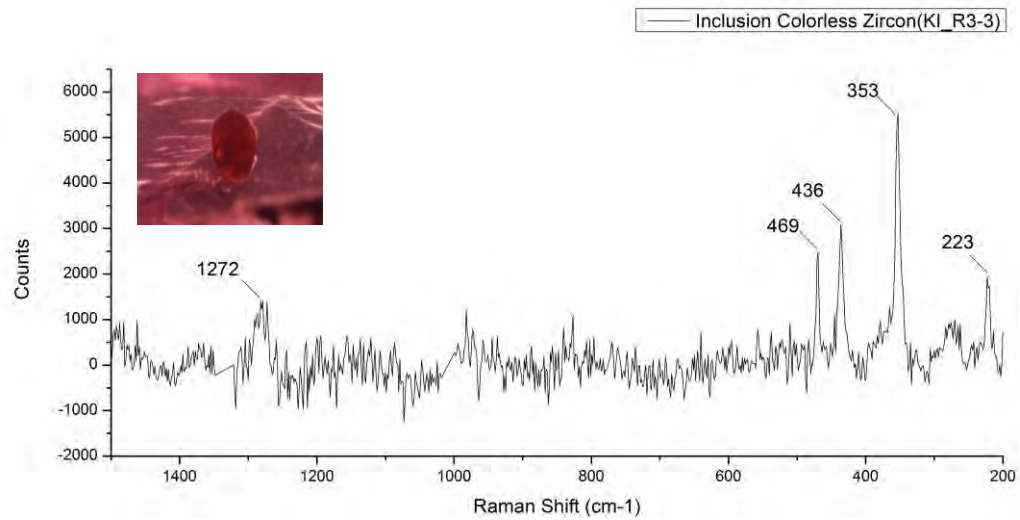
ภาคผนวก ข

ผลวิเคราะห์มัลติฟลูออเรสเซนซ์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

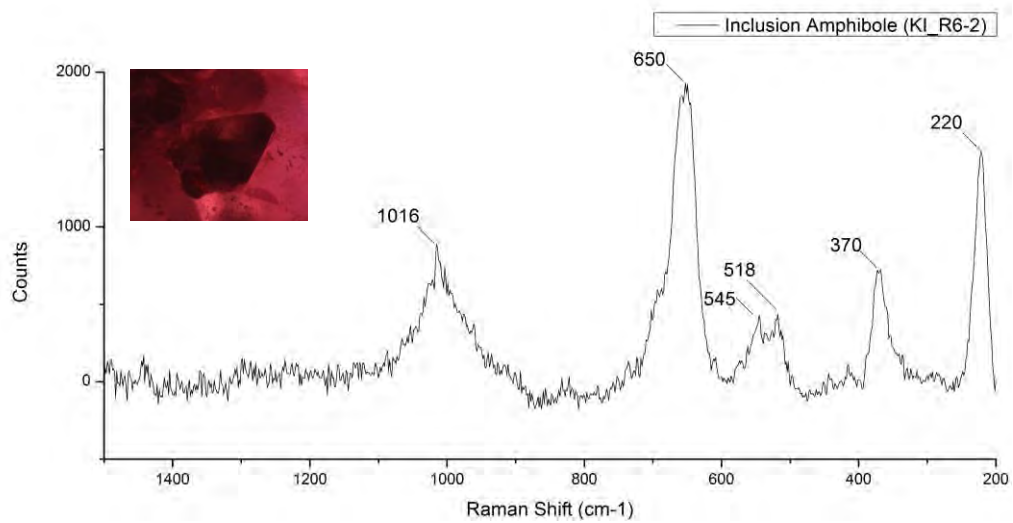
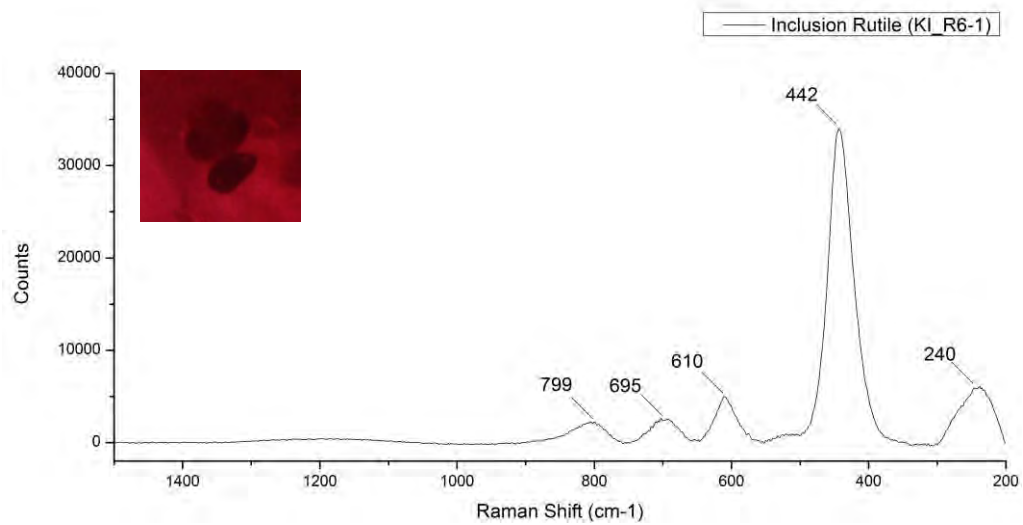
ผลวิเคราะห์ผลหินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินทิ ประเทศแทนซาเนีย



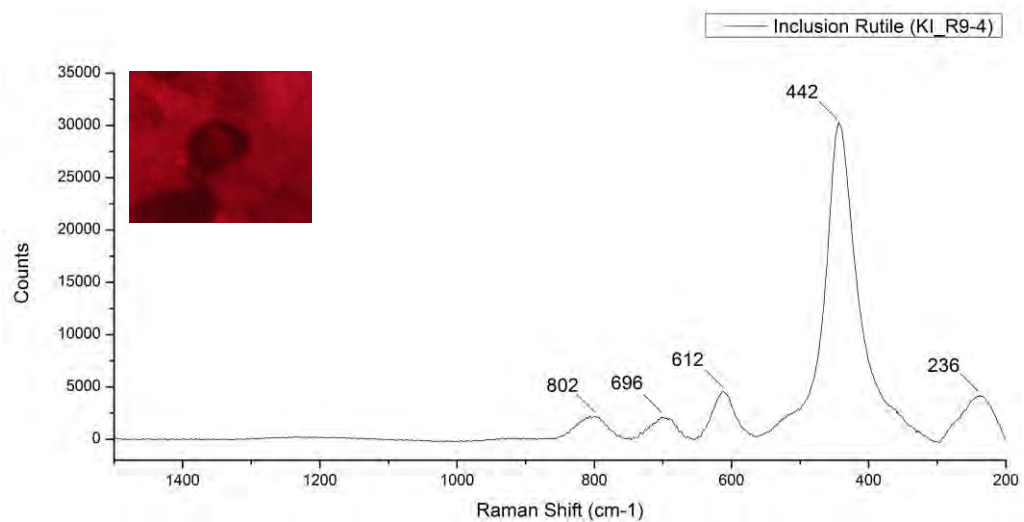
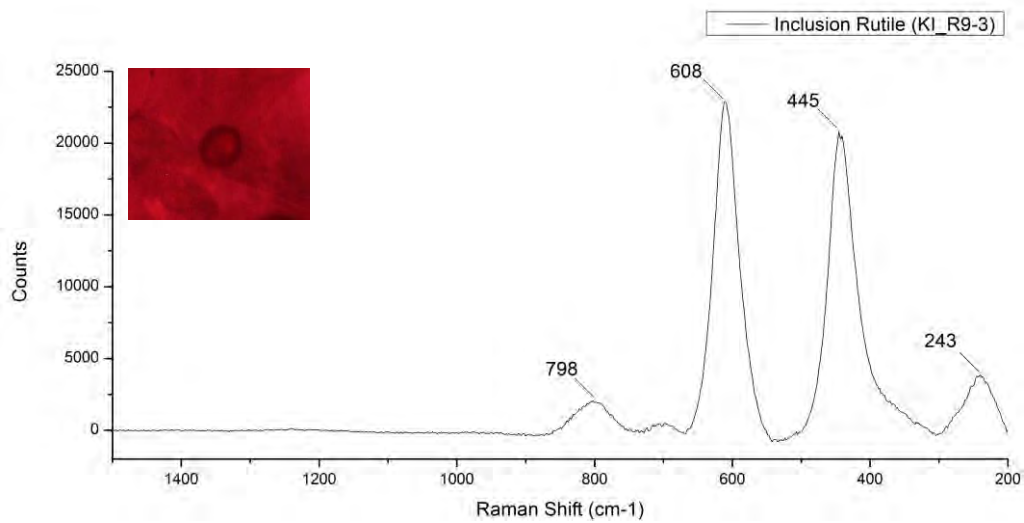
ผลวิเคราะห์มลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



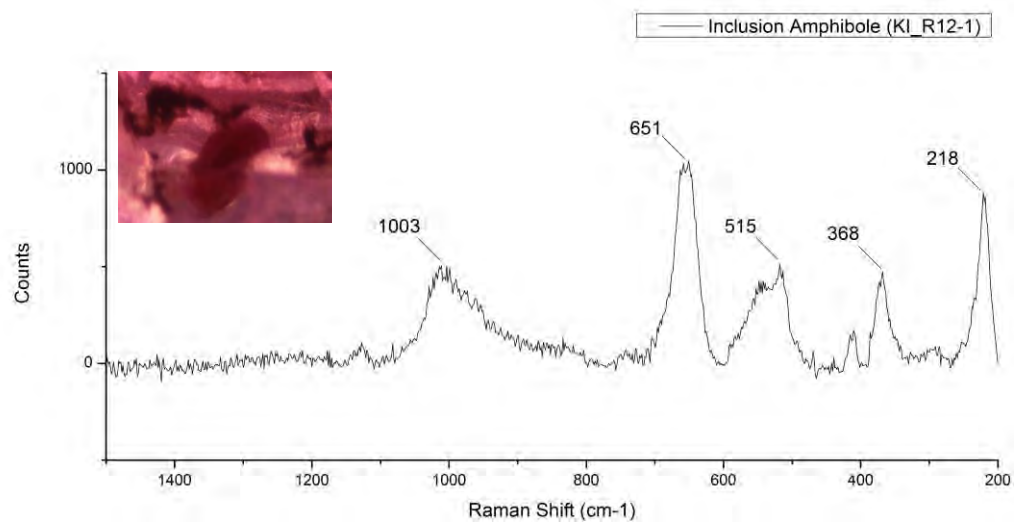
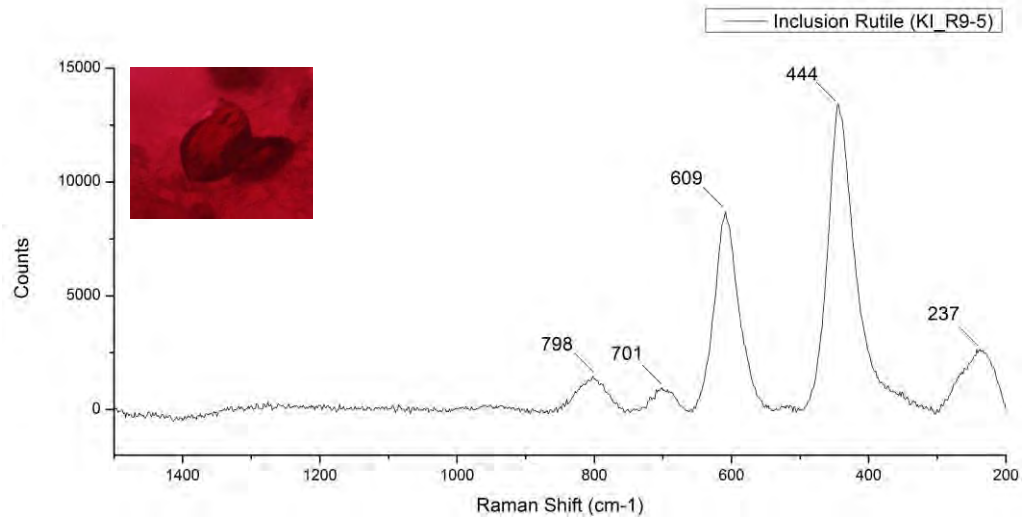
ผลวิเคราะห์หม่ลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินตี ประเทศแทนซาเนีย



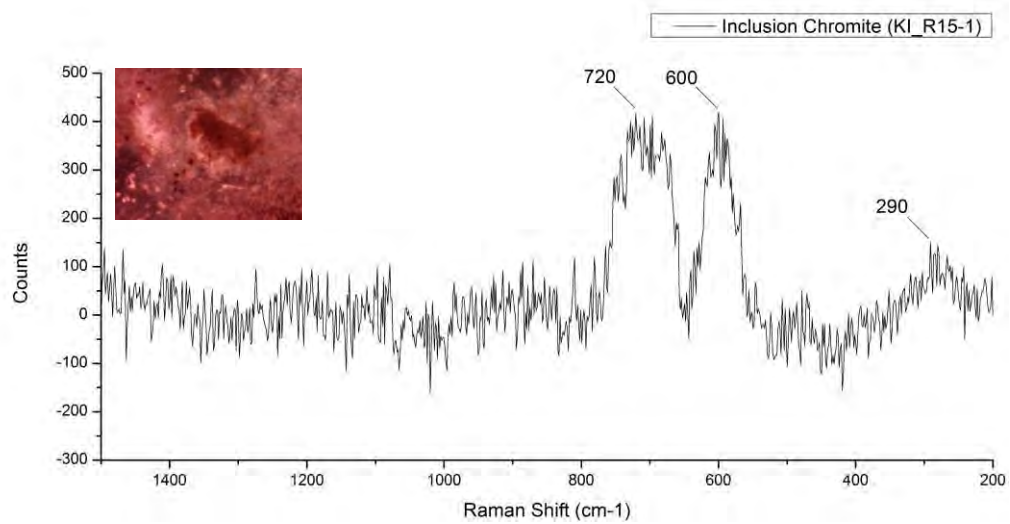
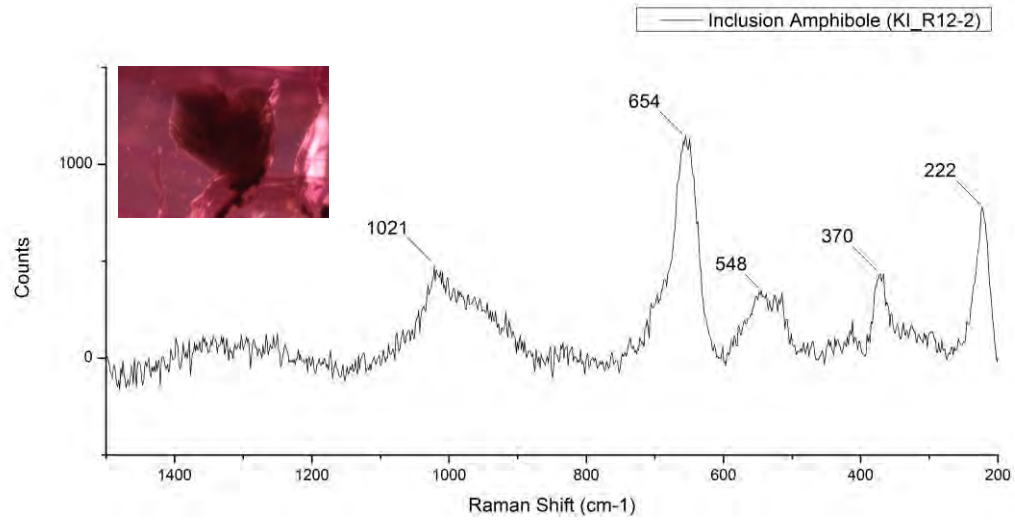
ผลวิเคราะห์หมึกหินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



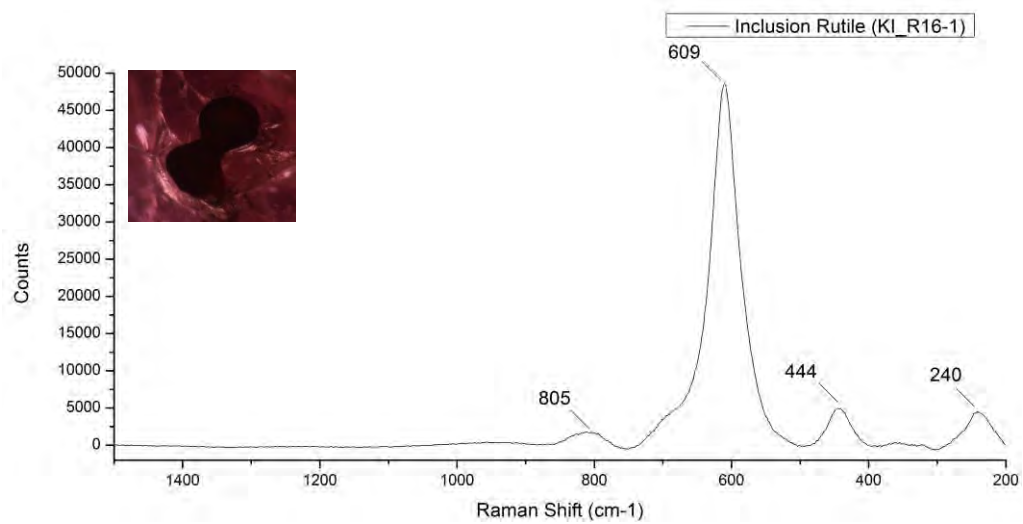
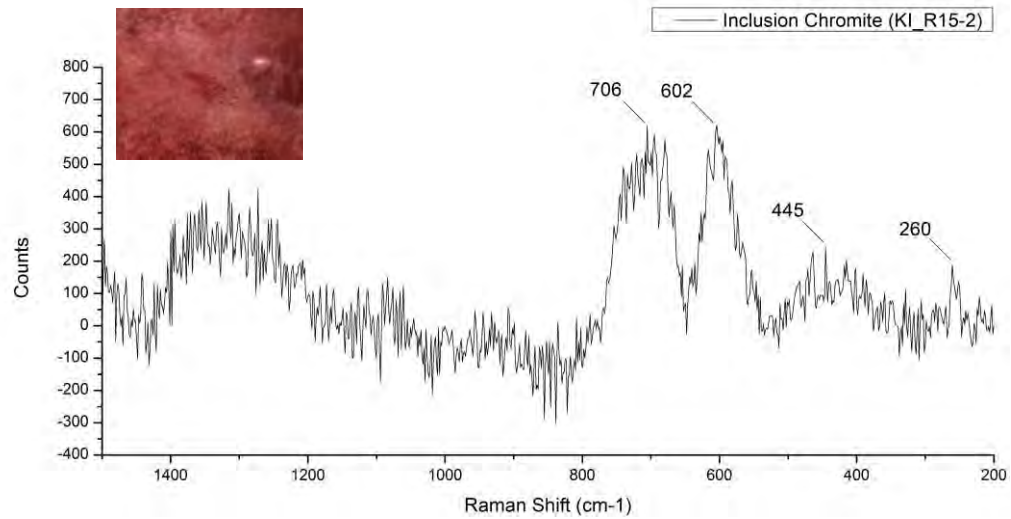
ผลวิเคราะห์ผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์ผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

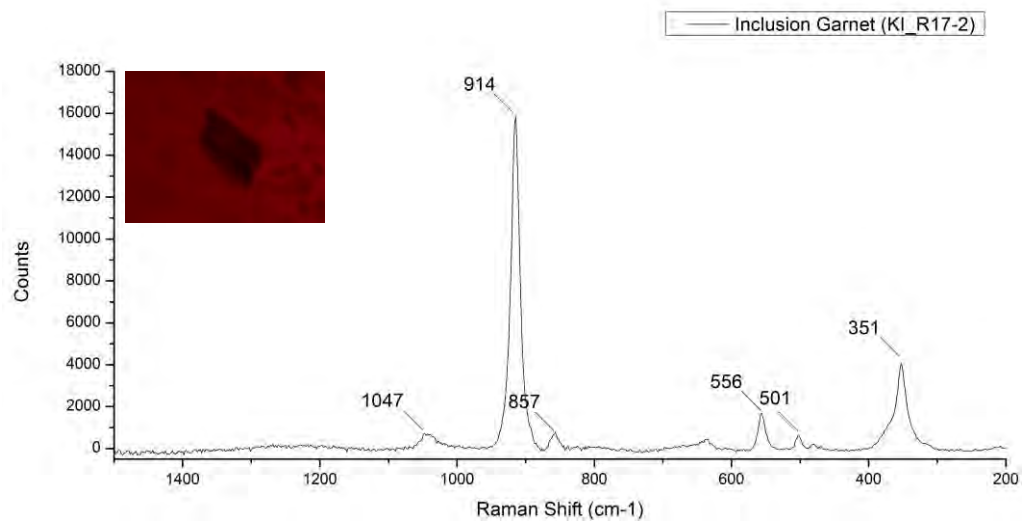
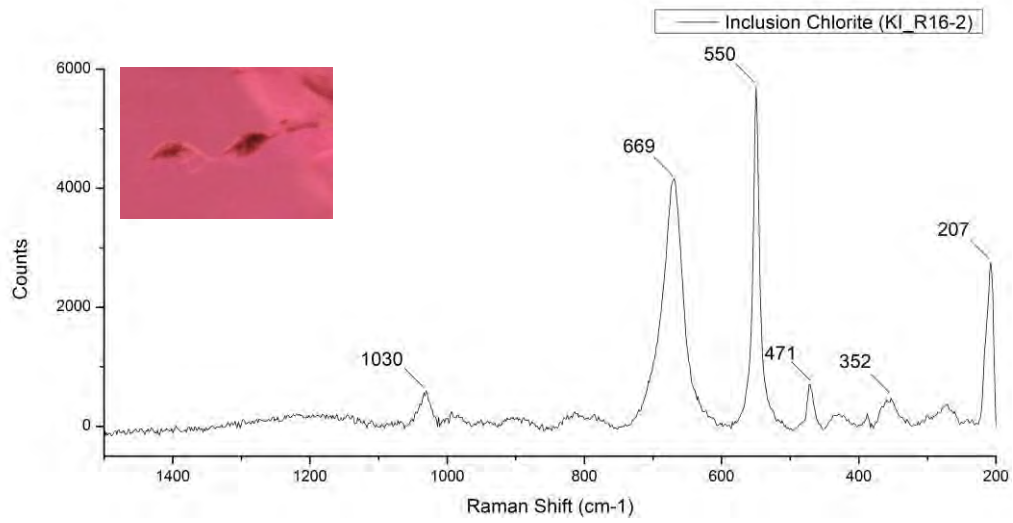


ผลวิเคราะห์หมักหินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

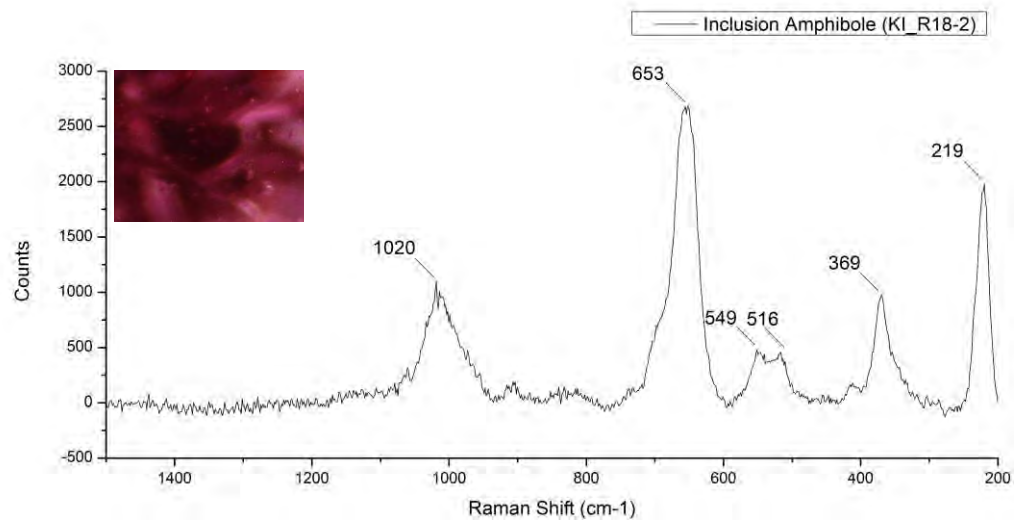
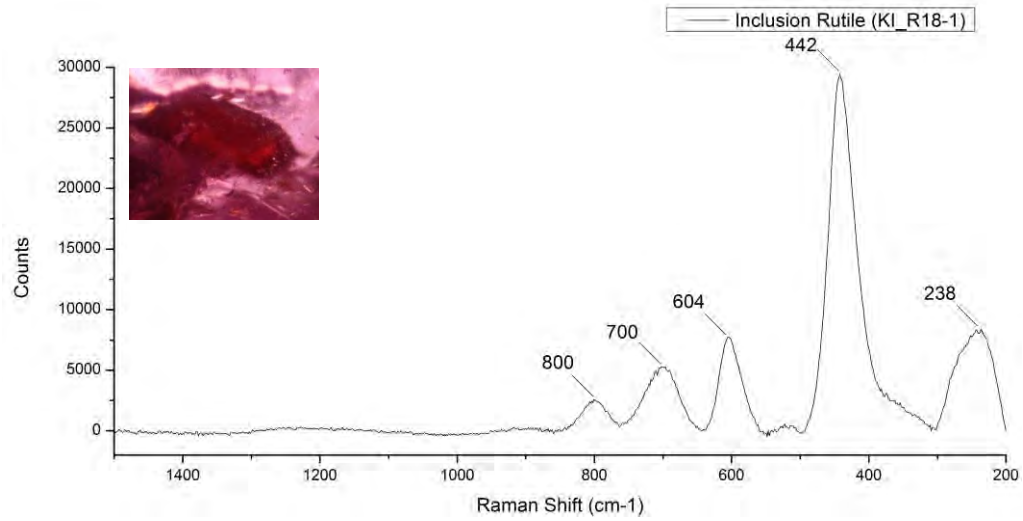


ผลวิเคราะห์หม่ลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

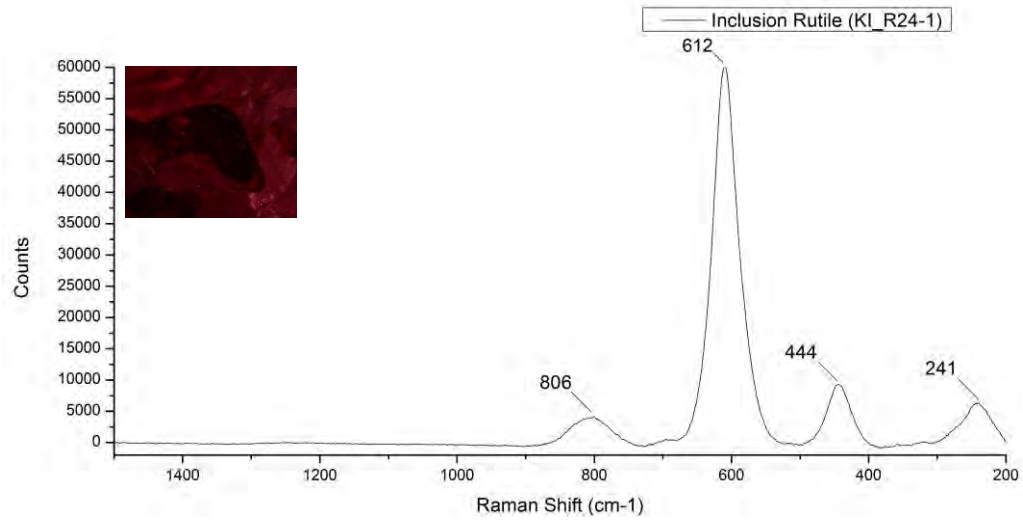
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินตี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์ผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



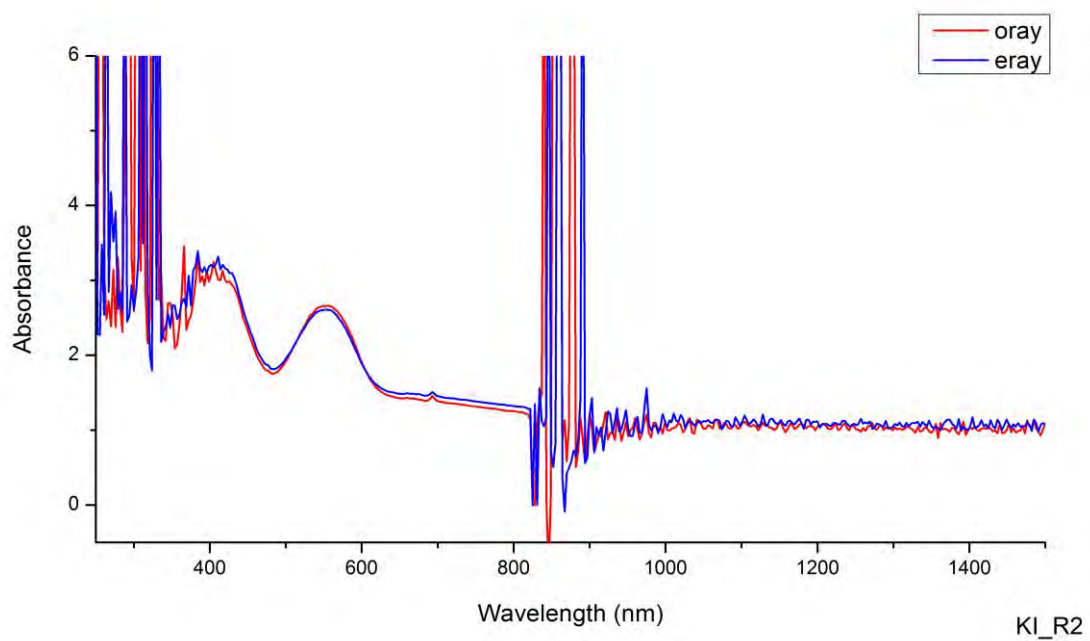
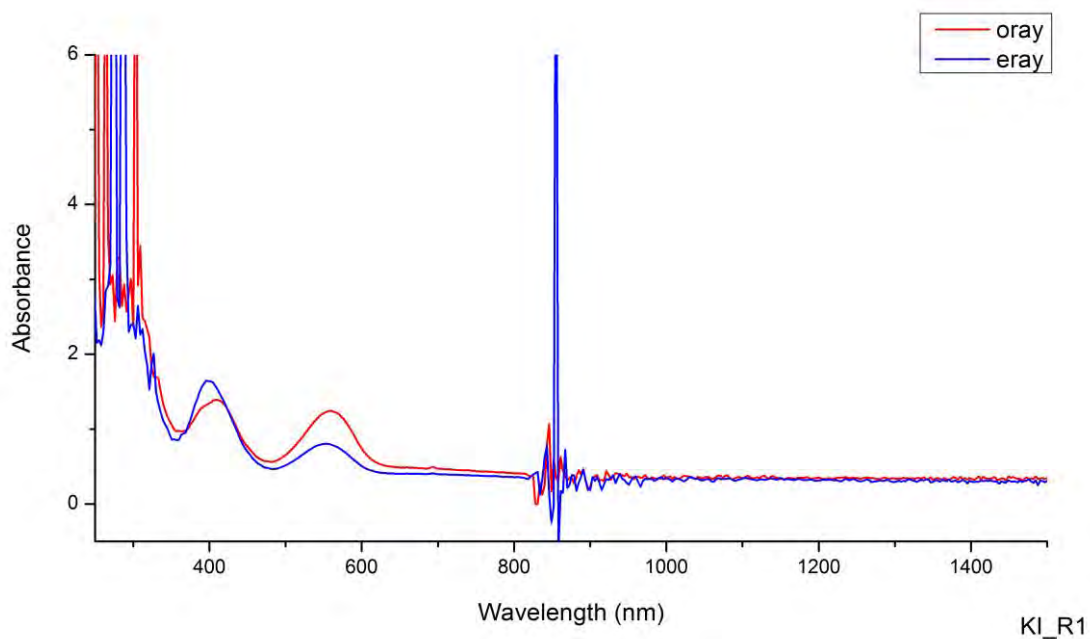
ผลวิเคราะห์หมักหินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



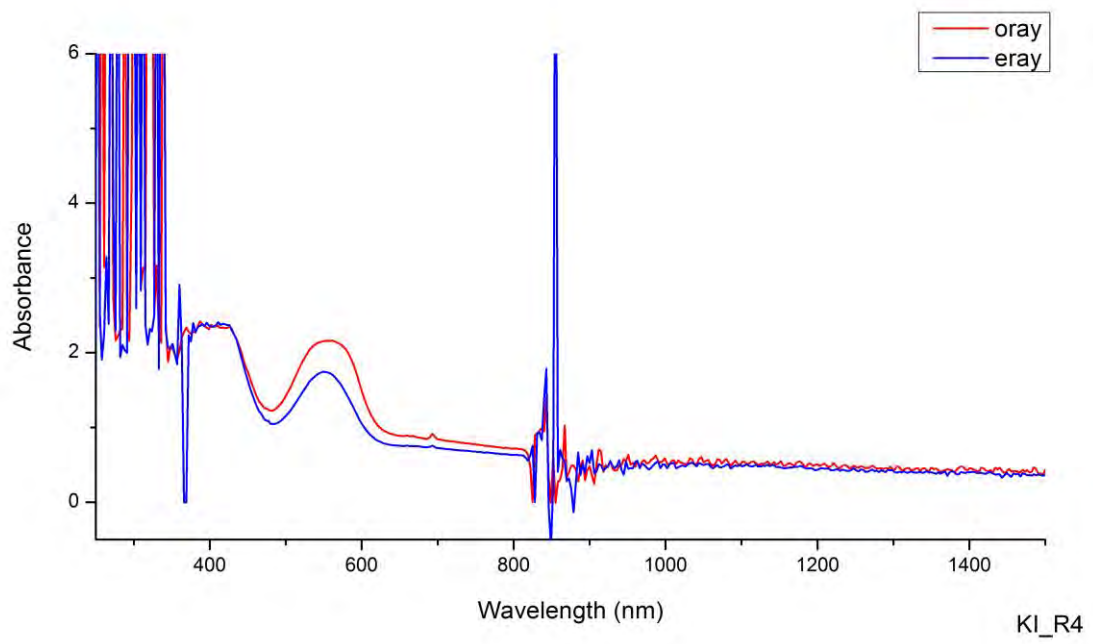
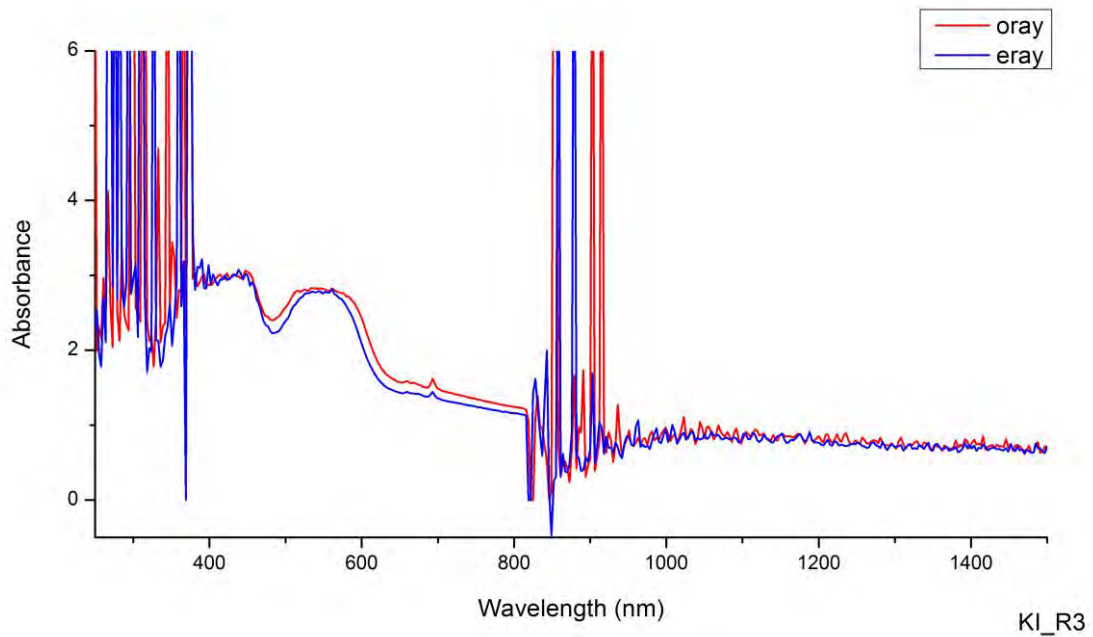
ภาคผนวก ค

ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

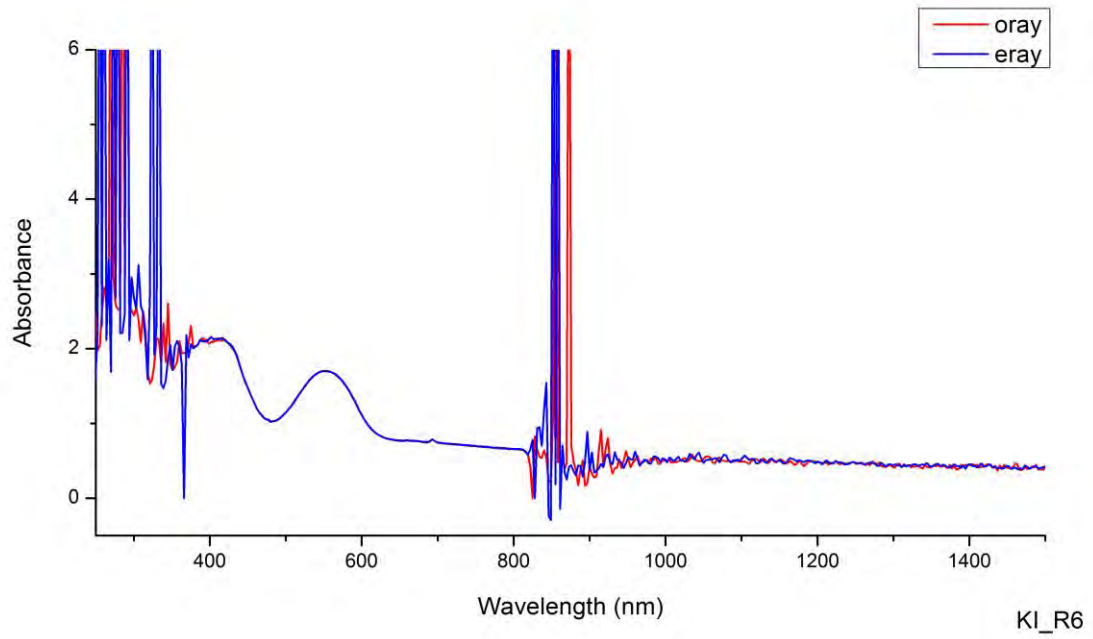
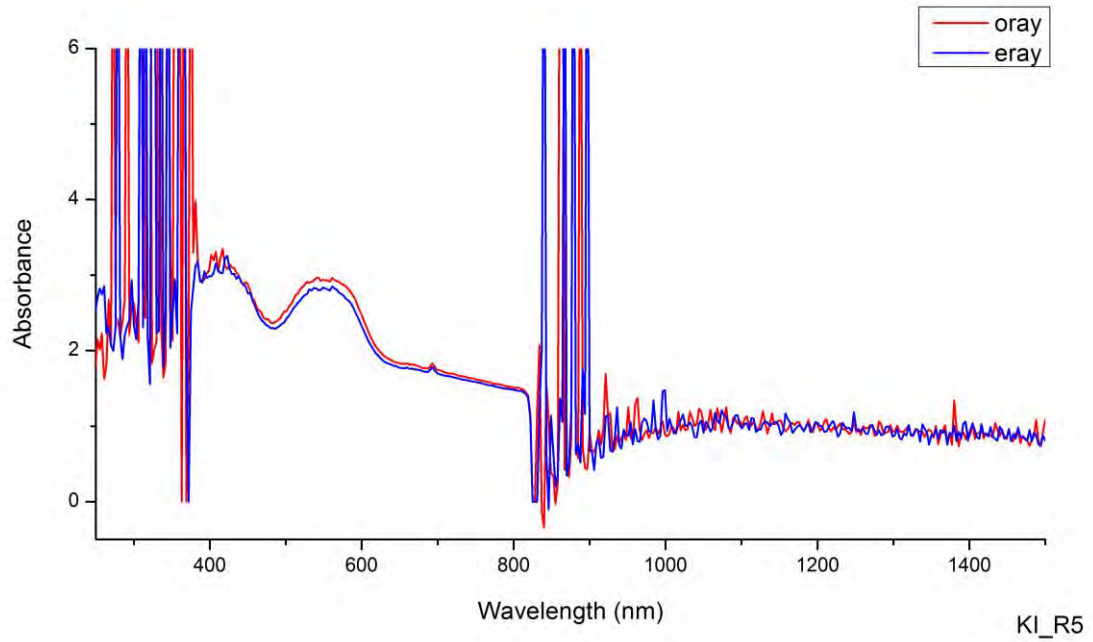
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



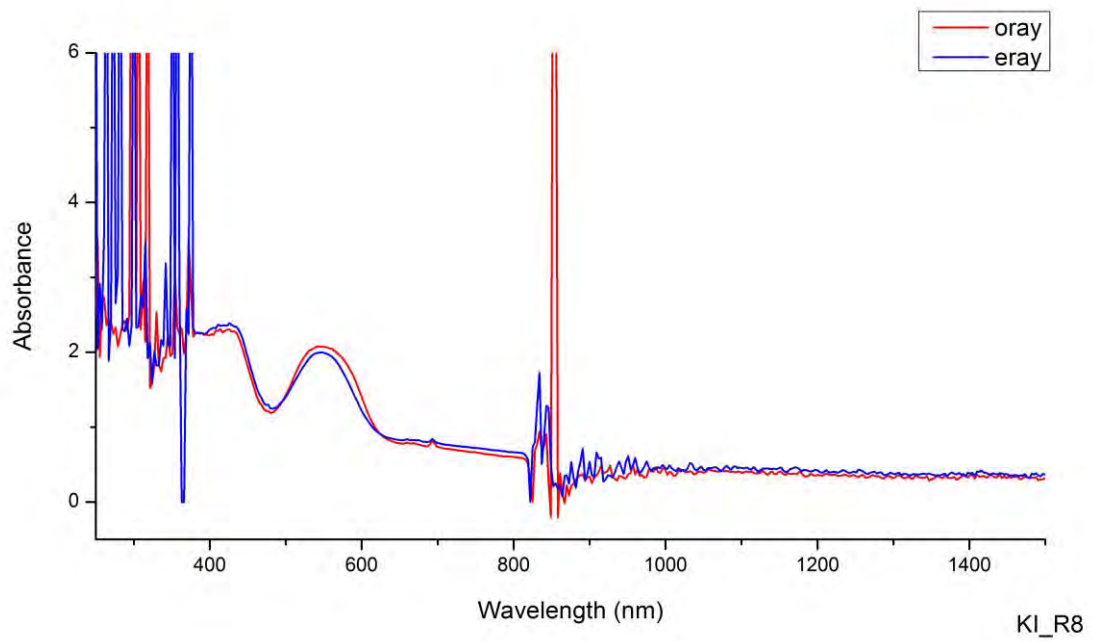
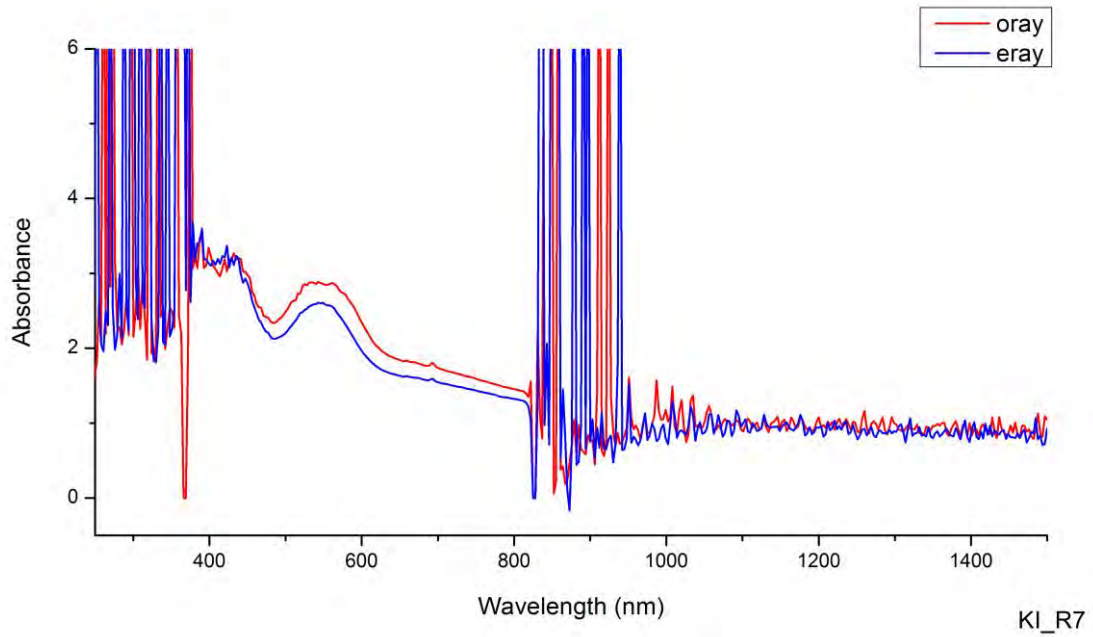
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



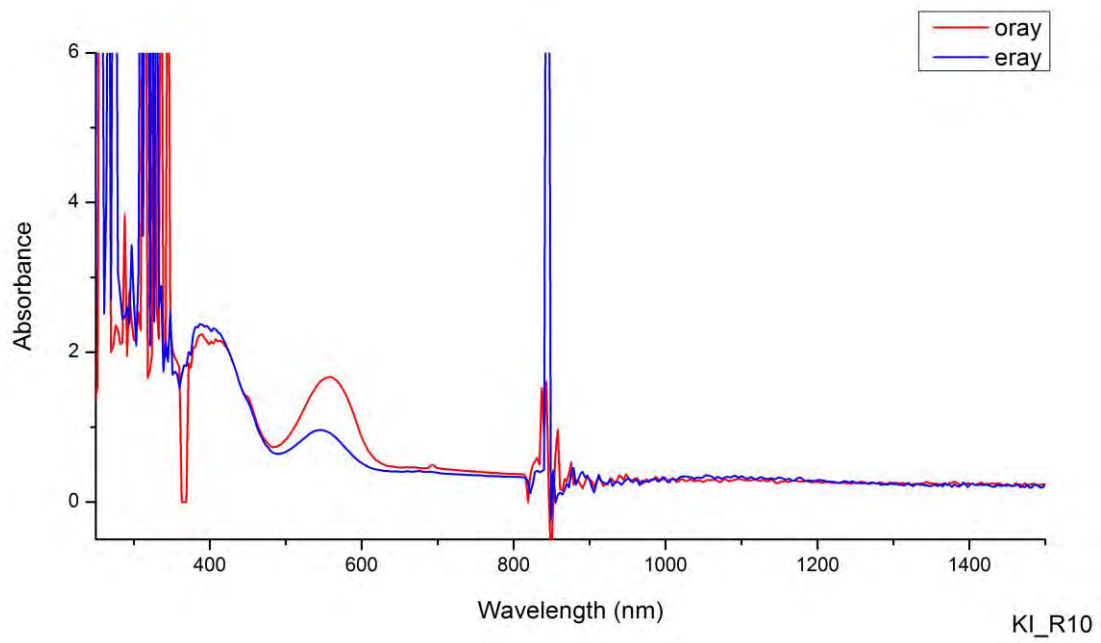
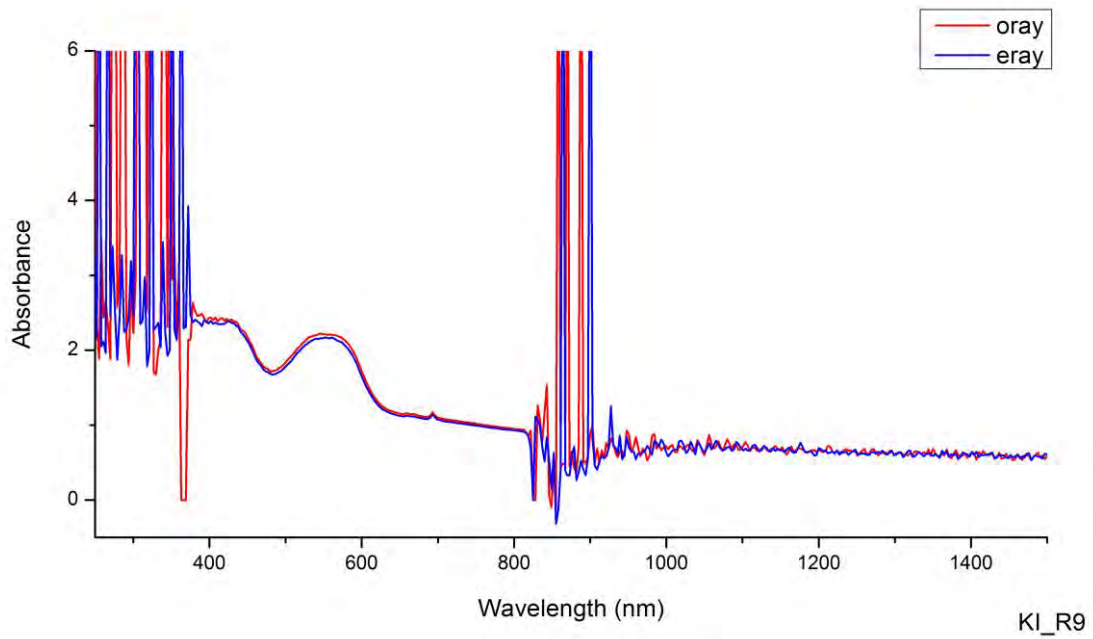
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



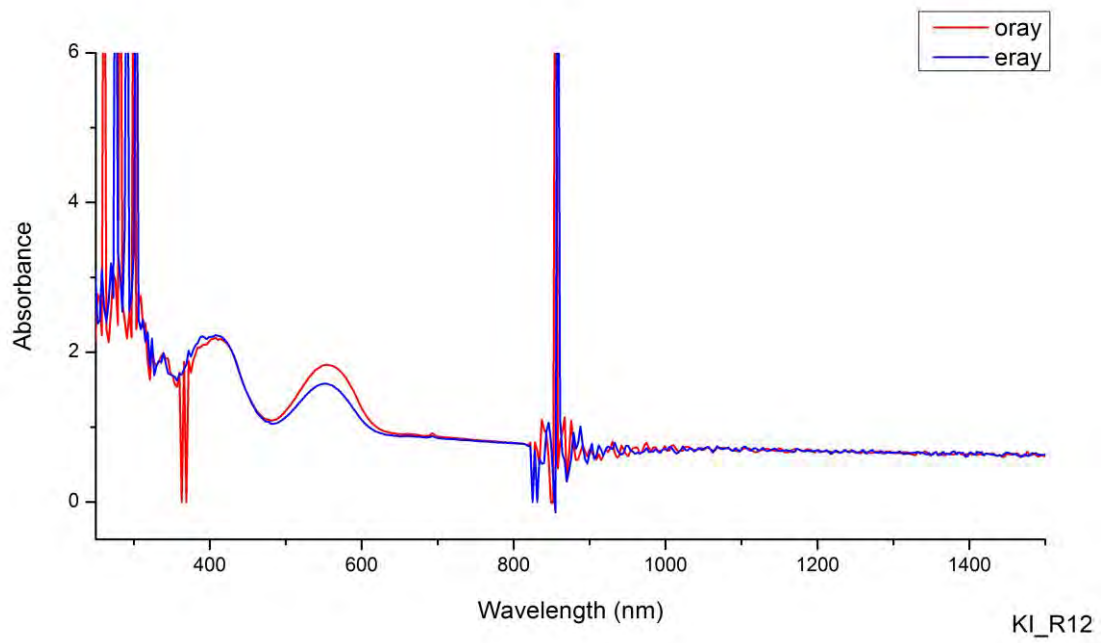
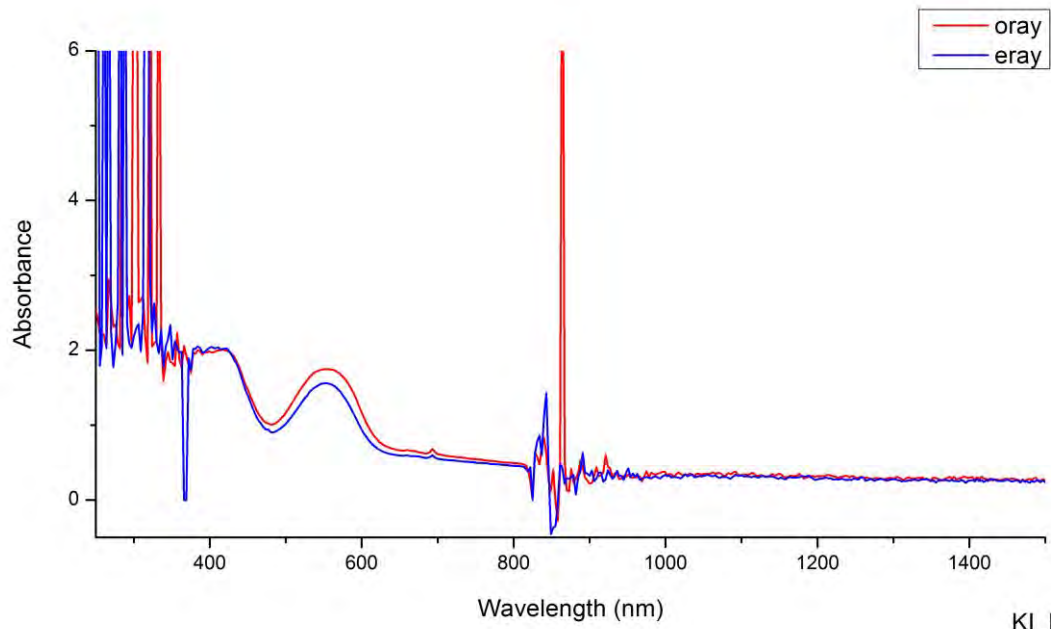
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



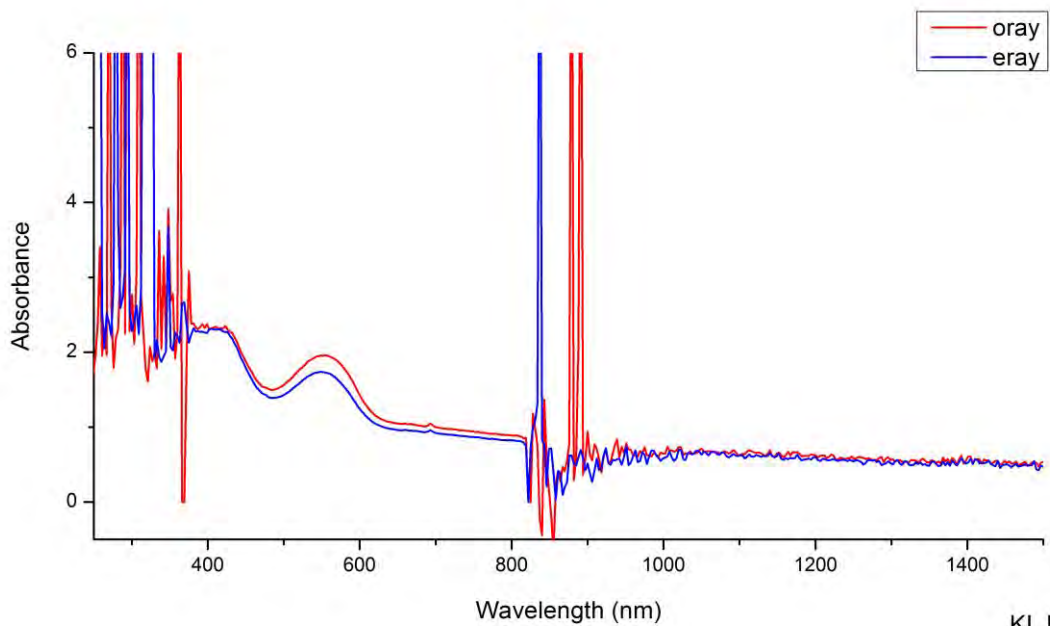
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



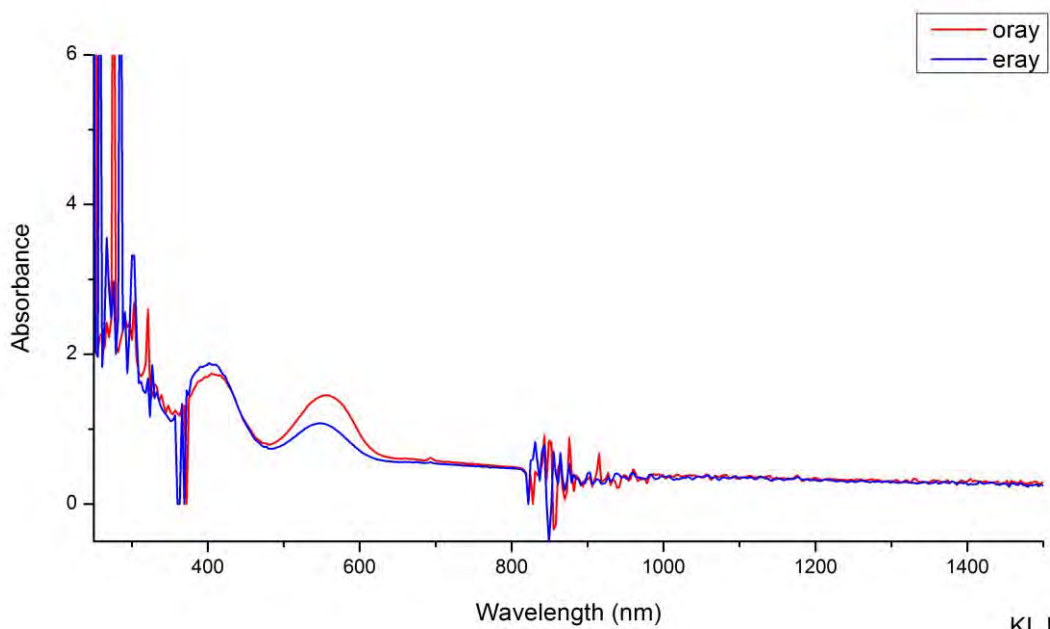
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

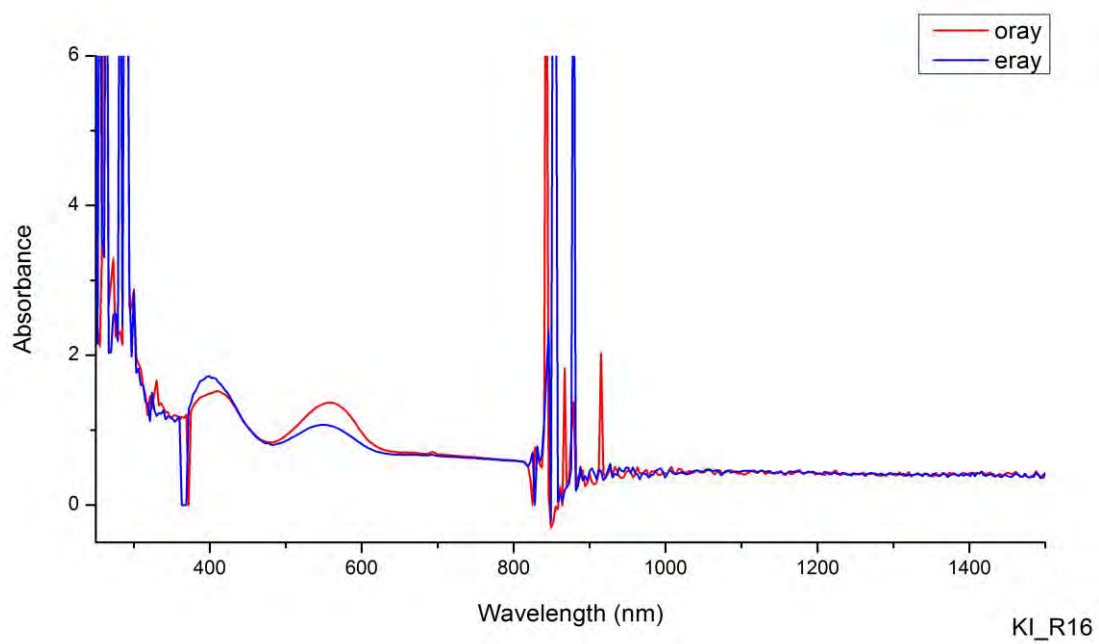
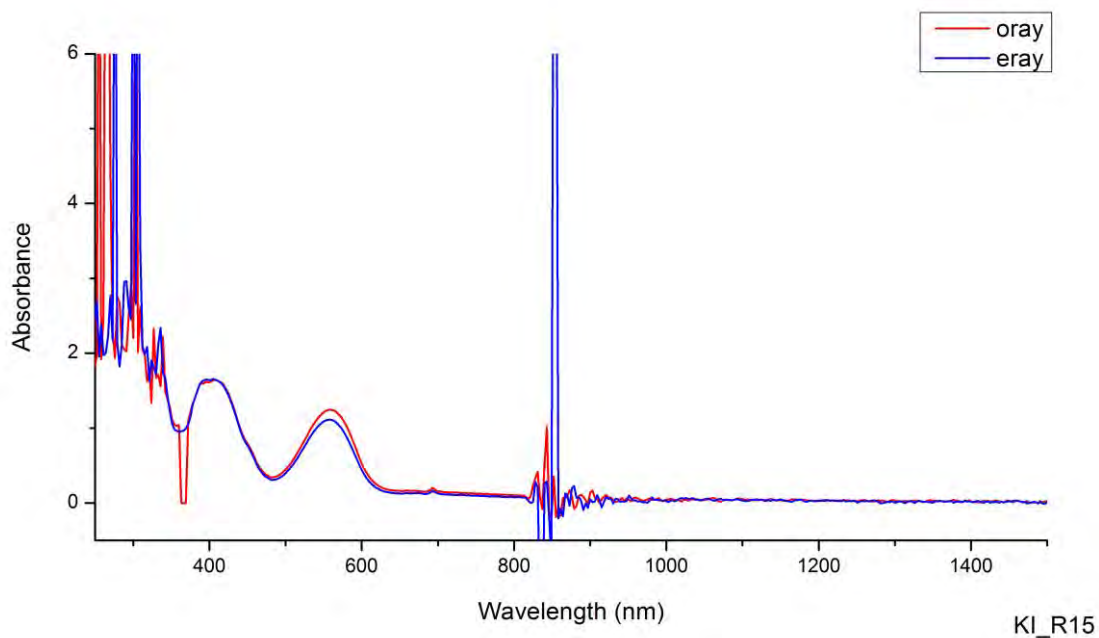


KI_R13

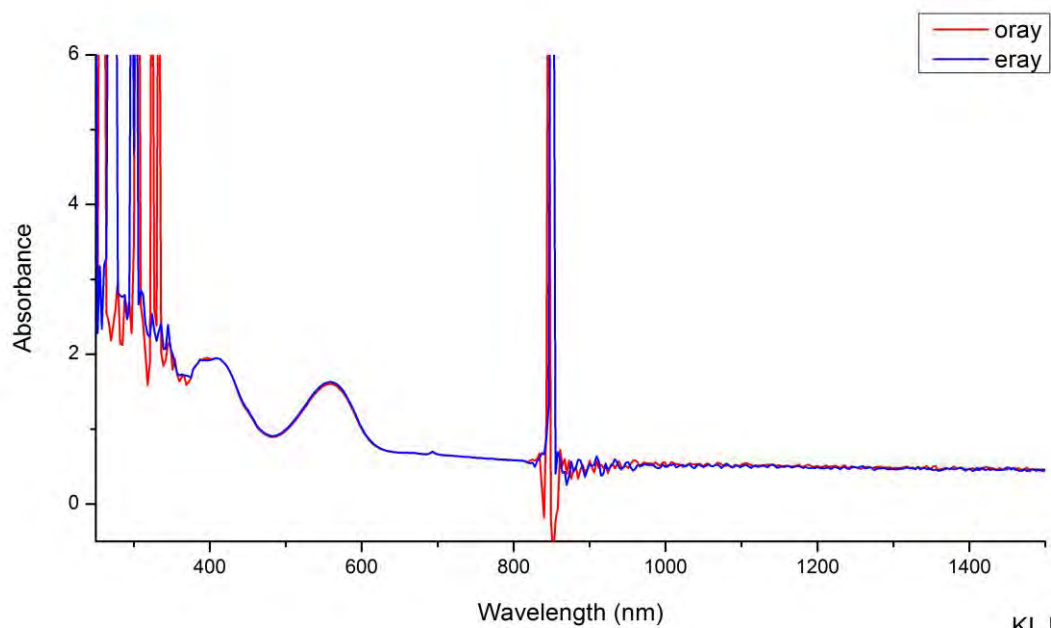


KI_R14

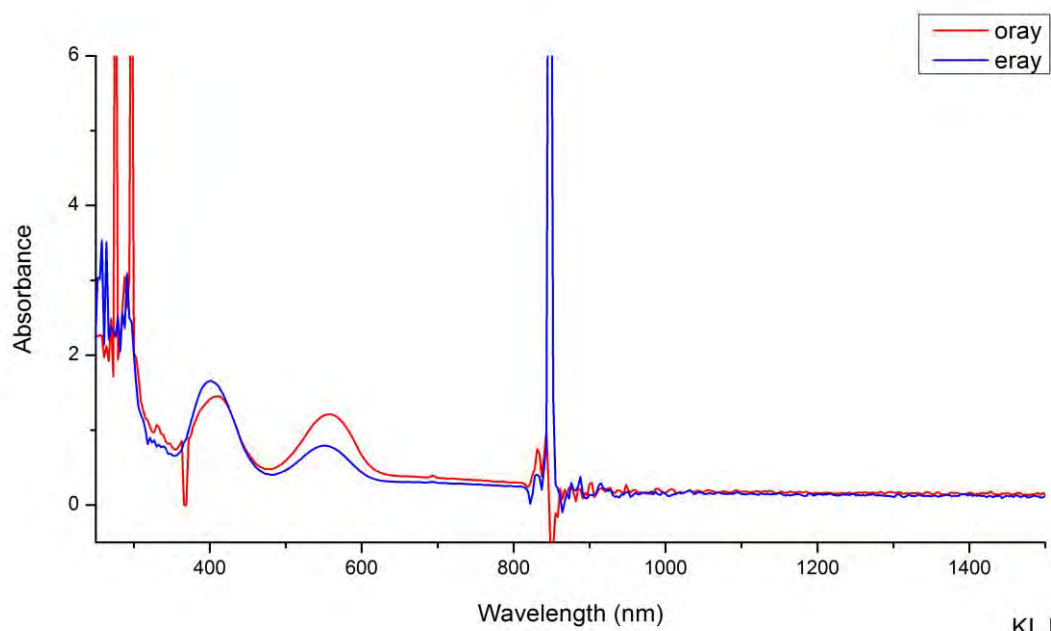
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

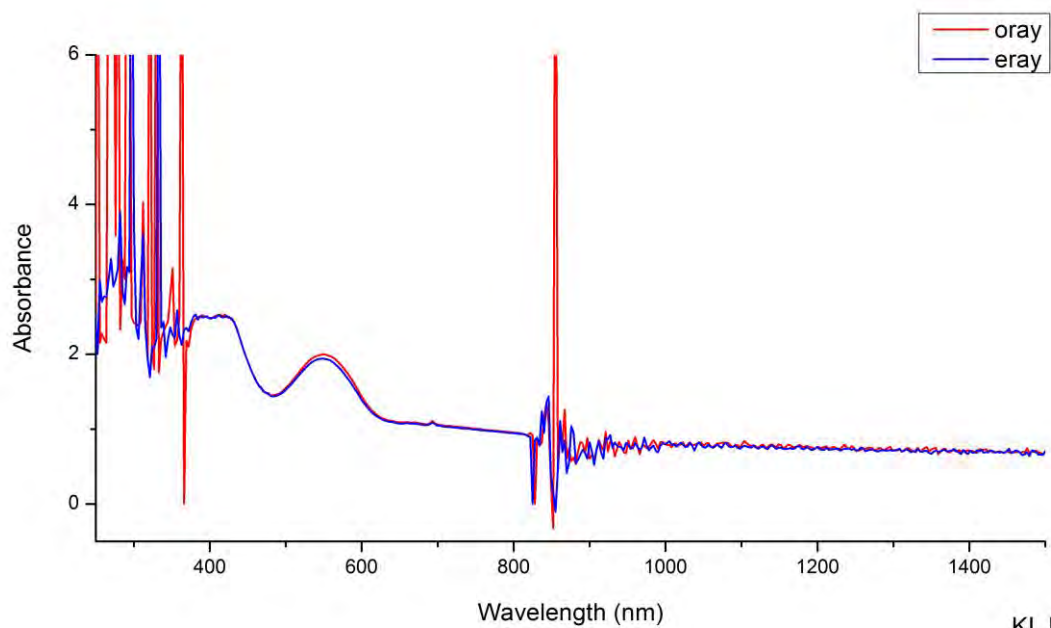


KI_R17

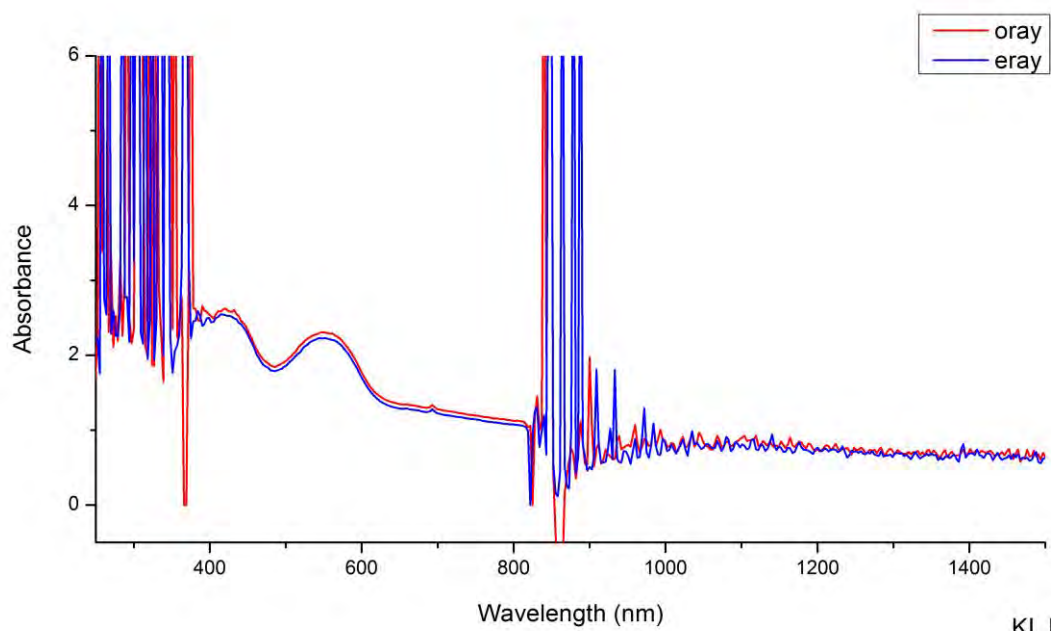


KI_R18

ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

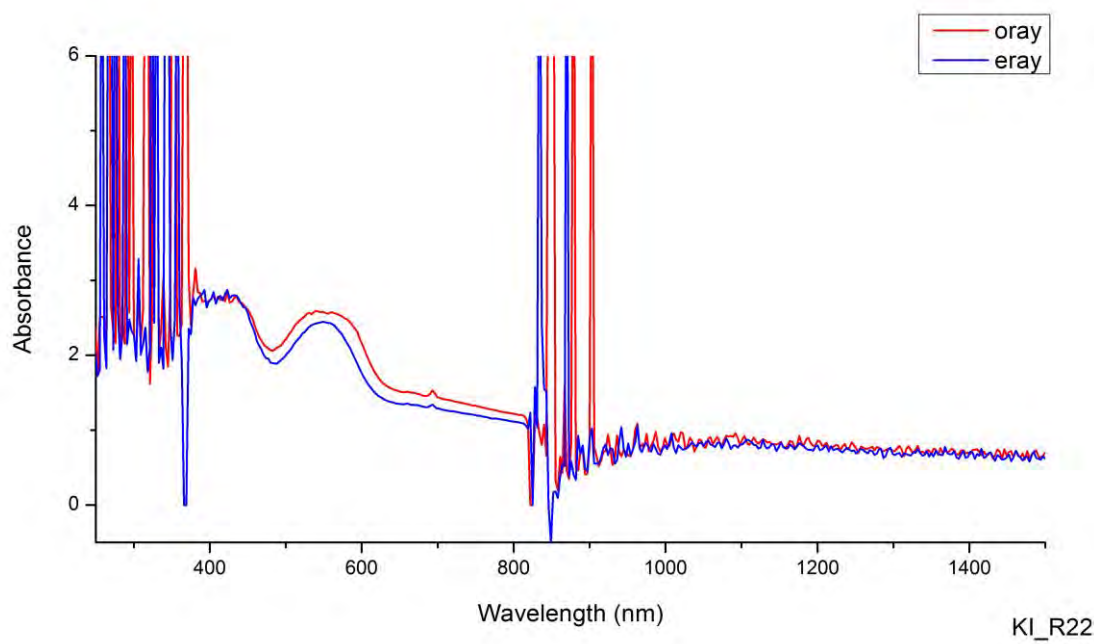
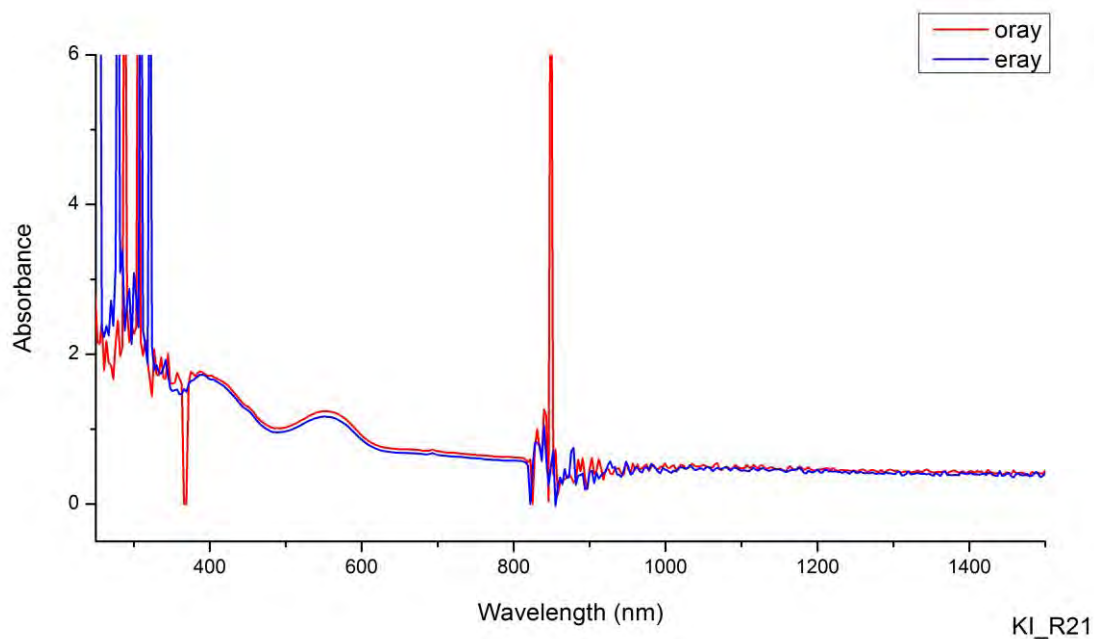


KI_R19

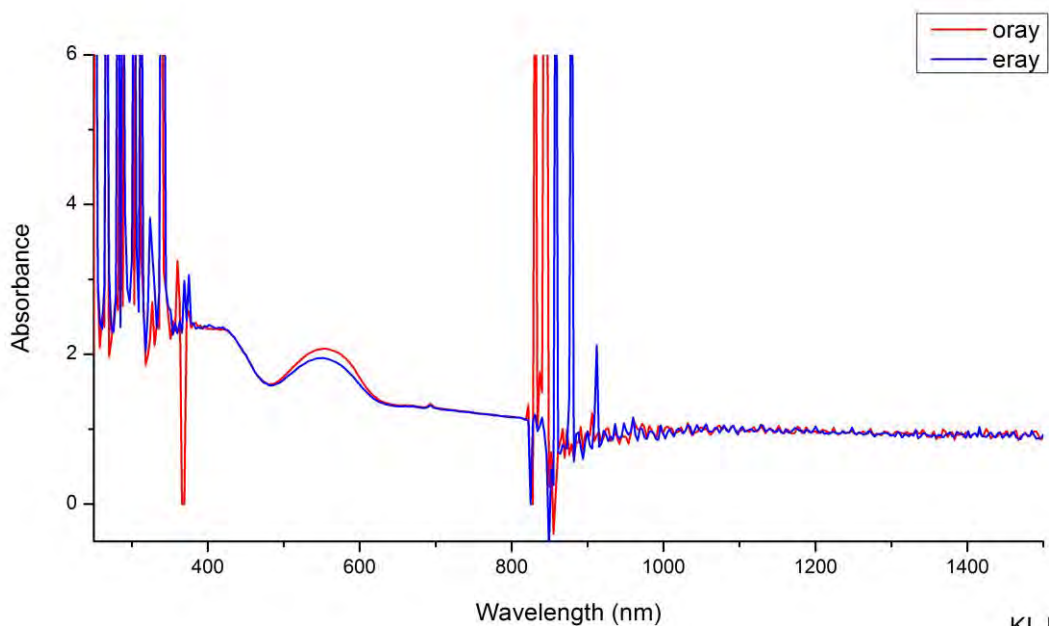


KI_R20

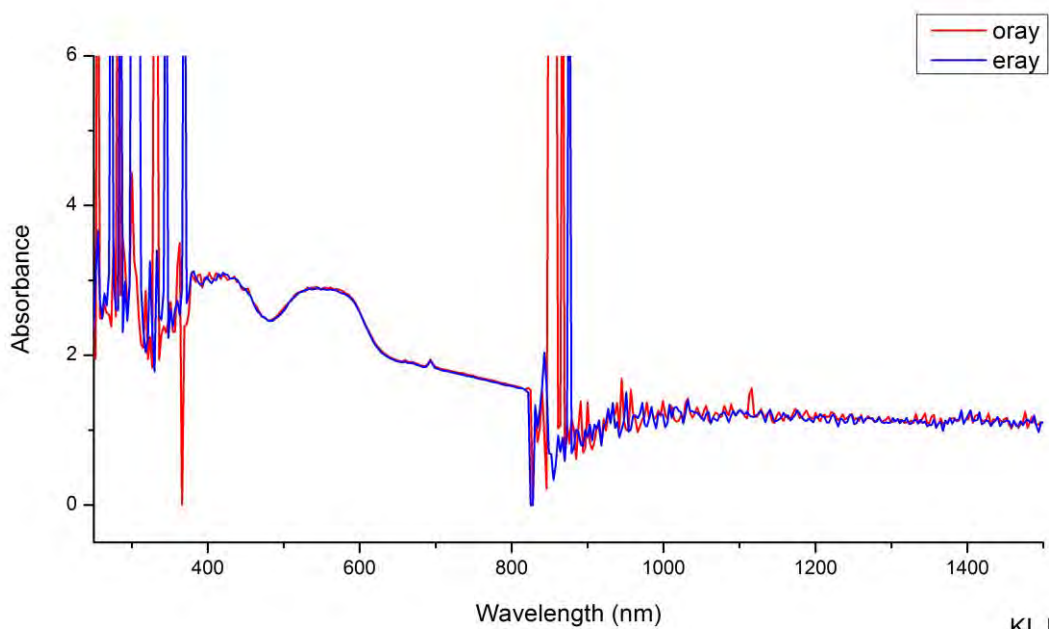
ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

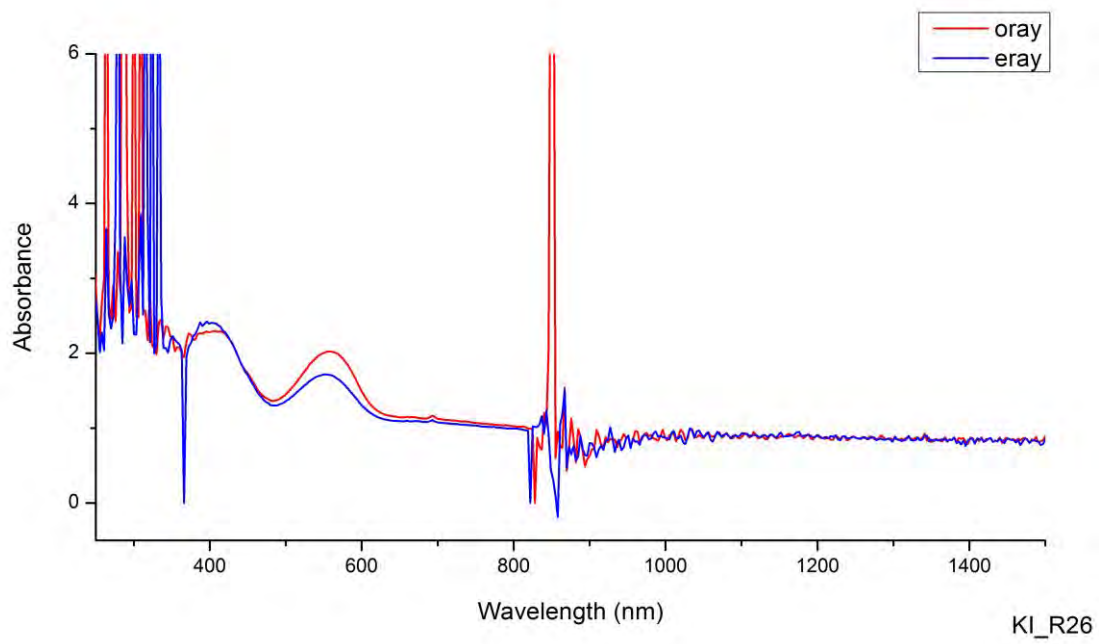
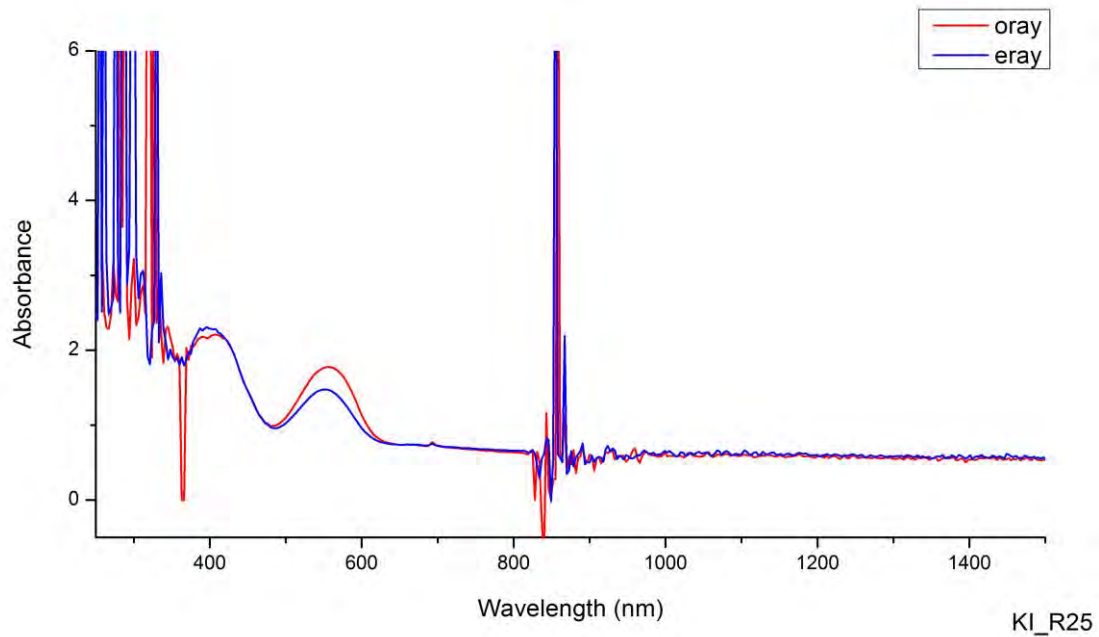


KI_R23



KI_R24

ผลวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR
จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย



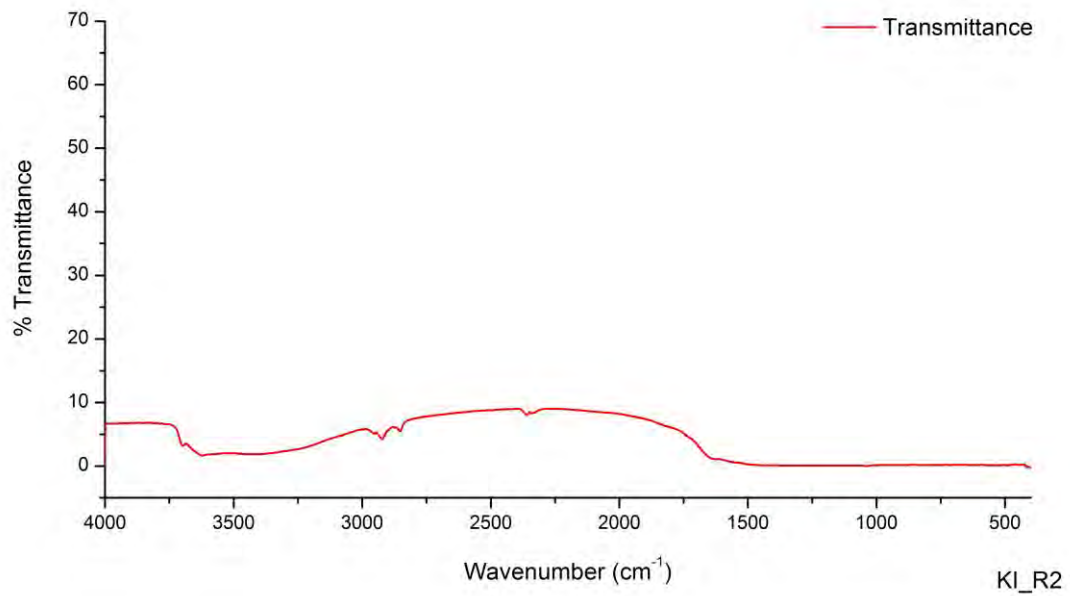
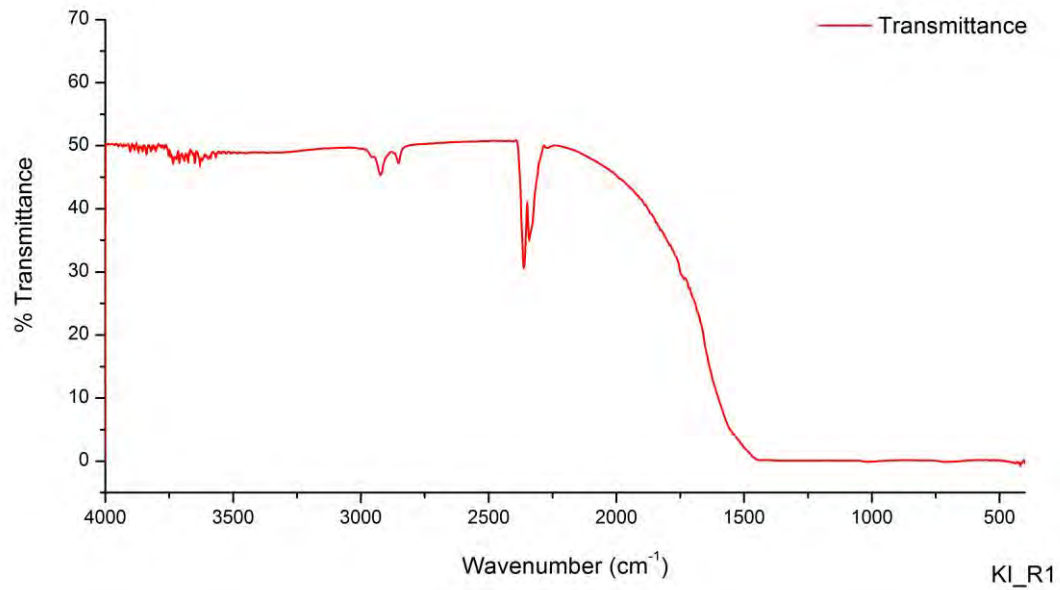
ภาคผนวก ง

ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรินดี ประเทศแทนซาเนีย

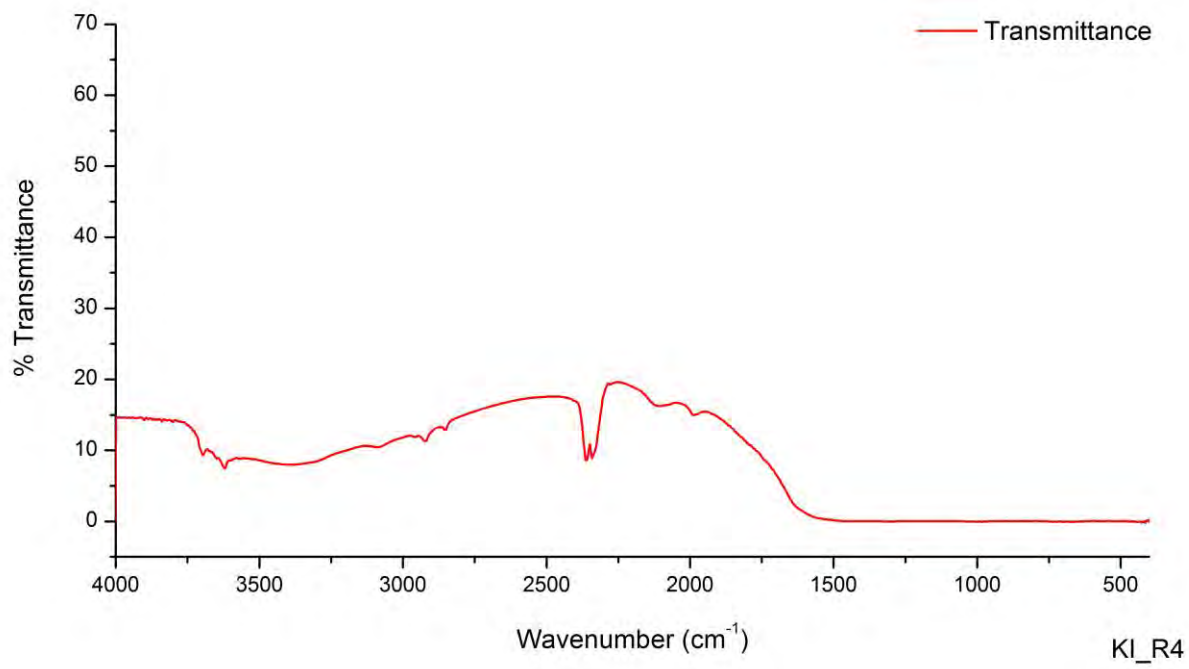
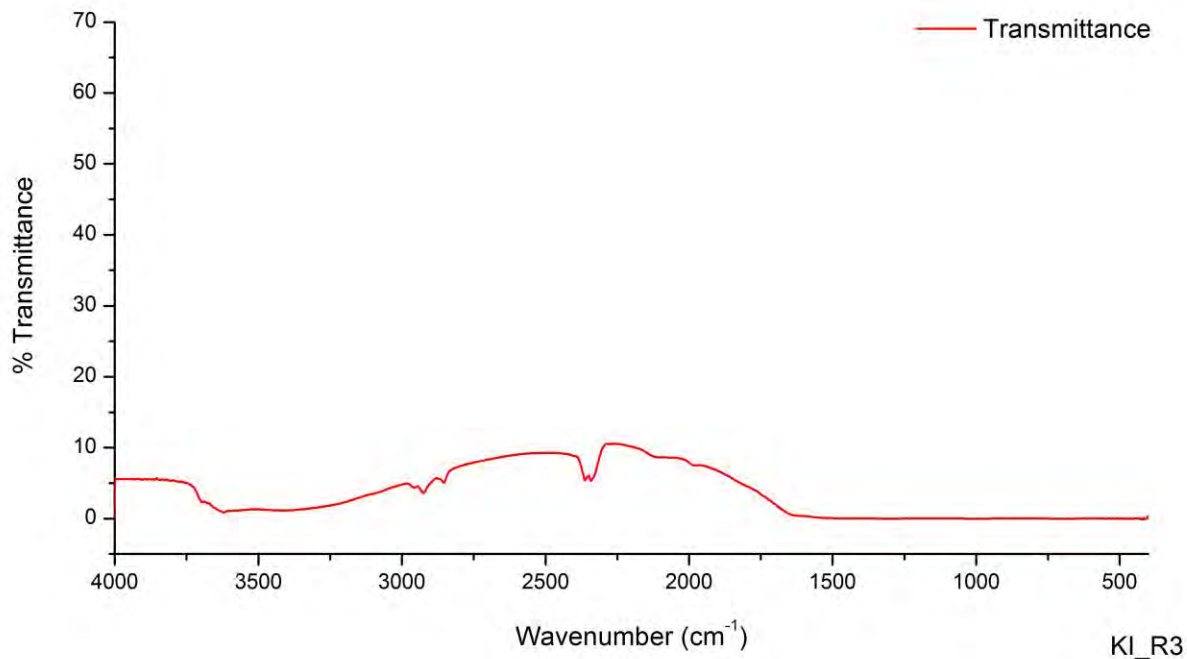
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



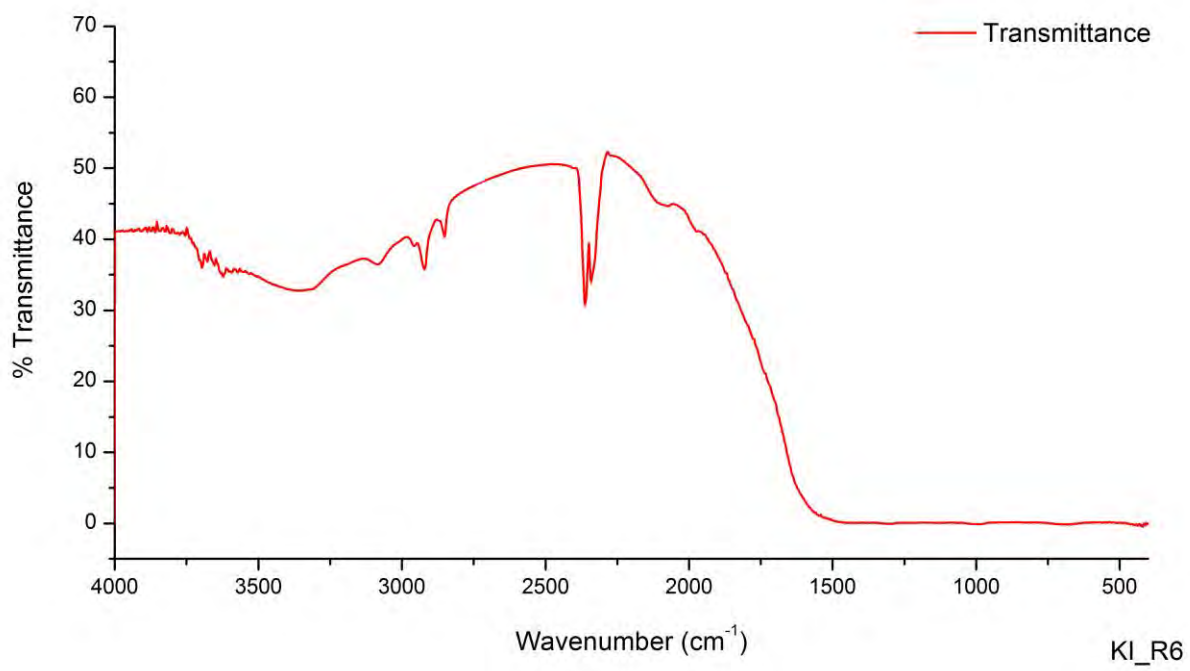
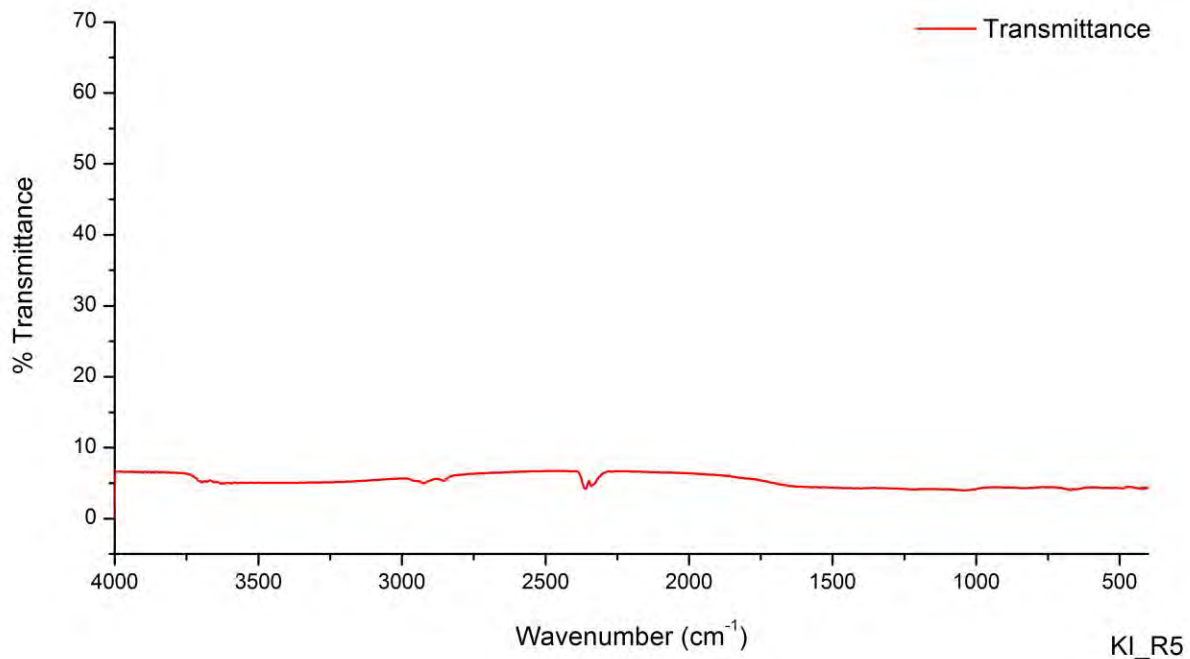
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



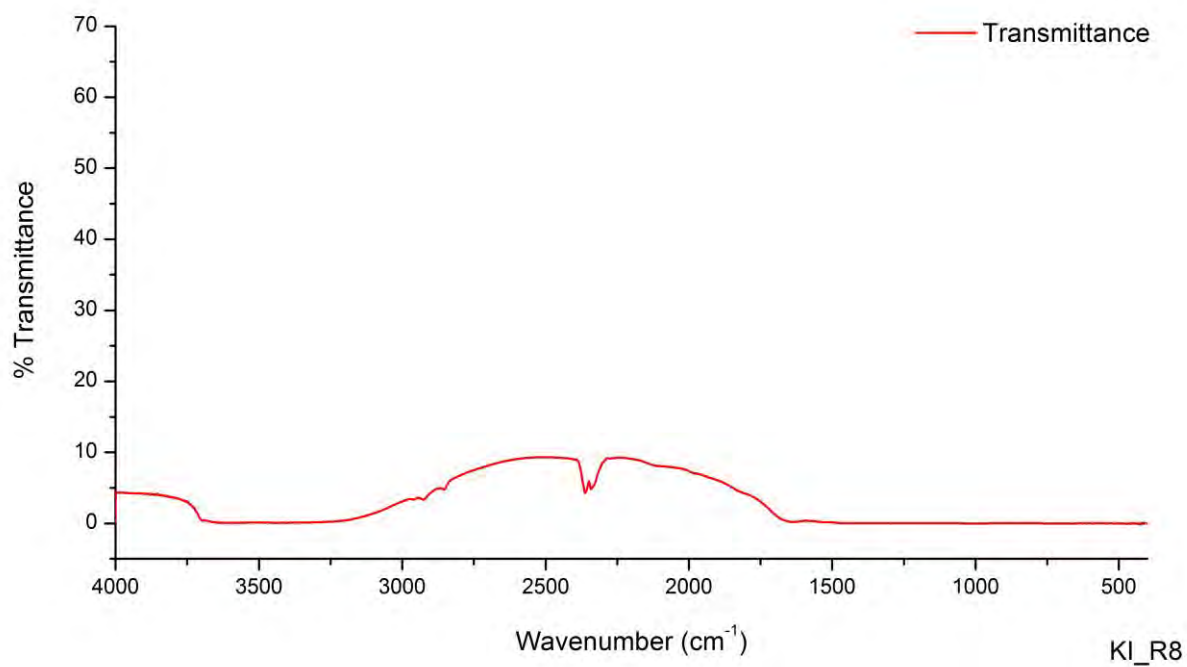
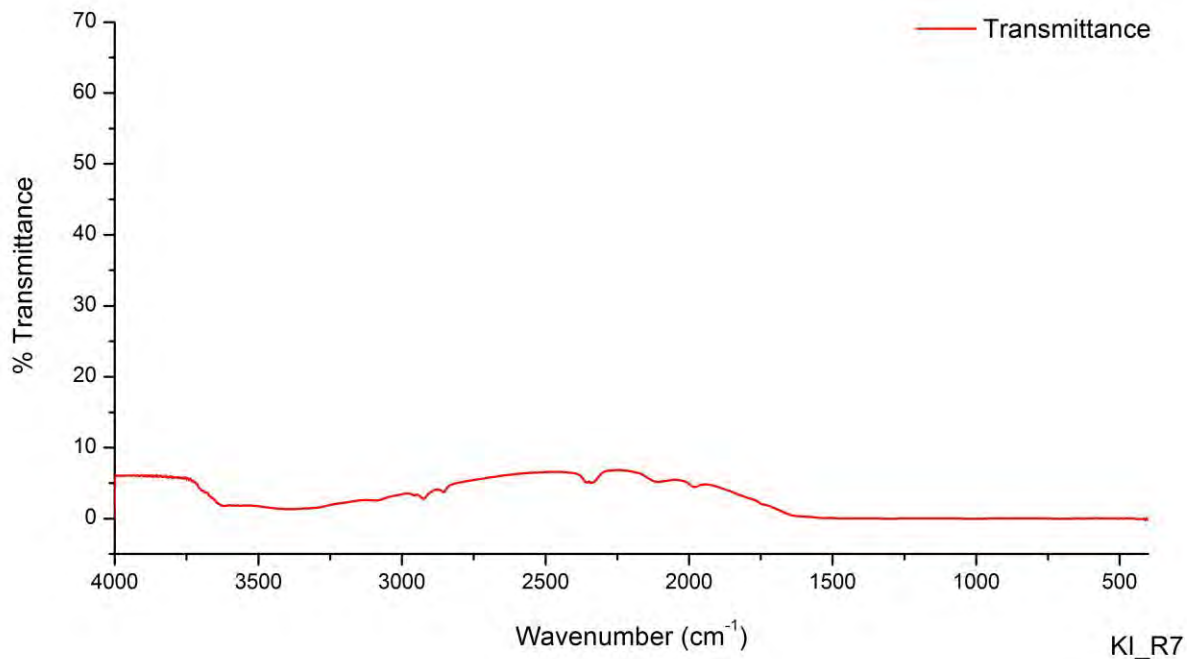
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



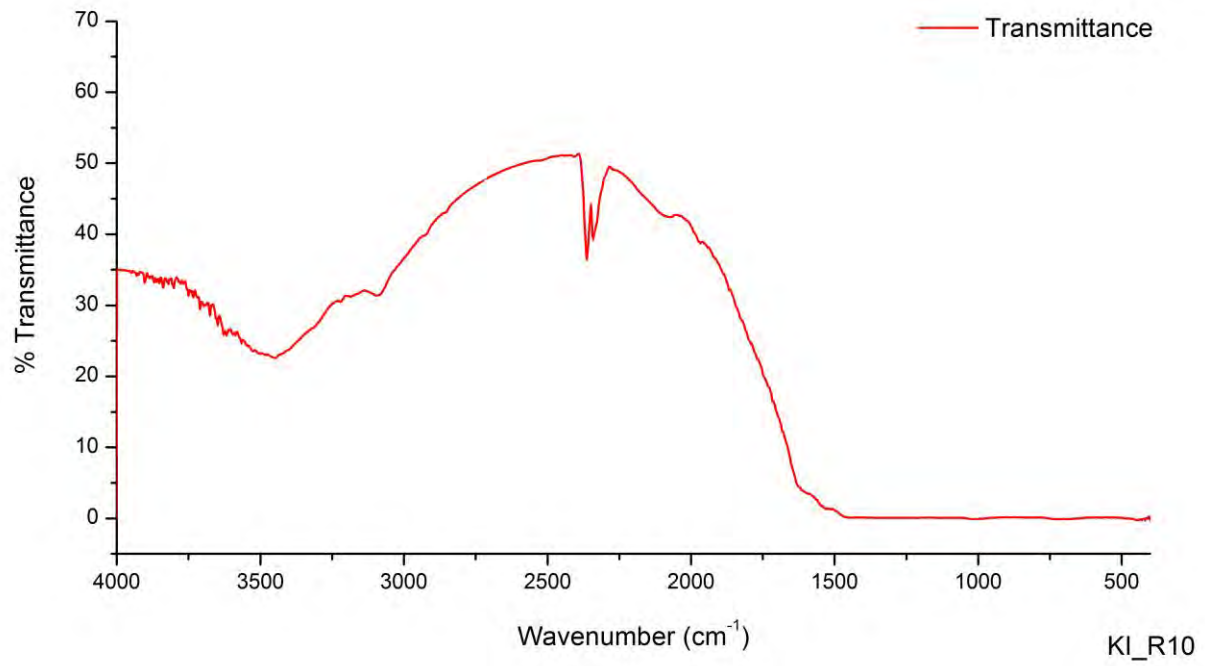
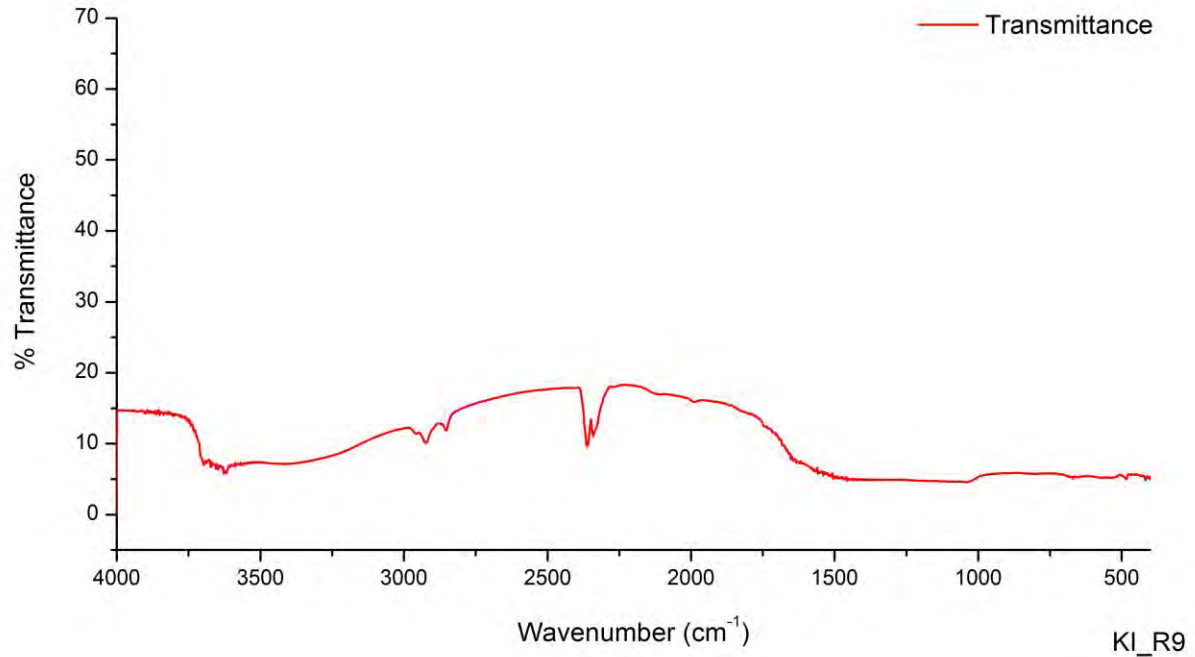
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

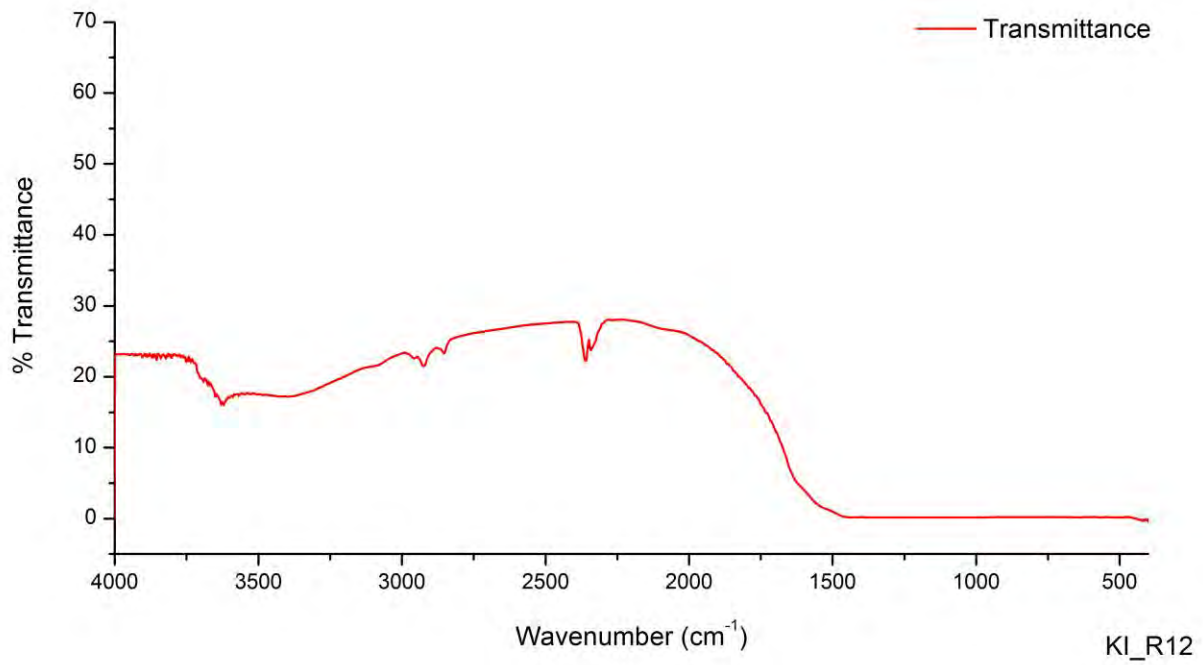
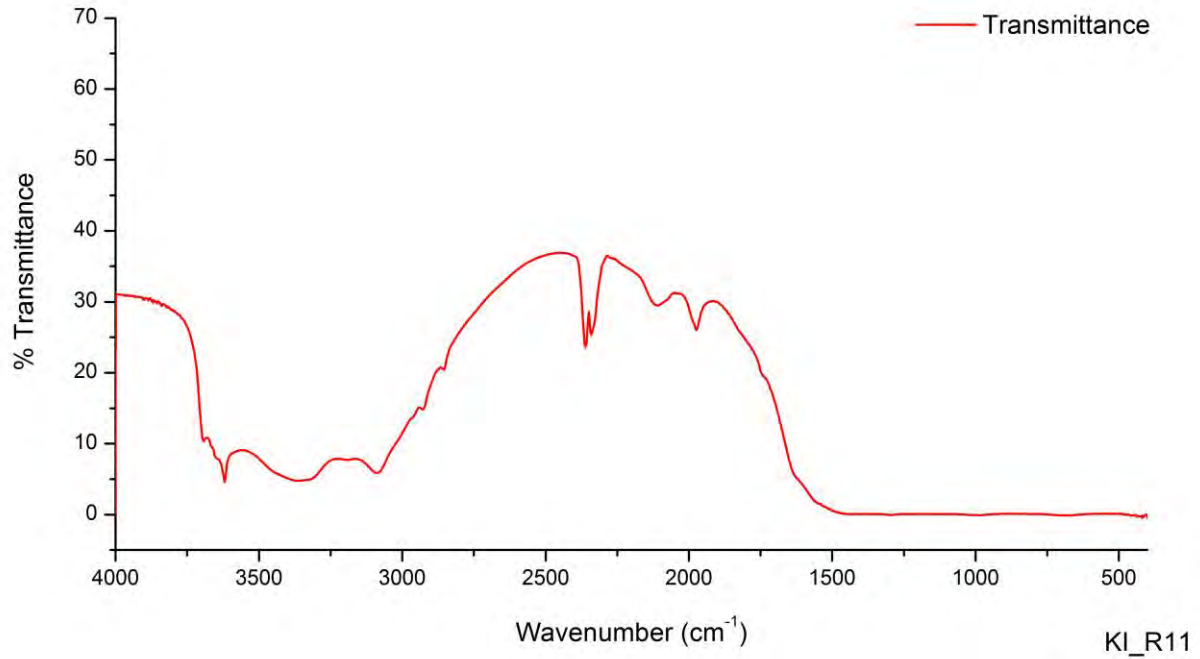


ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

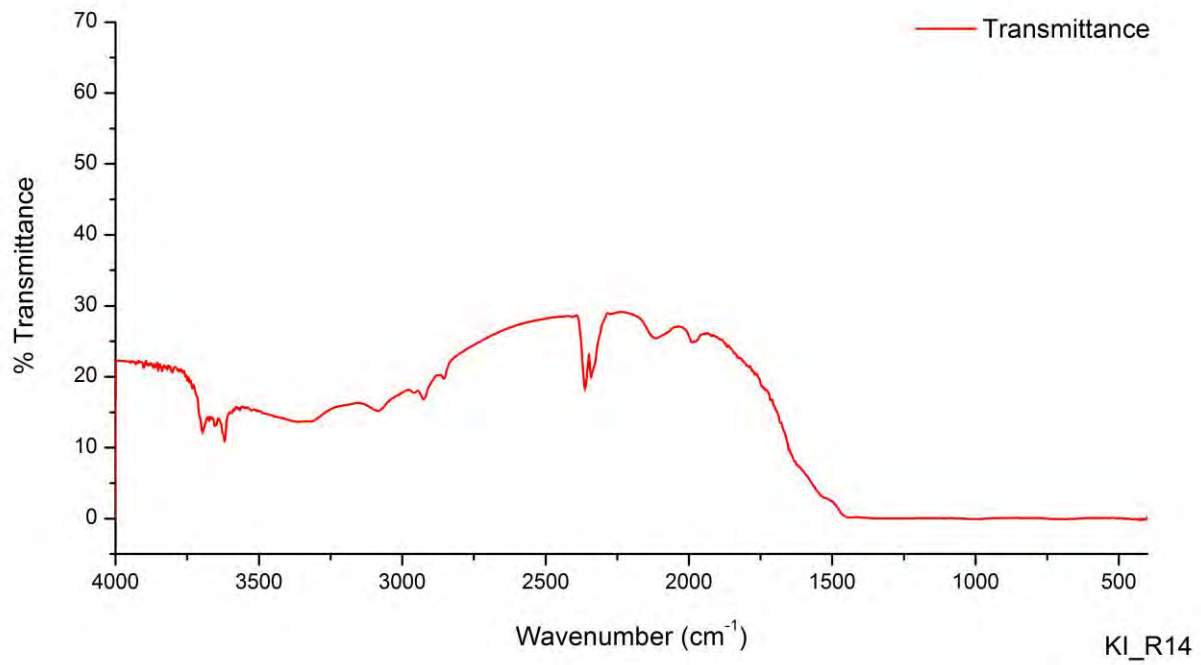
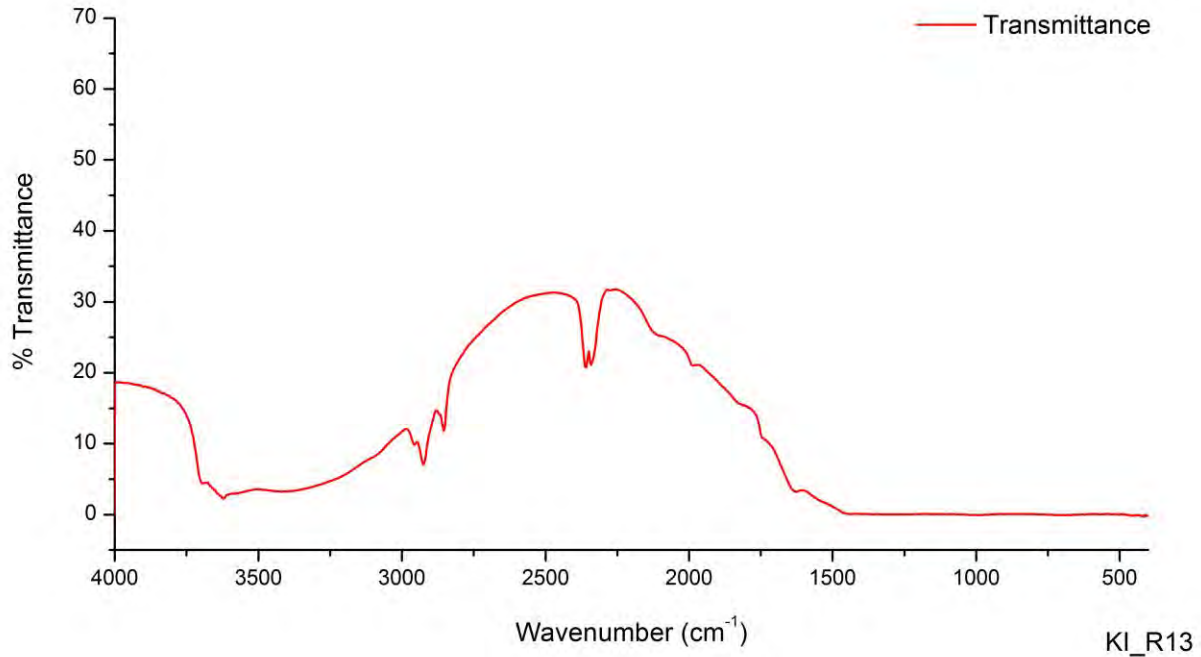


ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)
จากพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย



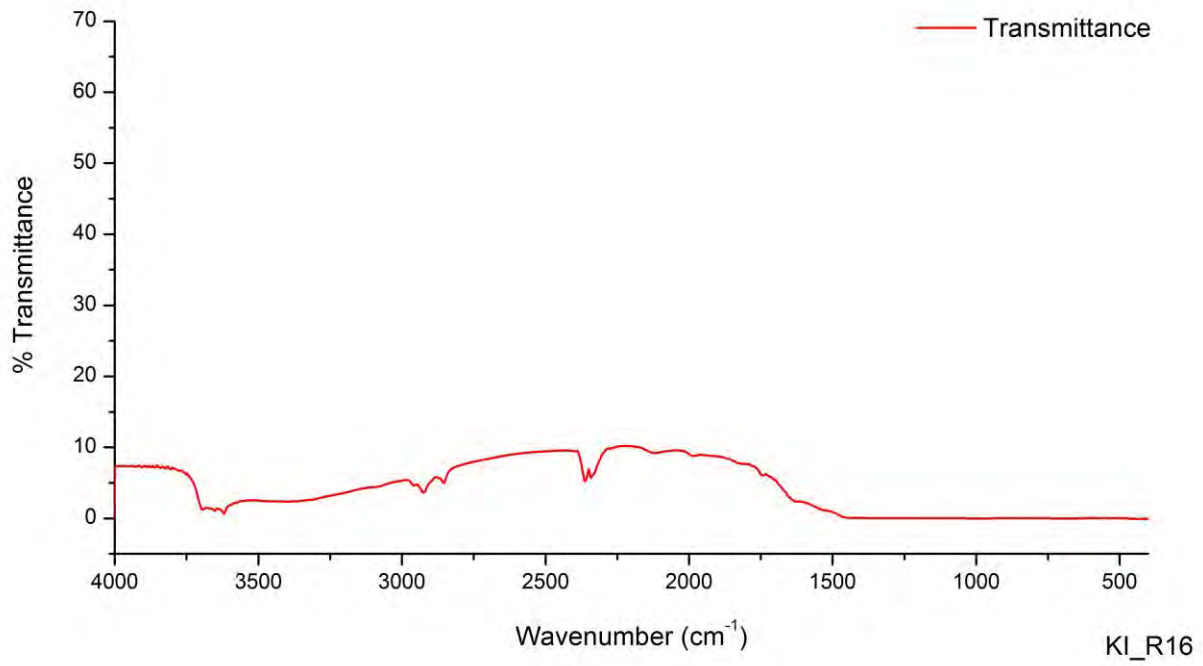
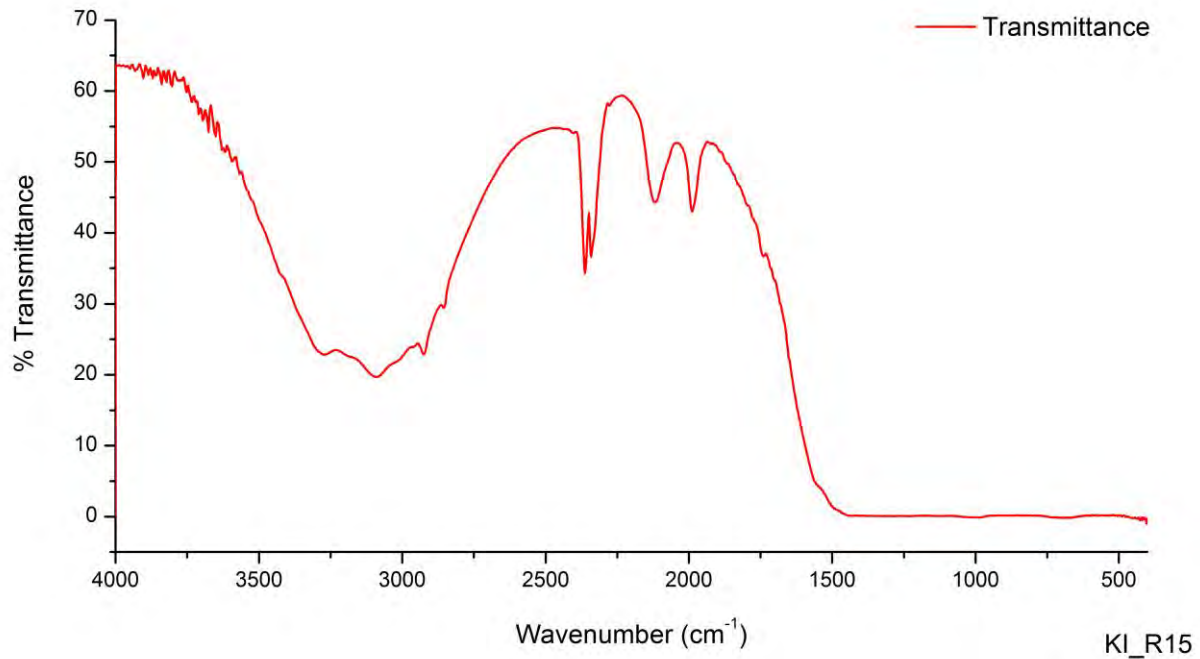
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย



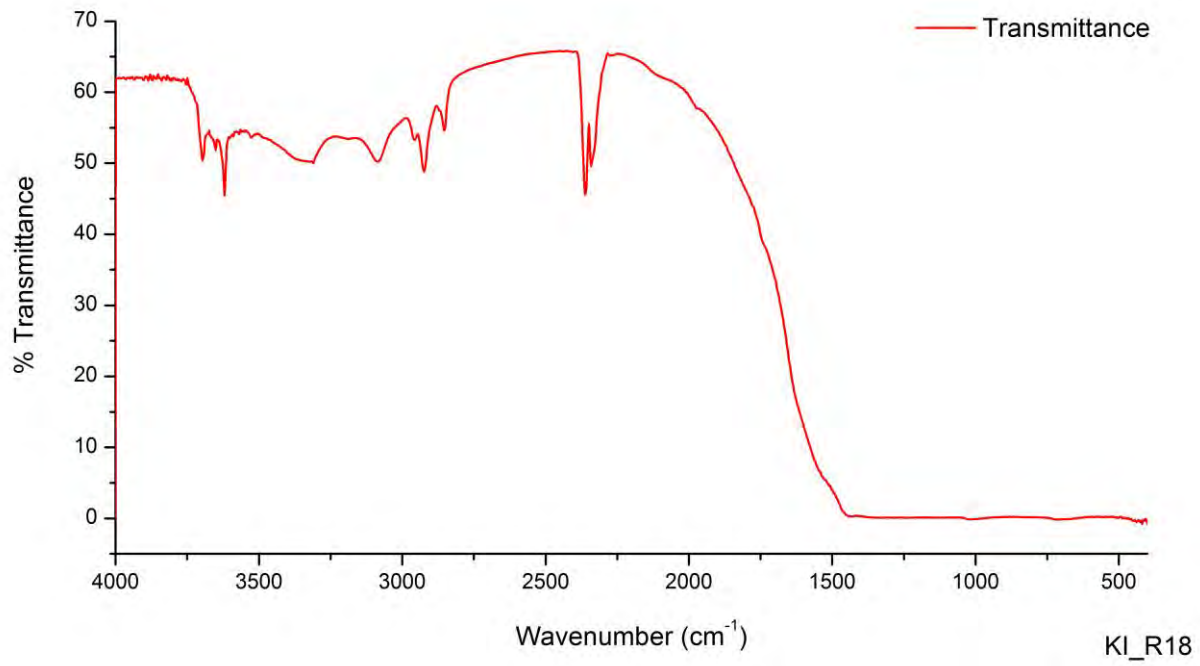
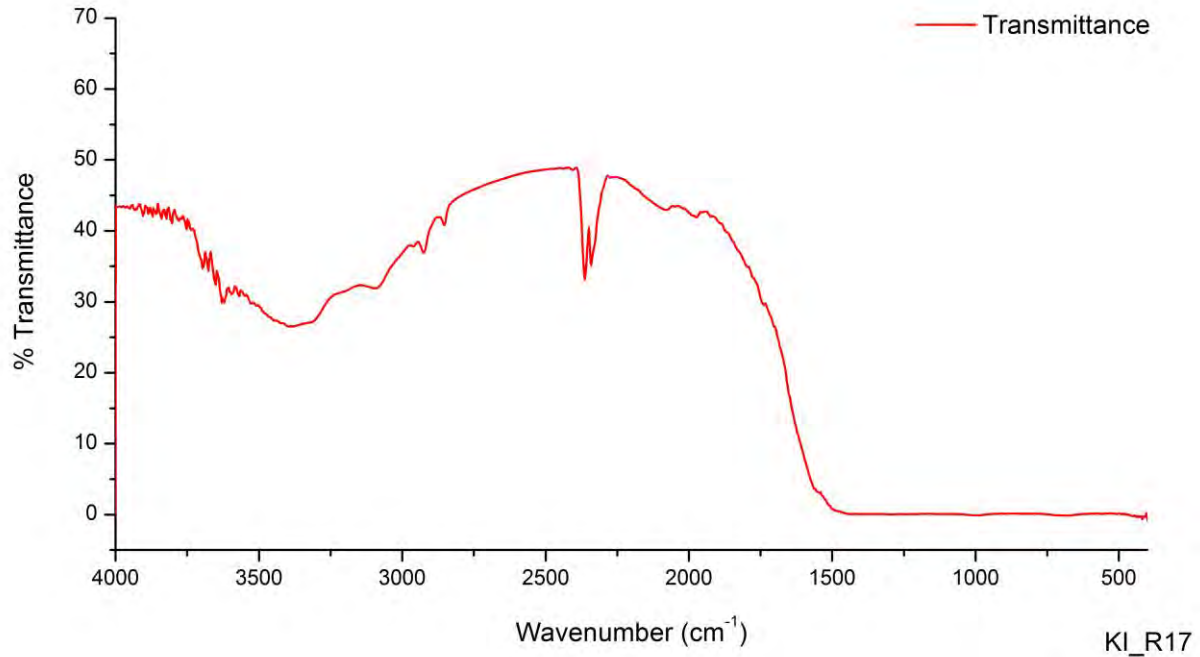
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



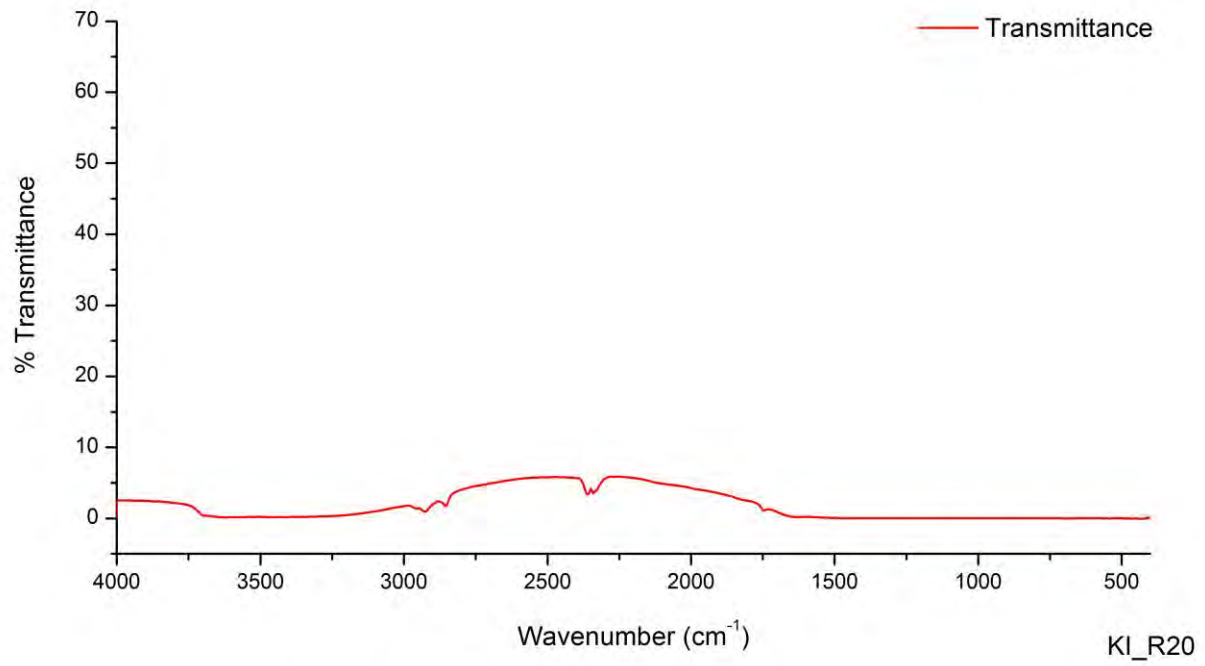
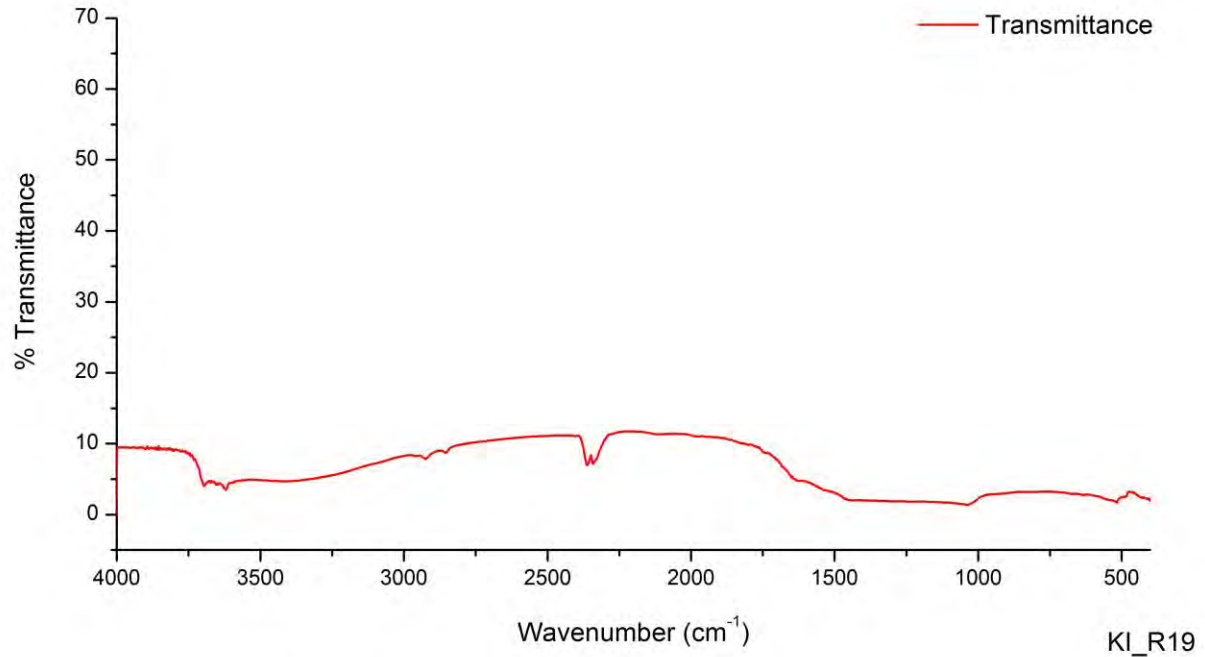
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



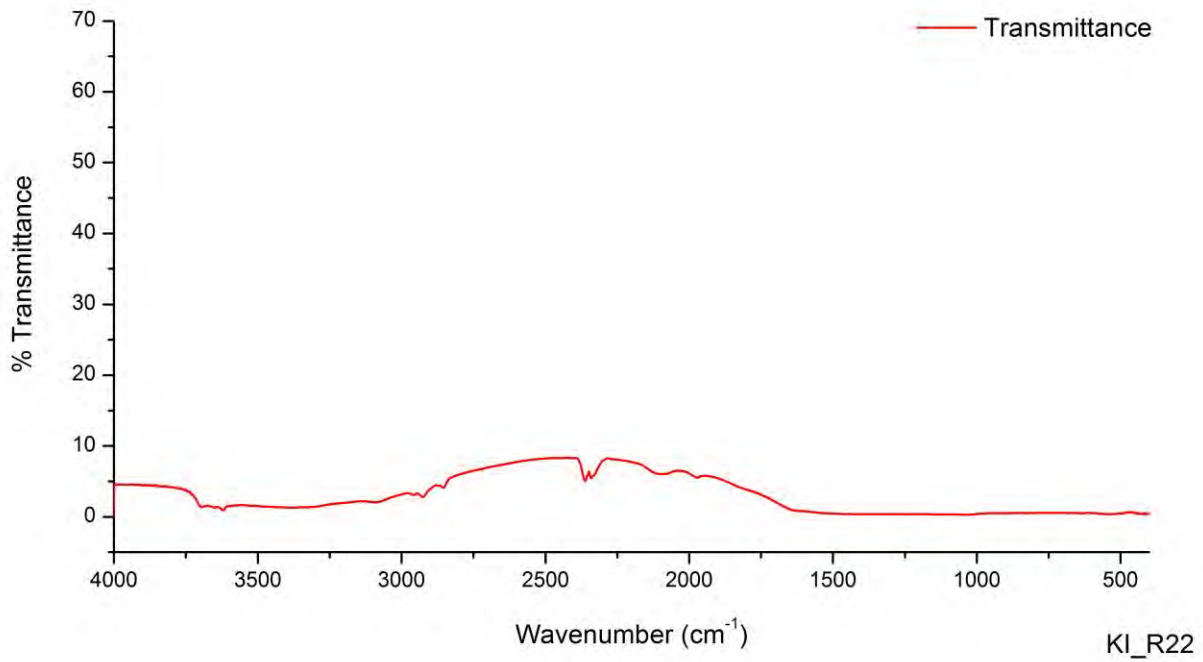
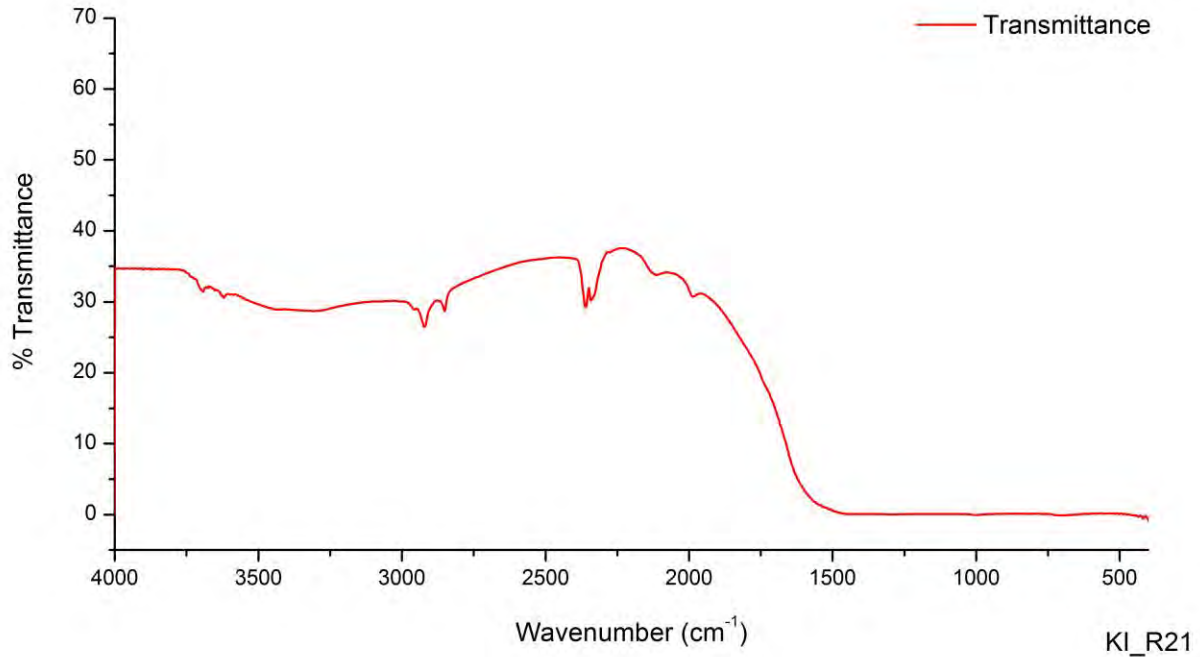
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



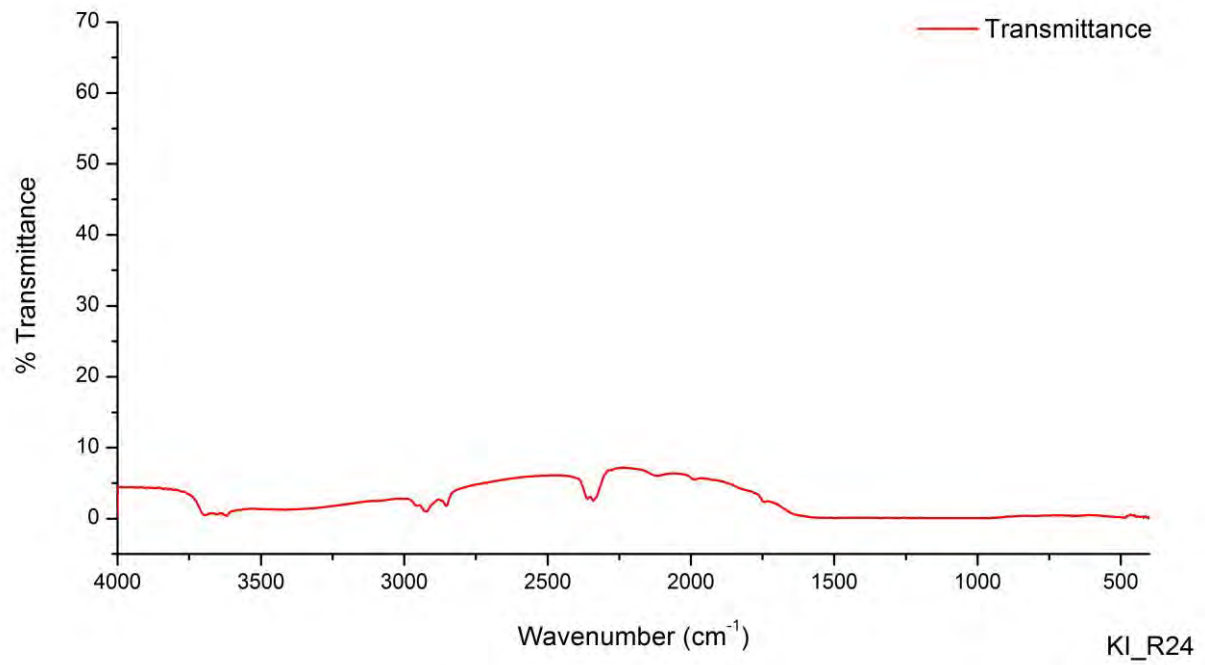
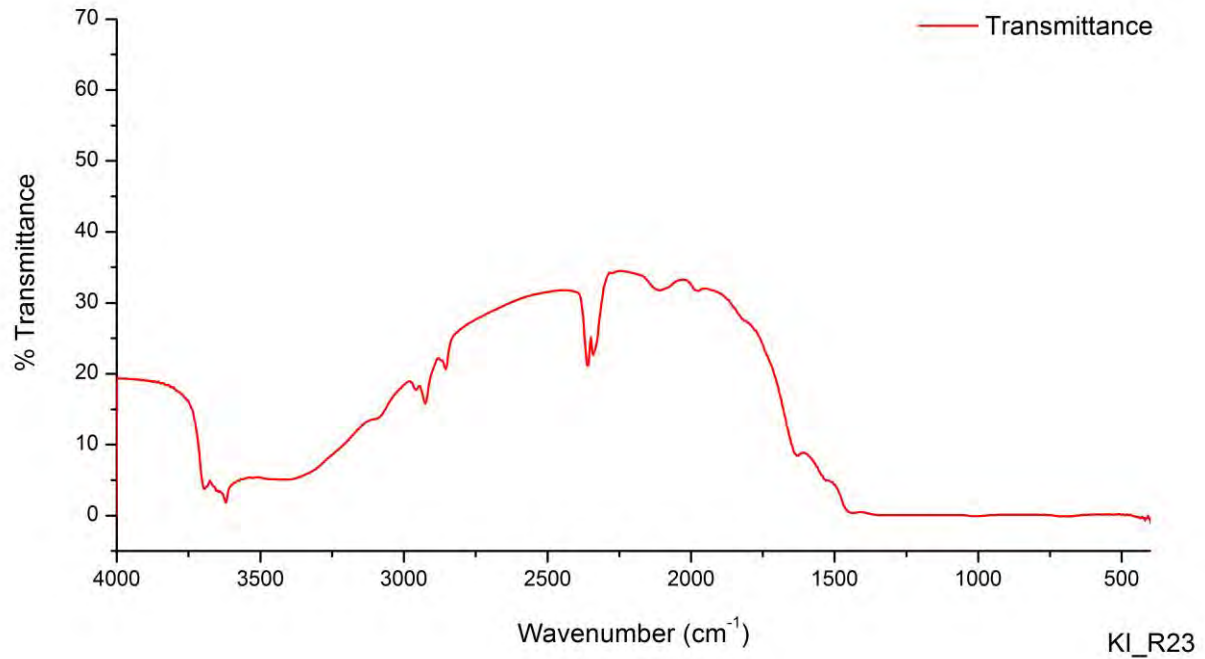
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



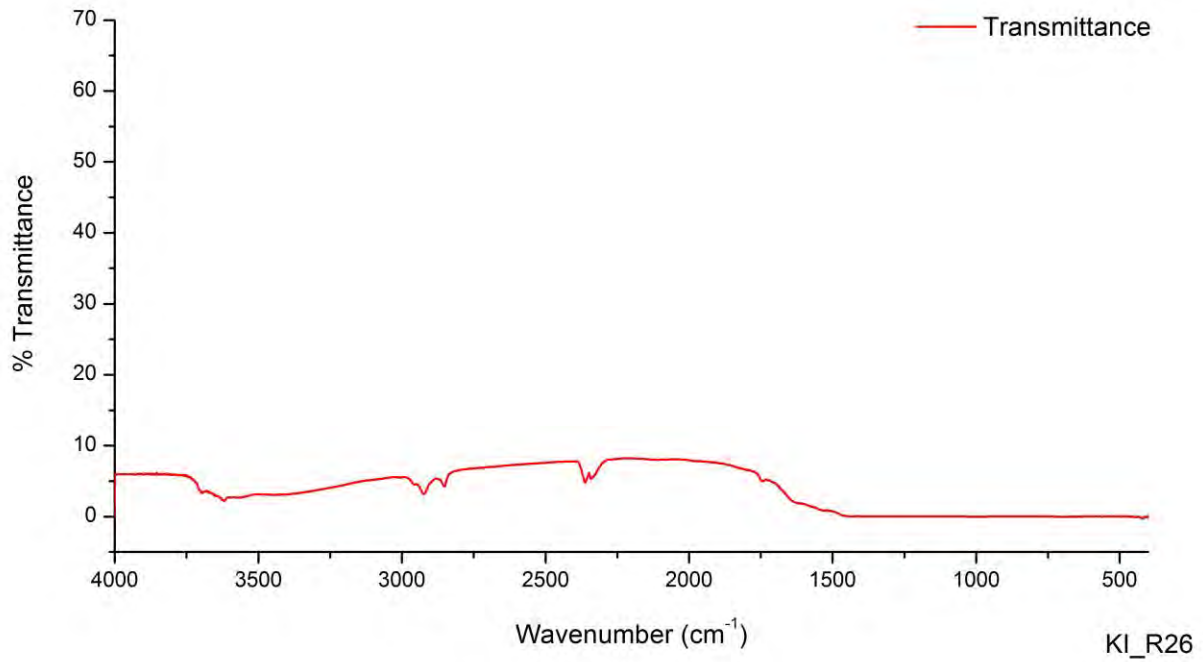
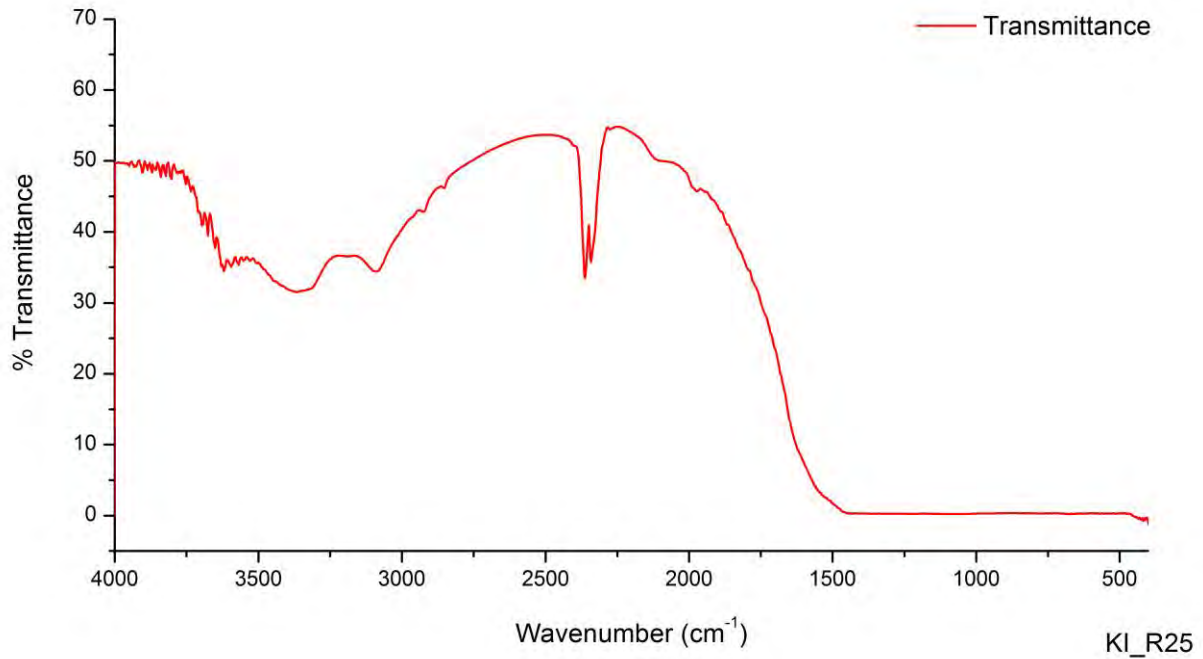
ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR)

จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย



ภาคผนวก จ

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EDXRF จากพลอยทับทิม จากแหล่งคีรีนดี ประเทศแทนซาเนีย

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EDXRF จากพลอยทับทิม จากแหล่งครินดี ประเทศแทนซาเนีย

Sample	Al ₂ O ₃ (wt%)	TiO ₂ (wt%)	V ₂ O ₅ (wt%)	Cr ₂ O ₃ (wt%)	Fe ₂ O ₃ (wt%)	Ga ₂ O ₃ (wt%)
KI_R1	99.4011	0.0249	0.016	0.2649	0.2836	0.0095
KI_R2	99.0548	0.0094	0.0104	0.5544	0.3624	0.0086
KI_R3	99.2014	0.0364	0.0145	0.4214	0.3162	0.0102
KI_R4	98.999	0.0487	0.041	0.4367	0.4631	0.0115
KI_R5	99.166	0.0235	0.0241	0.4399	0.3292	0.0173
KI_R6	99.3537	0.0264	0.0205	0.3027	0.2861	0.0107
KI_R7	99.3235	0.0296	0.0192	0.3541	0.2609	0.0126
KI_R8	99.0138	0.0273	0.0204	0.5836	0.3435	0.0114
KI_R9	99.0995	0.0273	0.0277	0.4744	0.3556	0.0154
KI_R10	98.8349	0.0213	0.0162	0.3085	0.8106	0.0083
KI_R11	99.208	0.0283	0.0188	0.4417	0.2914	0.0119
KI_R12	99.2198	0.0291	0.0288	0.4029	0.3093	0.01
KI_R13	99.1862	0.0523	0.0198	0.4145	0.3156	0.0115
KI_R14	99.3086	0.0263	0.0129	0.3196	0.3228	0.0098
KI_R15	98.4522	0.0286	0.0155	0.6794	0.7947	0.0296
KI_R16	99.408	0.0119	0.0107	0.3056	0.2517	0.0121
KI_R17	99.3007	0.0266	0.0192	0.2514	0.3894	0.0128
KI_R18	99.2869	0.0299	0.0245	0.3485	0.2981	0.0121
KI_R19	99.1992	0.0214	0.0109	0.4519	0.3047	0.012
KI_R20	99.0578	0.0315	0.0277	0.5051	0.3663	0.0116
KI_R21	99.0959	0.0233	0.005	0.2144	0.639	0.0224
KI_R22	99.2388	0.0444	0.0176	0.3607	0.3236	0.0148
KI_R23	99.3364	0.0441	0.0109	0.2859	0.3093	0.0134
KI_R24	99.2281	0.0318	0.0157	0.4351	0.2789	0.0103
KI_R25	98.9496	0.0413	0.0161	0.4659	0.5143	0.0127
KI_R26	99.1226	0.0292	0.0132	0.3451	0.4781	0.0117

ภาคผนวก ฉ

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EPMA จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินดี ประเทศแทนซาเนีย

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EPMA จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย ครั้งที่ 1

Sample	SiO ₂ (Mass%)	Al ₂ O ₃ (Mass%)	TiO ₂ (Mass%)	FeO (Mass%)	V ₂ O ₅ (Mass%)	MgO (Mass%)	CaO (Mass%)	MnO (Mass%)	Cr ₂ O ₃ (Mass%)	K ₂ O (Mass%)	Ga ₂ O ₃ (Mass%)	Total (Mass%)
KI_R1	0.006	98.217	0.018	0.23	0	0	0	0	0	0.016	0	98.487
KI_R2	0.011	98.644	0.004	0.282	0.009	0	0.024	0.003	0	0	0	98.977
KI_R3	0	98.687	0.036	0.213	0.007	0	0.003	0.028	0	0.014	0.018	99.006
KI_R4	0.025	99.612	0.127	0.163	0.017	0.009	0	0.025	0	0.015	0.005	99.998
KI_R5	0.087	98.685	0	0.184	0.02	0.014	0.014	0	0	0.01	0	99.014
KI_R6	0.028	98.901	0.026	0.212	0.013	0.001	0.005	0	0	0.002	0.003	99.191
KI_R7	0	99.143	0	0.361	0.013	0	0.007	0	0	0	0	99.524
KI_R8	0.059	98.54	0.005	0.207	0.024	0	0	0	0	0	0.01	98.845
KI_R9	0.006	99.477	0.008	0.192	0	0	0	0.012	0	0	0.088	99.783
KI_R10	0.014	98.111	0.045	0.585	0	0.017	0.014	0	0	0	0	98.786
KI_R11	0	98.382	0.004	0.248	0	0	0.015	0.022	0	0.006	0.011	98.688
KI_R12	0.003	98.579	0.016	0.21	0.015	0	0.006	0.022	0	0.013	0.059	98.923
KI_R13	0	98.06	0.036	0.237	0.006	0	0.009	0.006	0	0.01	0	98.364
KI_R14	0	98.622	0.015	0.229	0	0.001	0.027	0	0	0	0	98.894
KI_R15	0.034	98.2	0.029	0.439	0	0.02	0	0	0	0.01	0.025	98.757
KI_R16	0.014	99.918	0.026	0.189	0	0.001	0.004	0.041	0	0	0.05	100.24
KI_R17	0.003	99.029	0.042	0.181	0.007	0.016	0	0.006	0	0	0	99.284
KI_R18	0.078	99.159	0.005	0.222	0.012	0	0.014	0.034	0	0	0.047	99.571
KI_R19	0	98.824	0	0.189	0.02	0	0.012	0	0	0	0.095	99.14
KI_R20	0.003	98.838	0.007	0.212	0.007	0.003	0	0	0	0.009	0.028	99.107
KI_R21	0.059	98.452	0.01	0.401	0	0	0.003	0.025	0	0.021	0	98.971
KI_R22	0.014	98.876	0.02	0.228	0.014	0.007	0.011	0	0	0.009	0.023	99.202
KI_R23	0.059	99.469	0.007	0.233	0.018	0	0.004	0.006	0	0.004	0.084	99.884
KI_R24	0.033	99.224	0.007	0.203	0	0	0.003	0	0	0.007	0.02	99.497
KI_R25	0.064	98.176	0.004	0.38	0	0	0	0	0	0.005	0.07	98.699
KI_R26	0.056	98.869	0.037	0.415	0.005	0	0	0.028	0	0.005	0.094	99.509

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดย EPMA จากพลอยทับทิม จากแหล่งศิรินที ประเทศแทนซาเนีย ครั้งที่ 2

Sample	Al ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	SiO ₂	Ga ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	V ₂ O ₅	MgO	K ₂ O	Total
	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)	(Mass%)
KI_R1	98.78	0.265	0.169	0	0.009	0	0.003	0.003	0	0	0	99.229
KI_R2	99.073	0.301	0.393	0.006	0	0.03	0	0	0.01	0	0.007	99.82
KI_R3	97.374	0.173	0.439	0.014	0.007	0	0.013	0.014	0.016	0	0	98.05
KI_R4	99.001	0.21	0.291	0	0.014	0	0	0.001	0	0	0.003	99.52
KI_R5	98.644	0.173	0.21	0.051	0.002	0.063	0.006	0.013	0	0	0.004	99.166
KI_R6	99.367	0.237	0.206	0.025	0	0	0.025	0.018	0.002	0	0	99.88
KI_R7	98.754	0.261	0.19	0.022	0.013	0	0.003	0.001	0.025	0	0	99.269
KI_R8	98.067	0.268	0.429	0.083	0	0	0	0.003	0.013	0.017	0.005	98.885
KI_R9	98.672	0.154	0.432	0.069	0.05	0	0.006	0	0	0	0	99.383
KI_R10	98.812	0.726	0.095	0.05	0	0.036	0	0	0.001	0.005	0	99.725
KI_R11	98.824	0.188	0.385	0.006	0	0	0	0	0.018	0.006	0.001	99.428
KI_R12	98.232	0.183	0.273	0.017	0.01	0.076	0.009	0.012	0	0.005	0.005	98.822
KI_R13	98.413	0.188	0.319	0.025	0.004	0	0	0.005	0.009	0.015	0.01	98.988
KI_R14	98.513	0.245	0.215	0.025	0.022	0	0.038	0.016	0.006	0	0.008	99.088
KI_R15	98.53	0.434	0.257	0.017	0	0.005	0.022	0.006	0	0	0.005	99.276
KI_R16	99.551	0.19	0.236	0	0.069	0	0	0.004	0.003	0.01	0.002	100.07
KI_R17	98.352	0.329	0.199	0.041	0.048	0	0.003	0	0.009	0.015	0.008	99.004
KI_R18	98.983	0.188	0.294	0.036	0	0.002	0.006	0.01	0	0.006	0	99.525
KI_R19	98.001	0.5	0.124	0.066	0.02	0.059	0	0.013	0.02	0	0	98.803
KI_R20	98.791	0.239	0.314	0.044	0.013	0.048	0.016	0.023	0.02	0	0.001	99.509
KI_R21	99.622	0.244	0.347	0.003	0.059	0.068	0	0	0	0	0	100.34
KI_R22	97.721	0.25	0.269	0.033	0.007	0.023	0.019	0	0.013	0	0	98.335
KI_R23	98.219	0.224	0.149	0.033	0.022	0	0	0.023	0	0.013	0.009	98.692
KI_R24	98.525	0.153	0.233	0.061	0.011	0	0	0.009	0	0	0.007	98.999
KI_R25	98.045	0.371	0.274	0.064	0.043	0.016	0	0	0.008	0.017	0.02	98.858
KI_R26	99.114	0.404	0.32	0.03	0.035	0.001	0.028	0.015	0	0.006	0.007	99.96