

ลักษณะเฉพาะของแฮปไฟร์จากประเทศวันดา ทวีปแอฟริกา

นางสาวนิตา สุขชี

ธรณีวิทยา

2557

ลักษณะเฉพาะของเซปไฟร์จากประเทศวันดา ทวีปแอฟริกา

นางสาวนิสา สุขชี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557

CHARACTERISTICS OF SAPPHIRES FROM RWANDA, AFRICA

Miss Nisa Sukkee

A report submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of the Bachelor of Science in Geology
Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
Academic Year 2014

วันที่ส่ง

____/____/____

วันที่อนุมัติ

____/____/____

ลงชื่อ _____

(รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

หัวข้องานวิจัย: ลักษณะเฉพาะของແປປໄຟຣ໌ຈາກປະເທສຣວນດາ ທີ່ປແຟຣິກາ
ນິຕິຕຸູ່ທຳກາວິຈັຍ: ນາງສາວນິສາ ສຸຂາື
ກາວິຈາ: ວຣຸຣນິວິທຍາ
ອາຈາວຣ໌ທີ່ປຣິກສາ: ວຣ.ດຣ.ຈັກຣພັນ ສຸທຣິຣັຕນ໌
ປີກາຣສືກສາ: 2557

ບທຄັຍ່ອ

ໂຄຣກາວິຈັຍຄຣັ່ງນີ້ໄດ້ນຳຕົວຢ່າງແປປໄຟຣ໌ແລ່ງຈາງກູກູ ປຣເທສຣວນດາ ມາສືກສາເພື່ອເກັບຂໍ້ມູລພື້ນຖານທາງອັດູມຣ໌ແລະເອກລັກສະນ໌ຂອງແລ່ງ ດ້ຍກາຣໃຊ້ເຄື່ອຣມື່ອວິເຄຣາະຮັ່ງພື້ນຖານແລະຮັ່ງສູງຂອງສຳບັນວິຈັຍແລະພັດຣນາອັດູມຣ໌ແລະເຄື່ອຣປຣະຕັບແຫ່ງຊາຕີ (ອຣກັກຣມາຊນ) ຄື່ອເປັນກາຣພັດຣນາຖານຂໍ້ມູລເພື່ອໃຊ້ໃນກາຣຕຣວຈສອບຟລອຍທີ່ມັທຣາບແລ່ງກຳເນີດແນ່ຊັຕ ແລະໃຊ້ເປັນແນວທາງໃນກາຣປຣັບປຣຸງຄຸນກາຣຟລອຍໃນອນາຄຕ ຟລອຍແປປໄຟຣ໌ແລ່ງຈາງກູກູ ປຣເທສຣວນດາ ມີຕັດນກຳເນີດມາຈາກືນແອລຄາໄລນ໌ບະຊອລຕ໌ ມາຍຸຄຊີໂນໂຊືກ ດ້ຍແລ່ງຈາງກູກູ ດູກຄວບຄຸມດ້ຍຣະບຣ່ອຣແຍກແອຟຣິກັນຕະວັນອອກ (East African Rift) ແລະຕັ້ງຢູ່ເຄັດັບຣືວຣຸມທີ່ມີກາຣປຣະທຸຂອງືນກູເຂາໄປບະຊອລຕ໌

ຕົວຢ່າງແປປໄຟຣ໌ທີ່ໃຊ້ໃນກາຣສືກສາຄຣັ່ງນີ້ມີທັ່ງສິ່ງ 31 ຕົວຢ່າງ ແບ່ງອອກເປັນ 2 ກຸ່ມໃຫຍ່ໆ ຕາມລັກສະນະສີ ແລະຄຸນກາຣອັດູມຣ໌ ໄດ້ແກ່ ກຸ່ມຄຸນກາຣພືດີ ແບ່ງອອກເປັນ 2 ກຸ່ມຍ່ອຍ ໄດ້ແກ່ ກຸ່ມສີນ້ຳເຈີນເຂັ້ມ 11 ຈຳນວນຕົວຢ່າງ ແລະກຸ່ມສີນ້ຳເຈີນອ່ອນ 7 ຕົວຢ່າງ ແລະກຸ່ມຄຸນກາຣຕ້ຳ ແບ່ງອອກເປັນ 2 ກຸ່ມຍ່ອຍ ໄດ້ແກ່ ກຸ່ມສີນ້ຳເຈີນເຂັ້ມທັບແສງ ຈຳນວນ 7 ຕົວຢ່າງ ແລະກຸ່ມສີນ້ຳເຈີນອມເຂີວ 6 ຕົວຢ່າງ ດ້ຍຕົວຢ່າງທັ່ງຸ່ມຕໍ່ມັດແສງກາຣເື່ອຣແສງກາຣໄດ້ແສງເນື່ອມ່ວງທັ່ງຊ່ວງຄື່ນຍາວແລະຊ່ວງຄື່ນສັ່ນ ຟບມລທືນຟລັກແຮ່ ໄດ້ແກ່ ຟລສປາຣ໌ ເນຟີລີນ ສປີເນລ ເຊອຣ໌ຄອນ ແລະເຟອຣ໌ໂຣໂຄລັມໂບຕ໌ ຊື່ງຟບໄດ້ໃນແລ່ງກຳເນີດືນບະຊອລຕ໌ທັ່ງໄປ ຈາກຟລວິເຄຣາະຮັກກາຣດູດຄື່ນຄື່ນແສງໃນຊ່ວງອືນຟາເຣຕ ຟບວ່າຣູບແບບກາຣດູດຄື່ນຂອງຕົວຢ່າງແປປໄຟຣ໌ທີ່ຟບ ສາມາດບັ່ງຊື່ໄດ້ວ່າແປປໄຟຣ໌ຈາກແລ່ງນີ້ມີຕັດນກຳເນີດມາຈາກືນບະຊອລຕ໌ ຈາກຟລວິເຄຣາະຮັກກາຣດູດຄື່ນຄື່ນແສງຊ່ວງແສງອັດຕຣາໄວໂອລຕ໌ດ້ຍອືນຟຣາເຣຕຣະຍະໄກລັ ຟບວ່າມີກາຣດູດຄື່ນຂອງ Fe^{2+}/Ti^{4+} ແລະ Fe^{3+} ຊື່ງສັ່ມພັນຮັກກັບກາຣເກີດສີນ້ຳເຈີນຂອງແປປໄຟຣ໌ ຈາກຟລກາຣວິເຄຣາະຮັກກັບຣາຕູຣ່ອຣຣອຍຟບວ່າມີປຣິມາຣເລັກສູງ ເມື່ອເປຣືຍບເທືຍບກັບຣາຕູຣ່ອຣຣອຍຕົວອື່ນໆ ໃນຊ່ວງ 0.14-0.53 ເປອຣ໌ເຊນຕ໌ດ້ຍນ້ຳເນັກ ດ້ຍແປປໄຟຣ໌ແລ່ງຈາງກູກູ ປຣເທສຣວນດາມີຣາຕູຣ່ອຣ໌ປຣະກອບ ໄດ້ແກ່ ຣາຕູເລັກ ໂຄຣເມືຍມແລະໄທເທເນືຍມຕ້ຳກວ່າແລ່ງກຳເນີດືນບະຊອລຕ໌ອື່ນໆ ຊື່ງຄື່ອເປັນລັກສະນະເຂາະຂອງແລ່ງນີ້

ຄຳສຳຄັຍູ: ຣະບຣ່ອຣແຍກຂອງແອຟຣິກັນຕະວັນອອກ, ແລ່ງກຳເນີດືນບະຊອລຕ໌, ມລທືນຟລັກແຮ່, ກາຣດູດຄື່ນຄື່ນແສງ, ຣາຕູຣ່ອຣຣອຍ

Project title: CHARACTERISTICS OF SAPPHIRES FROM RWANDA, AFRICA
Researcher: Nisa Sukkee
Department: Geology
Advisor: Associate Professor Dr.Chakkaphan Sutthirat
Academic Year: 2014

Abstract

Sapphire samples from Cyangugu district, SW Rwanda, were collected for basic analyses and characterization. The study was carried out using basic and advanced gem-testing instruments at The Gem and Jewelry Institute of Thailand. The main aim of this study is to develop database for further investigation of sapphires' origin and their treatments. Sapphires in Cyangugu district in SW Rwanda are related to Cenozoic alkali basalt which is associated with East African Rift volcanism.

The sapphire samples are divided into two main groups according to the colors and gem qualities. The first group, high quality samples are divided into two subgroups including eleven dark blue samples and seven light blue samples. The second group, low quality samples, are also divided into two subgroups including seven opaque dark blue samples and six greenish blue samples. Their luminescences are inert under both long wave and short wave UV lamps. Mineral inclusions are similar to those found in other from basaltic sapphires. They are characterized by feldspar, nepheline, spinel, zircon, and ferrocolumbite. According to infrared spectra, all samples show absorption patterns that indicated basaltic sapphire origin. Moreover, UV-Vis-NIR absorption spectra show absorptions of $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ and Fe^{3+} which cause blue color of sapphire. Trace element analyses contain relatively high iron with low contents of other trace elements (0.14-0.53 percent by weight). However, Cyangugu sapphires still have lower iron content, compared to basaltic sapphires from elsewhere.

KEY WORDS: East African Rift system, Basaltic origin, Mineral inclusions, Absorption,
Trace elements

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย) ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตั้งแต่เริ่มโครงการวิจัย วางแผนการทำงานที่เป็นขั้นเป็นตอน ช่วยตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือต่างๆ รวมถึงติดตามการทำงานและให้กำลังใจ ตลอดการดำเนินโครงการวิจัย ทำให้โครงการวิจัยสำเร็จไปตามเวลาที่คาดหวังไว้ อีกทั้งยังช่วยแก้ไขปัญหา และข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดการทำงานจนโครงการวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.อภิสิทธิ์ ซาล้า ที่คอยชี้แนะทางการทำงาน ตรวจสอบความถูกต้องของงานและให้คำแนะนำเพื่อปรับปรุงแก้ไขให้งานดีขึ้น เปรียบเสมือนเป็นอาจารย์คนที่สองที่คอยช่วยเหลือ ดูแลในเวลาที่ยังเป็นนักศึกษาไม่สะดวก

ขอขอบคุณนางสาวนาตยา นิลฮัด นายธนพงษ์ เหลืออัมพรและนายทัศนรา ศรีบุญจัน พี่ๆ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่คอยสอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ให้ความรู้และคำแนะนำ รวมถึงตรวจสอบความถูกต้องของผลวิเคราะห์ ตลอดการดำเนินโครงการวิจัย นอกจากนี้ต้องขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (GIT) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ต่างๆ จนทำให้งานสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณะอาจารย์และบุคลากร ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมไปถึงบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำโครงการวิจัยเล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
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	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	11
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ	13
บทที่ 4 ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผล	
4.1 ลักษณะทั่วไป	17
4.2 มลทินเนื้อใน	23
4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด	36
4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	39
4.5 องค์ประกอบทางเคมี	42
4.6 อภิปรายและสรุปผล	49
เอกสารอ้างอิง	51
ภาคผนวก ก	52
ภาคผนวก ข	54
ภาคผนวก ค	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง	91
ภาคผนวก จ	93
ภาคผนวก ฉ	98

สารบัญญรูปภาพ

		หน้า
รูป 1.1	แผนที่ธรณีวิทยา ประเทศวันดา ในทวีปแอฟริกาตะวันออก	3
รูป 2.1	แสดงความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแฮปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ และแฮปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินแปรของแหล่งบาริงตันและแหล่งอื่นๆ ในประเทศออสเตรเลียและแหล่งไพลิน ประเทศกัมพูชา (Sutherland et al., 1998)	5
รูป 2.2	ช่วงที่ 1 เริ่มมีการหลอมบางส่วน และให้กำเนิดพลอยรูปแบบที่ 1 (Khamloet, 2011)	7
รูป 2.3	ช่วงที่ 2 เกิดบริเวณที่มีการแปรสัณผัส และให้กำเนิดพลอยรูปแบบที่ 2 (Khamloet, 2011)	7
รูป 2.4	ช่วงที่ 3 บะซอลต์พาแฮปไฟร์และเศษหินต่างๆ จากที่ลึกขึ้นสู่พื้นผิวโลก (Khamloet, 2011)	8
รูป 2.5	East African Rift system (Wilson, 1991)	9
รูป 3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา	12
รูป 3.2	Hydrostatic balance จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	13
รูป 3.3	Refractometer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	13
รูป 3.4	Gemological microscope จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูป 3.5	เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูป 3.6	เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูป 3.7	เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Ranishaw จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	14
รูป 3.8	เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III จากสถาบันวิจัยและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	15

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูป 3.9	เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100 ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	15
รูป 3.10	เครื่อง Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) (LA รุ่น UP-213 และ ICP-MS รุ่น 7500cs) ที่สถาบันวิจัยและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)	16
รูป 4.1	ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)	18
รูป 4.2	ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)	19
รูป 4.3	ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue)	20
รูป 4.4	ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)	21
รูป 4.5	มลทินรอยนิ้วมือแบบต่างๆ ในตัวอย่างแช่ไฟร์จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา	24
รูป 4.6	มลทินแถบสีเส้นตรงและแถบสีหักมุม ในตัวอย่างแช่ไฟร์จากแหล่ง จางกุฎ ประเทศรวันดา	25
รูป 4.7	มลทินระนาบผลึกแผด ในตัวอย่างแช่ไฟร์จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา	26
รูป 4.8	มลทินผลึกแร่ชนิดต่างๆ ในตัวอย่างแช่ไฟร์จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา	27
รูป 4.9	มลทินผลึกแร่ชนิดต่างๆ ในตัวอย่างแช่ไฟร์จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา	28
รูป 4.10	Raman Spectrum ผลึกแร่เฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) ของ ตัวอย่าง Rwanda_B5 กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)	29
รูป 4.11	Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) ถูกล้อมรอบด้วยมลทิน รอยแตกรูปจาง (feldspar with tension crack) ของตัวอย่าง Rwanda_B1 กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)	29
รูป 4.12	Raman Spectrum ผลึกแร่สปิเนล (spinel) ของตัวอย่าง Rwanda_B19 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)	29
รูป 4.13	Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) ของตัวอย่าง Rwanda_B29 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)	30

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูป 4.14	Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) ของตัวอย่าง Rwanda_B1 กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)	30
รูป 4.15	Raman Spectrum ผลึกแร่เฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) ของตัวอย่าง Rwanda_B1 กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)	30
รูป 4.16	ตัวอย่างผลวิเคราะห์หมลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง EPMA บริเวณผิวของแซปไฟร์จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา	33
รูป 4.17	หมลทินกลุ่มหมอกในตัวอย่างแซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา	34
รูป 4.18	หมลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็กในตัวอย่างแซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา	34
รูป 4.19	หมลทินแถบสีตามแนวของผลึกแผ่นในตัวอย่างแซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา	35
รูป 4.20	ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B2) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H ₂ O, CO ₂ , CH-Stretching และ OH groups	37
รูป 4.21	ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B25) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H ₂ O, CO ₂ , CH-Stretching และ OH groups	37
รูป 4.22	ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสง) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B13) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H ₂ O, CO ₂ , CH-Stretching และ OH groups	38
รูป 4.23	ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B11) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H ₂ O, CO ₂ , CH-Stretching และ OH groups	38
รูป 4.24	ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B1) แสดงการดูดกลืนของ Fe ³⁺ , Fe ³⁺ /Fe ³⁺ และ Fe ²⁺ /Ti ⁴⁺	40

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูป 4.24	ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B22) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{3+} และ Fe^{2+}/Ti^{4+}	40
รูป 4.25	ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสง) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B6) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{3+} และ Fe^{2+}/Ti^{4+}	41
รูป 4.26	ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B4) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , Fe^{3+}/Fe^{3+} และ Fe^{2+}/Ti^{4+}	41
รูป 4.27	ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ และแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินแปร (ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF)	
รูป 4.28	ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ (ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF)	43
รูป 4.29	สัดส่วนขององค์ประกอบธาตุรองรอย แสดงการกระจายตัวของเหล็กไทเทเนียมและแมกนีเซียม	44
รูป 4.30	สัดส่วนขององค์ประกอบธาตุรองรอย แสดงการกระจายตัวของเหล็กไทเทเนียม และแมกนีเซียม	48

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตาราง 4.1	สมบัติทางกายภาพและสมบัติอัญมณีของตัวอย่างแซปไฟร์จาก แหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย	22
ตาราง 4.2	ชนิดของมลทินรูปแบบต่างๆ และความถี่ที่พบในตัวอย่างแซปไฟร์จาก แหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย	23
ตาราง 4.3	ผลการวิเคราะห์มลทินผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar inclusions) ที่พบใน ตัวอย่างแซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) และ กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) ของแหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย ด้วยเครื่อง EPMA	31
ตาราง 4.4	ผลการวิเคราะห์มลทินผลึกแร่เนเฟลิซีน (nepheline inclusions) ที่พบใน ตัวอย่างแซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) และ กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) ของแหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย ด้วยเครื่อง EPMA	32
ตาราง 4.5	สรุปผลวิเคราะห์ทางเคมีของแซปไฟร์จากแหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย ด้วยเครื่อง EDXRF	42
ตาราง 4.6	แสดงผลวิเคราะห์ทางเคมีของแหล่งจางกุก ประเทศอินเดียด้วยเครื่อง EPMA	45
ตาราง 4.7	ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์จากแหล่งจางกุก ประเทศอินเดีย	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

ในอดีต ประเทศไทยเคยเป็นแหล่งวัตถุดิบพลอยคอรัันดัมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ได้แก่ ทับทิม(ruby) ซึ่งมีสีแดง-ชมพู และแซปไฟร์หลากสี เช่น ไพลิน (blue sapphire) บุษราคัม (yellow sapphire) และเขียวส่อง (green sapphire) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทับทิมและไพลินที่ได้รับความนิยมอย่างมาก แม้ว่าปัจจุบันแหล่งวัตถุดิบในประเทศไทยจะลดจำนวนลงไปเป็นจำนวนมาก ประเทศไทยยังคงเป็นผู้นำในอุตสาหกรรมการผลิตอัญมณีและการค้าพลอยที่สำคัญที่สุดแห่งหนึ่งของโลก โดยการนำเข้าวัตถุดิบพลอยชนิดต่างๆ จากแหล่งอื่น เช่น พม่า เวียดนาม กัมพูชา จีน ศรีลังกา และอีกหลายประเทศในทวีปแอฟริกาตะวันออก เช่น มาดากัสการ์ แทนซาเนีย เคนยา และไนจีเรีย (รัก หรรษาเวกและกฤตยา ปัทมาลัย, 2548) เพื่อการปรับปรุงคุณภาพและผลิต

คอรัันดัมเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางธรณีวิทยา ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดหินอัคนี (igneous rock) หรือหินแปร (metamorphic rock) ทั้งนี้อาจพบพลอยคอรัันดัมในลักษณะเป็นผลึกฝังปะอยู่ในเนื้อหินแหล่งกำเนิด หรือเกิดเป็นแร่องค์ประกอบของหินต้นกำเนิด (สุพร อินทโสภา, 2544; Levinson and Cook, 1994) ทำให้พบแหล่งแร่พลอยคอรัันดัมสัมพันธ์กับหินชนิดแอลคาไลบะซอลต์ ซึ่งถูกพบในหลายๆ ประเทศทั่วโลก เช่น ออสเตรเลีย ไทย ไนจีเรีย จีนและรวันดา (Krzemnicki et al., 1996; Coenraads, 1992a; Guo et al., 1992)

ประเทศรวันดา จึงจัดเป็นแหล่งอัญมณีที่สำคัญมากอีกแห่งหนึ่ง ซึ่งอาจนำมาทดแทนแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของอุตสาหกรรมอัญมณีไทยได้ แต่ยังไม่เป็นที่รู้จักของผู้ประกอบการไทยมากนัก ดังนั้นประเทศรวันดาจึงเป็นอีกประเทศที่น่าสนใจที่จะพัฒนาเป็นแหล่งวัตถุดิบพลอยในอนาคต อีกทั้งยังมีโครงการศึกษาและรายงานทางวิชาการของพลอยจากประเทศรวันดาอยู่น้อยมาก ดังนั้น การศึกษาลักษณะเฉพาะทางอัญมณีของแซปไฟร์ (sapphire) จากประเทศรวันดา โดยเฉพาะการศึกษาองค์ประกอบธาตุร่องรอย (trace elements) ซึ่งส่งผลต่อการดูกลืนสีคล้ำแสงและการเรืองแสงภายใต้ช่วงแสงต่างๆ และการศึกษามลทินเนื้อใน (inclusion) ของแซปไฟร์ ถือเป็นข้อมูลที่สำคัญที่สามารถเก็บเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการตรวจสอบ

แหล่งกำเนิดอัญมณีอย่างต่อเนื่อง เป็นการสนับสนุนอุตสาหกรรมอัญมณีไทยให้ก้าวนำประเทศอื่นๆ

1.2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของแซปไฟร์ จากแหล่งจางกู (Cyangugu) ประเทศรวันดา (Rwanda) ทวีปแอฟริกา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ลักษณะทางแสง (optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition)

1.3. สมมุติฐาน

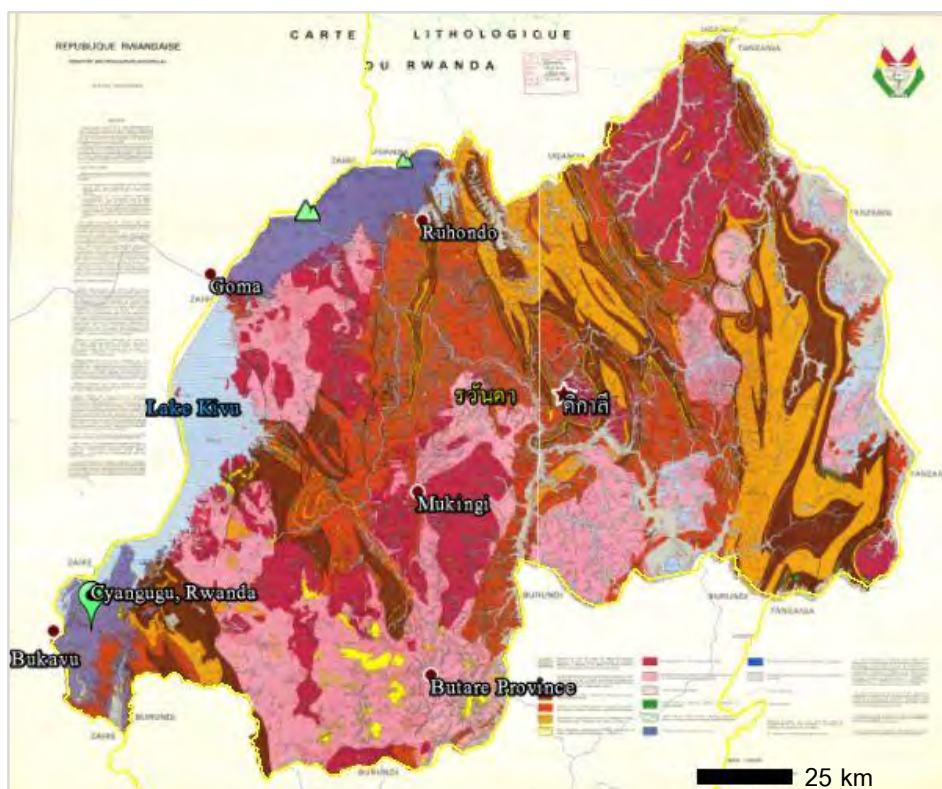
แซปไฟร์ จากแหล่งจางกู (Cyangugu) ประเทศรวันดา (Rwanda) ทวีปแอฟริกา มีลักษณะเฉพาะทางอัญมณีที่แตกต่างจากแหล่งอื่นๆ

1.4. ขอบเขตการศึกษา







ศึกษาลักษณะพลอยแซปไฟร์จากประเทศรวันดา ทวีปแอฟริกา จำนวน 31 ตัวอย่าง โดยศึกษาและวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพลอย ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ลักษณะทางแสง (optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) โดยใช้เครื่องมือทางอัญมณีขั้นพื้นฐานและเครื่องมือทางอัญมณีขั้นสูง


1.5. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาตั้งอยู่ที่แหล่งจางกู (Cyangugu) เขตรูซีซี (Ruzizi) ทางตะวันตกเฉียงใต้ ประเทศรวันดา ทวีปแอฟริกา ละติจูดที่ $2^{\circ}29'37.87''\text{S}$ เป็นพื้นที่ของหินแอลคาไลน์บะซอลต์ (alkali basalt) ยุคซีโนโซอิก (Cenozoic) มีการสะสมในชั้นกะละ (placer deposit) (Krzemnicki, 1996) ซึ่งสลายตัวมาจากหินบะซอลต์ในพื้นที่ (ดังรูปที่ 1.1)



Legend

	Quartzites et métaquartzites schisteux; ensembles à dominante quartzitique comportant des niveaux schisteux
	Schistes, micaschistes, phyllonites; intercalations quartzitiques peu importantes
	Schistes et micaschistes quartzeux, mylonites; ensembles à dominante schisteuse comportant des niveaux quartzitiques
	Roches volcaniques: laves, brèches, tufs.
	Roches granitiques, paragneiss et orthogneiss
	Roches granitiques, paragneiss et orthogneiss avec enclaves de roches sédimentaires non différenciées.

 แสดงตำแหน่งเหมืองจางกู พื้นที่ศึกษาครั้งนี้

รูป 1.1 แผนที่ธรณีวิทยา ประเทศรวันดา ในทวีปแอฟริกาตะวันออก

(จาก Ministry of the Natural Resources, Rwanda, 1993)

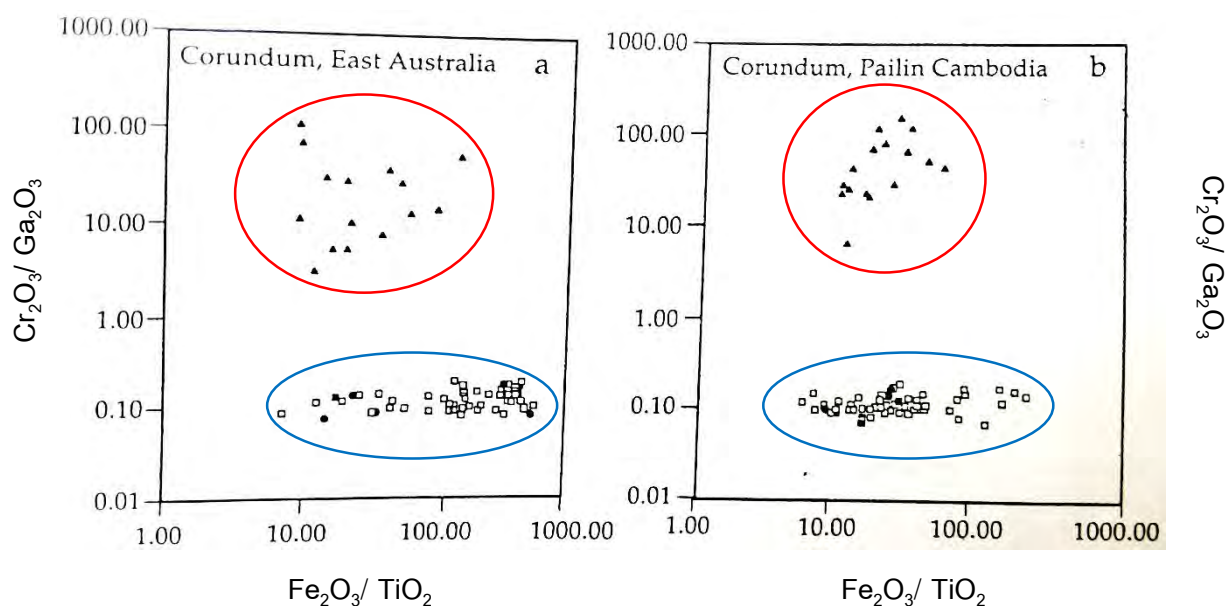
1.6. ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้วิธีการใช้เครื่องมือตรวจสอบวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการระดับนานาชาติ และฝึกทักษะการทำงานวิจัย
2. ลักษณะเฉพาะของแชปไฟร์จากประเทศวันดา ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ลักษณะทางแสง (optical properties) และองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition)
3. ข้อมูลการศึกษาโครงการวิจัยสามารถใช้เป็นฐานข้อมูล ในการตรวจสอบสมบัติของพลอยแชปไฟร์จากประเทศวันดา เปรียบเทียบกับแชปไฟร์จากหินบะซอลต์แหล่งอื่นๆ
4. เป็นการพัฒนาฐานข้อมูลแหล่งกำเนิดอัญมณี เพื่อสนับสนุนให้อุตสาหกรรมอัญมณีไทยมีความน่าเชื่อถือ ทันสมัยและสามารถนำไปพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านการปรับปรุงคุณภาพพลอย
5. เป็นส่วนในการสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่ผู้ประกอบการทั้งภายในและภายนอกประเทศ

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sutherland et al. (1998) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะทางเคมีและลักษณะธรณีวิทยา ของคอรันดัมที่มีแหล่งกำเนิดจากหินบะซอลต์ ในแหล่งบาริงตัน ประเทศออสเตรเลียและในแหล่งไพลิน ประเทศกัมพูชา คอรันดัมทั้งสองแหล่งมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน จากแหล่งกำเนิดที่ต่างกันอย่างชัดเจน คือ “magmatic” และ “metamorphic” โดยพลอยจากทั้งสองแหล่งกำเนิดสามารถแยกแยะความแตกต่างได้จากมลทินผลึกแร่ และธาตุที่มีปริมาณน้อยมากๆ หรือธาตุร่องรอย โดย metamorphic origin จะพบสปีเนลแมกนีเซียมสูง (Mg-rich) และแซปไฟริน (sapphirine) ในขณะที่ magmatic origin จะพบสปีเนลเหล็ก (Fe-rich) เซอร์คอนและไพโรคลอร์ (pyrochlore) นอกจากนี้ยังสามารถใช้อัตราส่วนของ Cr_2O_3 / Ga_2O_3 กับ Fe_2O_3 / TiO_2 ในการแยกแหล่งต้นกำเนิดของคอรันดัม (ดูรูป 2.1)



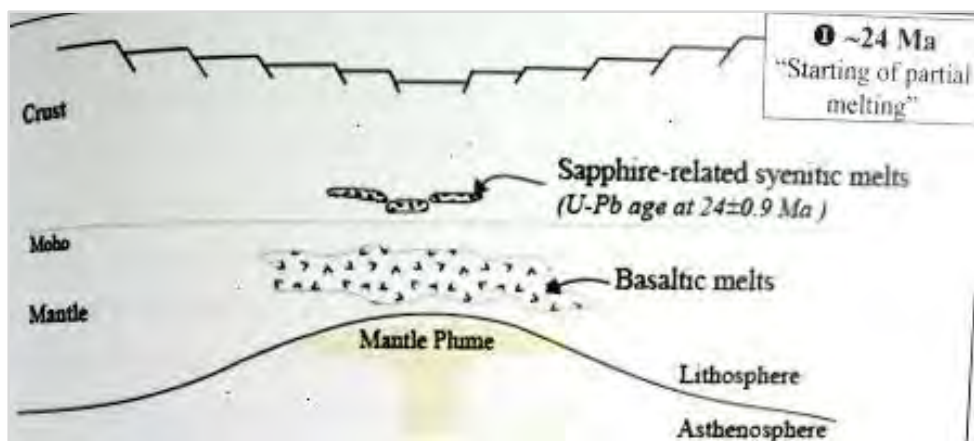
รูป 2.1 ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิด magmatic (วงกลมสีแดง) และแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินแปร metamorphic (วงกลมสีน้ำเงิน) ของแหล่งบาริงตันและแหล่งอื่นๆ ในประเทศออสเตรเลีย (รูปซ้ายมือ) และแหล่งไพลิน ประเทศกัมพูชา (รูปขวามือ) (จาก Sutherland et al., 1998)

Khamloet (2011) ได้ศึกษามลทินแร่ในแซปไฟร์ ของแหล่งบ่อพลอย ประเทศไทย พบมลทินแร่ ประกอบด้วย แอลคาไลน์เฟลสปาร์ (alkaline feldspar) เนฟลิ้น (nepheline) สปิเนลเหล็กสูง (Fe-rich spinel) เซอร์คอน (zircon) แมงกานีเฟอร์ริลไมเนน (manganiferous ilmenite) เอนสทาไทท์ซิลิกาสูง (Si-rich enstatite) การ์เนตชนิดแอลมันดีน-ไพโรป (almandine-pyrope garnet) ที่มีองค์ประกอบไปทางไพโรป โมนาไซต์ (monazite) แคลไซต์ (calcite) แซฟไฟร์ (sapphirine) ไบโอไทท์-ฟลโกไปต์ (biotite-phlogopite mica) และสตอโรไลต์ (straurolite) จากความหลากหลายของมลทินแร่สามารถจำแนกมลทินแร่ได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มเฟลสิกที่มีธาตุแอลคาไลน์สูงและกลุ่มที่ได้จากกระบวนการแปรสัณฐาน บ่งบอกถึงกำเนิดในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จากข้อมูลที่ได้ถือเป็นหลักฐานใหม่ที่ยืนยันว่าพลอยแซปไฟร์จากแหล่งบ่อพลอยน่าจะเกิดมาจาก 2 รูปแบบ คือรูปแบบหนึ่งมีความสัมพันธ์กับการตกผลึกในสภาพแวดล้อมที่สัมพันธ์กับแมกมาชนิดเฟลสิกมีแอลคาไลน์สูง ในบริเวณเปลือกโลกตอนล่าง (รูป 2.2) ซึ่งมีหลักฐานปรากฏจากการพบมลทินแร่กลุ่มเฟลสิกที่มีแอลคาไลน์และจากธรณีเคมีของธาตุร่องรอยและธาตุหายากในแร่เซอร์คอนที่เกิดร่วมกับแซปไฟร์ เกิดขึ้นก่อนรูปแบบที่สองซึ่งมีกำเนิดมาจากแมกมาผสมของหินเปลือกโลกที่ถูกแปรสัณฐานกับหินหลอมละลายบนเปลือกโลกที่เกิดจากการดันตัวของบะซอลต์ในบริเวณชั้นเนื้อโลกส่วนบน (upper mantle) หรือชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง (lower crust) (รูป 2.3) ซึ่งมีหลักฐานปรากฏจากการพบมลทินแร่ที่ได้จากกระบวนการแปรสัณฐาน นอกจากนี้ ชนิดมลทินแร่ที่พบในพลอยแซปไฟร์จากเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในพื้นที่อื่นๆ ส่วนใหญ่คล้ายกับที่พบในพลอยแซปไฟร์จากแหล่งบ่อพลอย จึงสรุปได้ว่าพลอยแซปไฟร์ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ กำเนิดมาจาก 2 รูปแบบ คือ พลอยแซปไฟร์ที่กำเนิดมาจากการตกผลึกจากหินไซยีนิต แอลคาไลด์สูง (alkali syenite) เป็นหลัก และที่กำเนิดมาจากแมกมาผสมจากกระบวนการแปรสัณฐานบางส่วน ก่อนที่หินหนืดบะซอลต์จะผ่านขึ้นมาและนำพลอยแซปไฟร์เหล่านี้ขึ้นมาปะทุบนผิวโลก (รูป 2.4)

โดย Khamloet (2011) ได้ใช้ข้อมูลจากการหาอายุเซอร์คอน (zircon dating) และอายุหินบะซอลต์ อธิบายช่วงการเกิดและพาพลอยแซปไฟร์มาสะสมบนผิวโลก ดังนี้

ช่วงที่ 1

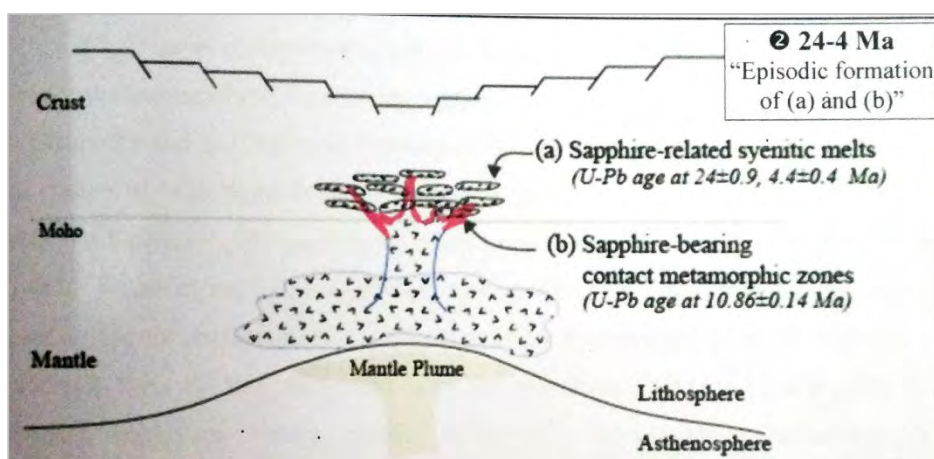
เกิด rifting ทำให้แผ่น lithosphere บางลง ความดันลดลง เกิดการหลอมบางส่วนของหินหนืด ในชั้นเนื้อโลกตอนบน (upper mantle) ได้แมกมาที่มีองค์ประกอบเป็นบะซอลติกแมกมา ในขณะเดียวกัน เกิดการ partial melting ของแมกมาบริเวณชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง (lower crust) ทำให้ได้หินหนืดองค์ประกอบเป็นเฟลสิกที่มีพลอยแซปไฟร์ตกผลึกอยู่ด้วย (ดังรูป 2.2)



รูป 2.2 ช่วงที่ 1 เริ่มมีการหลอมบางส่วน (partial melting) และให้กำเนิดพลอยรูปแบบที่ 1 (Khamloet, 2011)

ช่วงที่ 2

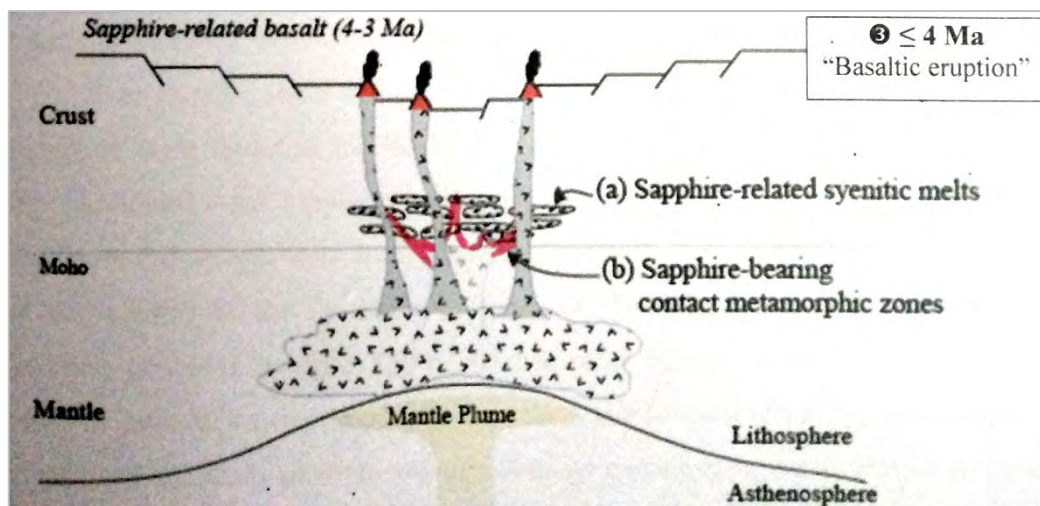
แมกมาผสมของหินเปลือกโลกที่ถูกแปรสัณฐานกับหินหลอมละลายปนเปื้อนเกิดจากการดันตัวของบะซอลต์ในบริเวณชั้นเนื้อโลกส่วนบนหรือชั้นเปลือกโลกส่วนล่าง ทำให้เกิดแบบที่ 2 เกิดการตกผลึกของแชปไฟร์ในบริเวณที่เกิดกระบวนการแปรสัณฐาน (contact metamorphic-related sapphire) (ดังรูป 2.3)



รูป 2.3 ช่วงที่ 2 เกิดบริเวณที่มีการแปรสัณฐาน และให้กำเนิดพลอยรูปแบบที่ 2 (Khamloet, 2011)

ช่วงที่ 3

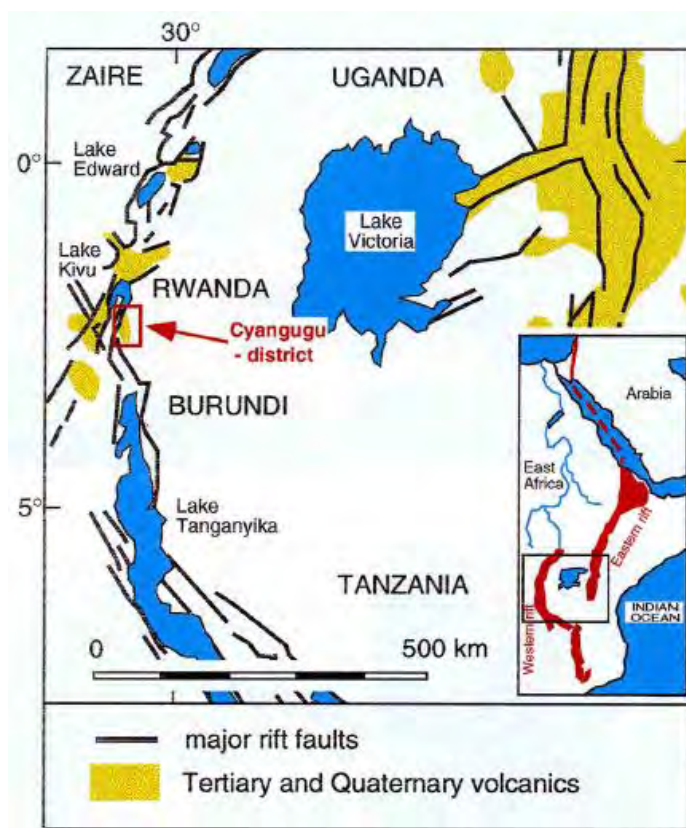
หินหนืดแอลคาไลน์บะซอลติกจากชั้นเนื้อโลก (mantle) พาเอาหินแปลกปลอม (xenoliths), ผลึกแปลกปลอม (xenocrysts) รวมถึงแชปไฟร์ที่ตกผลึกจากเฟลสิค แอลคาไลน์แมกมาและบริเวณที่เกิดกระบวนการแปรสัณฐานขึ้นมาบนพื้นผิวโลก (ดังรูป 2.4)



รูป 2.4 ช่วงที่ 3 บะซอลต์พาเซปไฟร์และเศษหินต่างๆ จากที่ลึกขึ้นสู่พื้นผิวโลก
(Khamloet, 2011)

Krzemnick et al. (1996) ได้ศึกษาการสะสมตัวของเซปไฟร์ ในแหล่งจางกูทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศวันดา ทวีปแอฟริกา ซึ่งมีหินต้นกำเนิดมาจากหินแอลคาไลน์บะซอลต์ เกิดการปะทุขึ้นตามแนวของ East African rift ในยุคเทอร์เชียรี Tertiary ก่อนการสลายตัวและสะสมตัวแบบลานแร่ (placer deposit) บริเวณผิวของเซปไฟร์มักพบรอยกัดกร่อนและรอยขีดข่วน ซึ่งเกิดจากทั้ง primary และ secondary corrosion โดย primary corrosion เกิดขึ้นระหว่างการพัดพาของเซปไฟร์จากชั้นเปลือกโลกขึ้นสู่พื้นผิวโลก ส่วน secondary corrosion เกิดขึ้นจากการผุพังและสึกกร่อนของหินบะซอลต์ซึ่งเป็นตัวพาเซปไฟร์ขึ้นมา จากนั้นจึงเกิดการสะสมตัวแบบลานแร่ (placer deposit)

Krzemnick et al. (1996) กล่าวว่า สภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่ทางตะวันตกของประเทศวันดา ถูกควบคุมโดย East African Rift (รูป 2.5) ซึ่งเป็นบริเวณการหลุดตัวของพื้นทวีป (continent) ยังคงคุกรุ่นอยู่เมื่อ 45 ล้านปีที่แล้ว ตั้งแต่ยุคเทอร์เชียรีตอนต้น (Early Tertiary) เริ่มมีการเกิดของระบบของ Afro-Arabian rift ซึ่งมีการขยายตัว 6500 กิโลเมตร จากประเทศตุรกีจนถึงประเทศโมซัมบิก ผลจากการขยายตัวตามแนว East African Rift ทำให้ทะเลแดงเปิดออกทางตอนเหนือ ในทางตรงกันข้าม ทางตอนใต้เกิดการหลุดตัว (rifting) มากกว่าการขยายตัว (extension) ชั้นหินฐาน (basement) ของพื้นที่บริเวณแหล่ง Cyangugu ประเทศวันดา ได้แก่ หินไนส์ (gneiss) และแอมฟีโบไลต์ (amphibolite)



รูป 2.5 East African Rift system (จาก Wilson, 1991)
และตำแหน่งของพื้นที่เหมืองจางกู

Lomthong (2004) ศึกษาพลอยคอร์นดัมของเกีย ประเทศแทนซาเนีย ที่อาจมีแหล่งกำเนิดมาจากกระบวนการแปรสภาพไปข้างหน้าและถอยกลับ ระหว่างการแปรสภาพแกรนูไลต์และแอมไฟโบลิต์ พลอยคอร์นดัมแหล่งนี้มีหลากหลายของสี พบมลทินแร่ อะพาไทต์ เอพิโดต เพจไอเคลส การ์เนต ฮีมาโทม ไมกา พาราโกไนต์ และรูไทล์ จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุรองรอยจะพบว่าปริมาณของธาตุหลักสูงในช่วง 1.01-4.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยพลอยคอร์นดัมของเกีย เป็นพลอยที่ไม่สามารถจำแนกจากพลอยที่เกิดจากการแปรสภาพหรือเกิดในหินบะซอลต์บริเวณอื่นได้อย่างชัดเจน

Vichit (2520) กล่าวถึงข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งพลอยหรือการกำเนิดของพลอยคอร์นดัม ในหินบะซอลต์เท่าที่ทราบมีน้อยมาก Mac Nevin (1971, 1972) กล่าวว่าพบพลอยในหินบะซอลต์ในรัฐควีนแลนด์ (Queensland) และรัฐนิวเซาท์เวลส์ (New South Wales) ในประเทศออสเตรเลีย และคิดว่าพลอยนี้มีการกำเนิดเป็นแบบผลึกแปลกปลอม (xenocyst) Mathias et al. (1970) พบคอร์นดัมในแปลกปลอมของหินอัลตราเมฟิก ชนิดหินคิมเบอรัไลต์ ที่ประเทศเลโซโท (Lesotho) และสาธารณรัฐซิมบับเว (Zimbabwe) ในแอฟริกาใต้ Wright (1971, 1972) และ Irving (1974) กล่าว

ไว้ว่าคอร์ันดัม สปิเนล กาเนต ไดออปไซด์ อิลเมไนท์ และเพทาย พบเกิดเป็นผลึกโตๆ (megacryst) ในหินแอลคาไลนบะซอลต์ (alkali basalt) หรือหินแอลคาไลนโอลิวีนบะซอลต์ (alkali olivine basalt) โดยการกำเนิดของพลอยในหินบะซอลต์จริงๆ นั้น ยังไม่เป็นที่ยืนยันแน่ชัด แต่มีแนวโน้มไปในแง่ที่ว่า พลอยน่าจะเกิดเป็นผลึกโตๆ (megacryst) ในหินบะซอลต์ เป็นแร่ที่เกิดภายใต้สภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิสูง หรือถือกำเนิดมาจากชั้นเปลือกโลกระดับลึก (deep crust) หรือชั้นเนื้อโลกส่วนบน (upper mantle)

สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (2014) ศึกษาความแตกต่างของทับทิมและไพลินที่มีแหล่งกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์ ได้แก่ ทับทิมจากแหล่งบ่อพลอยประเทศไทย แหล่งกัมพูชา แหล่งบาริงโกและซิมบา ประเทศเคนยา และไพลินจากแหล่งบ่อพลอยประเทศไทย แหล่งไพลิน ประเทศกัมพูชา แหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ และแหล่งมาบีลา ประเทศไนจีเรีย มลทินเนื้อในที่พบหลักๆ ซึ่งพบบ่อยในทุกแหล่ง ได้แก่ มลทินผลึกสีน้ำตาล มลทินฝุ่น ระบายผลึกแฝด การดูดกลืนสามารถใช้ AIOOH แยกทับทิมแหล่งบาริงโกและซิมบาออกจากแหล่งบ่อไร่และกัมพูชาได้ การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR ใหล่การดูดกลืนในทับทิมแหล่งกัมพูชาจะแตกต่างออกไปจากแหล่งอื่น โดยแสดงการดูดกลืนแบบต่ำเพียงอย่างเดียว ในขณะที่แหล่งอื่นแสดงการดูดกลืนแบบต่ำถึงสูง ขณะที่ไพลินแหล่งไพลินและดีเอโกจะแสดงการดูดกลืนแบบสูงเพียงอย่างเดียว การวิเคราะห์ผลเคมีด้วยเครื่อง EDXRF สามารถแบ่งทับทิมออกได้สองกลุ่ม คือ กลุ่มบาริงโกและซิมบา มีปริมาณไทเทเนียมต่ำและวาเนเดียมสูง ขณะที่แหล่งบ่อไร่และกัมพูชามีค่าไทเทเนียมสูงและวาเนเดียมต่ำ ในส่วนของไพลินสามารถแบ่งออกได้สองกลุ่มเช่นกัน คือ แหล่งบ่อพลอยและไพลิน ซึ่งมีค่าเหล็กและแกดเลียมต่ำ ขณะที่แหล่งดีเอโกและมาบีลาจะมีค่าเหล็กและแกดเลียมสูง การศึกษาปริมาณของธาตุร่องรอยของไทเทเนียม เหล็ก แกดเลียมและวาเนเดียมต่ำกว่าแหล่งอื่นๆ โดยแหล่งบ่อพลอยจะมีปริมาณของแกดเลียมต่ำ ส่วนแหล่งดีเอโกจะมีปริมาณของแกดเลียมและเหล็กสูงที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย สามารถแบ่งออกเป็น 9 ขั้นตอน ตามแผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาในรูปแบบ 3.1 โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1. รวบรวมและศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รวบรวมและศึกษารายงาน เอกสารและงานวิจัยเก่าที่ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะของพลอยแซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา และแหล่งอื่นๆ ทั่วโลก เพื่อนำมาใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้น และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ผลสรุปที่น่าเชื่อถือและผิดพลาดน้อยที่สุด

2. วางแผนการดำเนินงาน คัดเลือกและจัดเตรียมตัวอย่างพลอยให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นพื้นฐานและเครื่องมือขั้นสูง

ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ ที่นำมาศึกษาเป็นตัวอย่างพลอยจากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา ซึ่งเป็นพลอยในโครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ. หรือ GIT) จำนวนทั้งหมด 31 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะสี (color) และคุณภาพอัญมณี (gem quality) ได้แก่ กลุ่มคุณภาพดี (high quality) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) จำนวน 11 ตัวอย่าง และกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue) 7 ตัวอย่าง และกลุ่มคุณภาพต่ำ (low quality) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) จำนวน 7 ตัวอย่าง และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) 6 ตัวอย่าง

3. ตรวจสอบสมบัติพื้นฐานอัญมณี

3.1 ลักษณะทางกายภาพ (physical properties) ด้วยเครื่อง Hydrostatic Balance, UV lamp, Refractometer และ Gemological Microscope และ Laser Raman Spectroscopy

3.2 ลักษณะทางแสง (optical properties) ด้วยเครื่องมือ UV-VIS-NIR Spectrophotometer และ Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

3.3 องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) เพื่อวัดปริมาณธาตุองค์ประกอบหลัก และธาตุองค์ประกอบรองด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer และ Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA) และวัดปริมาณธาตุที่มีน้อยมากๆ

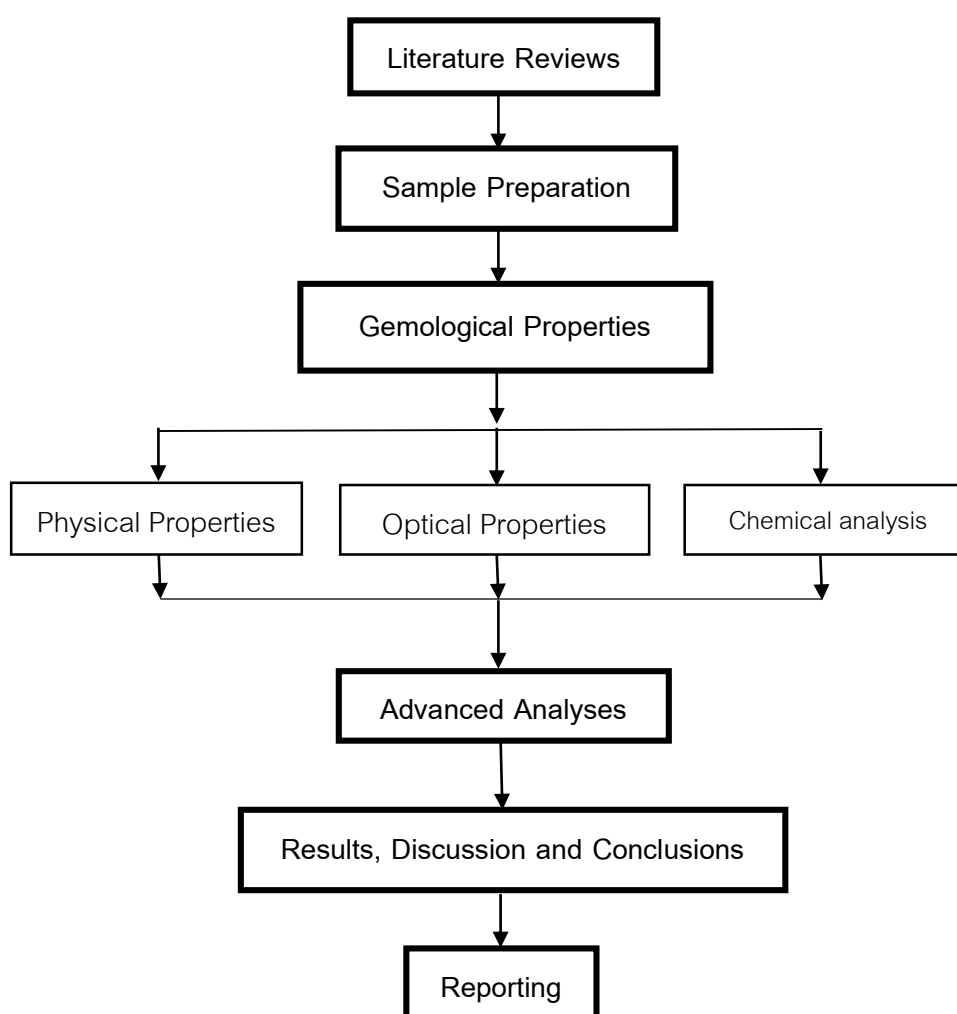
หรือธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (LA-ICP-MS)

4. รวบรวมข้อมูลที่ได้จากการศึกษา วิเคราะห์และแปลความหมาย

นำข้อมูลจากการศึกษาในแต่ละขั้นต้นตอมาทำการแปลความหมายข้อมูลและวิเคราะห์ผล เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของแซปไฟร์ จากแหล่งจางกุกู ประเทศอินเดีย

5. สรุปและนำเสนอโครงการวิจัย

สรุปผลการวิเคราะห์ นำเสนอในรูปแบบสัมมนาและจัดทำรูปเล่มรายงานฉบับสมบูรณ์



รูป 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ศึกษาลักษณะทางกายภาพ (Physical properties) ประกอบด้วย

Hydrostatic Balance: ใช้เป็นเครื่องมือชั่งน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะอัญมณี (รูป 3.2)

Refractometer: เป็นเครื่องมือวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (รูป 3.3)

UV Lamp: หลอดรังสีเหนือม่วงคลื่นสั้นและคลื่นยาว ใช้ตรวจสอบการเรืองแสงของอัญมณี



รูป 3.2 Hydrostatic Balance
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี
และเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การ
มหาชน)



ภาพประกอบ: <http://www.kanchanapisek.or.th/>

รูป 3.3 Refractometer
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญ
มณีและเครื่องประดับแห่งชาติ
(องค์การมหาชน)

ศึกษาลักษณะทางแสง (Optical properties) ประกอบด้วย

กล้องจุลทรรศน์อัญมณี (Gemological microscope): ใช้ศึกษาลักษณะผิวและลักษณะภายในของอัญมณี ถ้าหากมองด้วยแสงไฟแบบธรรมดาที่ส่องผ่านเข้าไปในตัวอย่างจะแยกความแตกต่างระหว่างมลทินกับตัวอย่างได้ยากเพราะตัวอย่างมักจะมีควมใสหรือโปร่งแสงเช่นเดียวกับมลทิน ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์จึงมีระบบ dark field เพื่อใช้แยกมลทินออกได้อย่างชัดเจน (รูป 3.4)

Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR): ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสง (absorption) หรือการให้แสงผ่าน (transmission) เนื่องจากปฏิกิริยาระดับอะตอมขององค์ประกอบโมเลกุลของพลอยเมื่อได้รับแสงอินฟราเรด ใช้ในการตรวจสอบชนิดของพลอยและ

บอกความเป็นไปได้ของแหล่งที่มาทางภูมิศาสตร์ โดยพิจารณาจากรูปแบบการดูดกลืนหรือการผ่านคลื่นแสงอินฟราเรด (รูป 3.5)

Ultraviolet - Visible - Near Infrared Spectrophotometer (UV-VIS-NIR): ใช้วัดค่าการส่องผ่านของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวคลื่นต่างย่าน Ultraviolet (UV), Visible (VIS) และ Near Infrared (NIR) เมื่อตกกระทบตัวอย่างทดสอบ ใช้ในการศึกษาสาเหตุการเกิดสีในอัญมณีและธาตุร่องรอยบางชนิด อาจบ่งบอกถึงแหล่งกำเนิดได้ (รูป 3.6)

Laser Raman Spectroscope: ศึกษารูปแบบปรากฏการณ์ Raman Shift จากการ stretching หรือ bending เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลในโครงสร้างผลอยได้รับพลังงานจากแสงเลเซอร์ ทำให้อะตอมหรือโมเลกุล เกิดการสั่น มีความถี่เปลี่ยนไปจากความถี่ของแสงตกกระทบเดิม เรียกว่า การเลื่อนตัวของรามาน (Raman Shift) โดยอัญมณีและมลทินแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ Raman Shift แตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงของโครงสร้างของโมเลกุล Raman Shift Patterns จึงสามารถใช้บอกชนิดแร่ของมลทินในอัญมณีได้ (รูป 3.7)



รูป 3.4 Gemological microscope จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูป 3.6 เครื่อง UV-VIS-NIR รุ่น Perkin-Elmer จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูป 3.5 เครื่อง FTIR Spectrophotometer รุ่น NICOLET6700 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูป 3.7 เครื่อง Laser Raman Spectroscopy รุ่น Model 1000, Renishaw จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical analysis)

Energy Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer: ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพ สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียม หลักการคือให้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนตัวอย่าง ทำให้อิเล็กตรอนวงในของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนวงนอกถัดมาจะเข้ามาแทนที่และคายพลังงานออกมาในลักษณะของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (รูป 3.8)

Electron Probe Micro-Analyzer (EPMA): ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงปริมาณที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ถึงระดับไมโครเมตร (micro-analysis) หลักการคือยิงลำอิเล็กตรอนไปบนผิวของตัวอย่าง จะทำให้องค์ประกอบภายในตัวอย่าง ปลดปล่อยอิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์เรย์ในลักษณะเฉพาะขององค์ประกอบในตัวอย่าง (รูป 3.9)

Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS): ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีปริมาณน้อยมากหรือธาตุร่องรอยได้ในระดับหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm, part per million) ซึ่งแตกต่างจากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF และ EPMA ที่ได้ค่าออกมาเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) แต่ด้วยเทคนิคของวิธีนี้ ตัวอย่างที่ใช้อาจจะต้องมีการทำลายตัวอย่างบางส่วน (รูป 3.10)



รูป 3.8 เครื่อง EDXRF รุ่น EAGLE III
จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและ
เครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูป 3.9 เครื่อง EPMA รุ่น JEOL JXA-8100
จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 3.10 เครื่อง Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) (LA รุ่น UP-213 และ ICP-MS รุ่น 7500cs) จากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

บทที่ 4

ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผล

4.1 ลักษณะทั่วไป

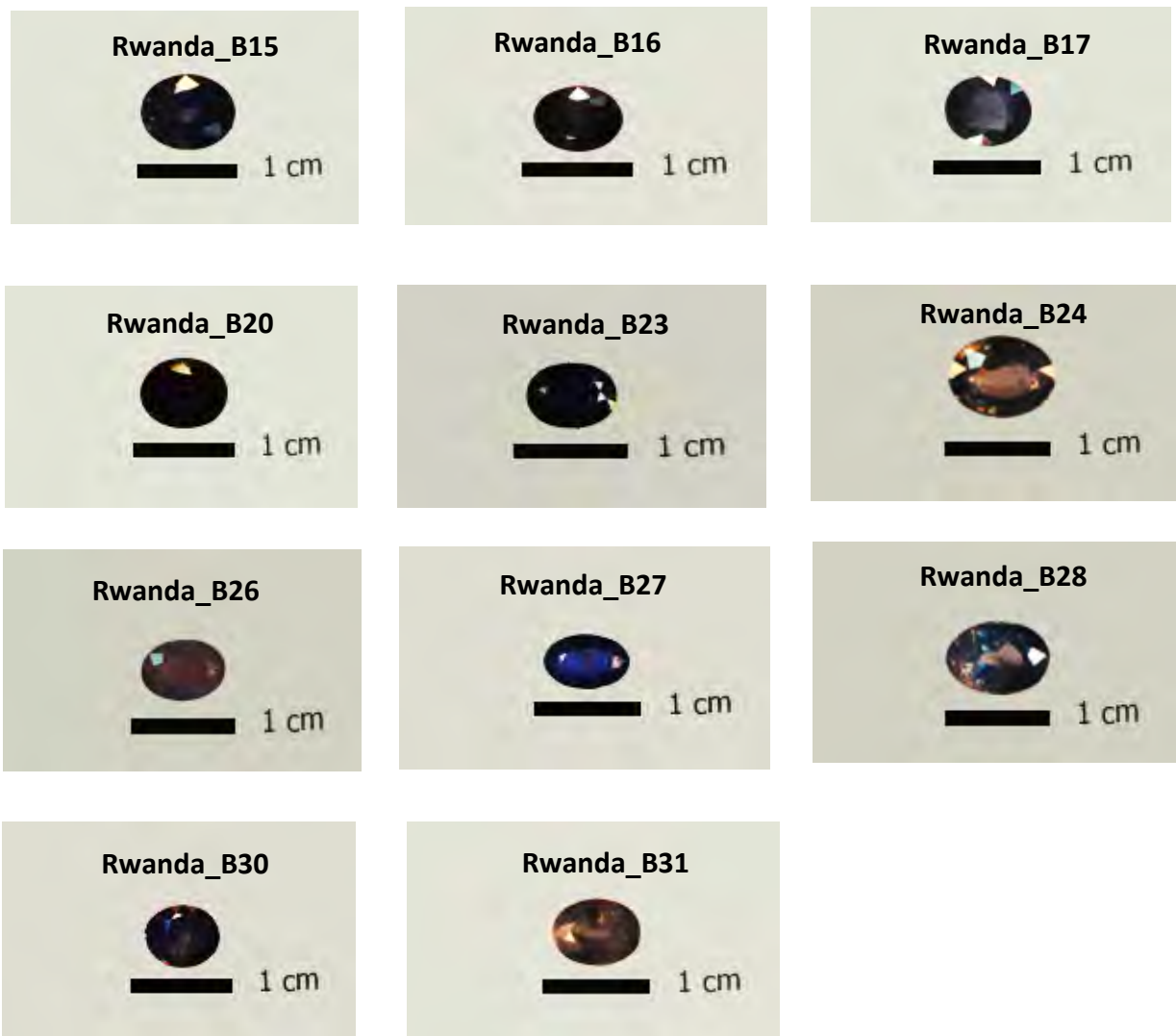
ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ ที่นำมาศึกษาเป็นตัวอย่างพลอยจากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา ซึ่งเป็นพลอยในโครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สวอ. หรือ GIT) จำนวนทั้งหมด 31 ตัวอย่าง แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะสี (color) และคุณภาพอัญมณี (gem quality) ได้แก่ กลุ่มคุณภาพดี (high quality) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) จำนวน 11 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างสีน้ำเงินเข้ม บางเม็ดโปร่งใส บางเม็ดทึบแสง คุณภาพดี ผ่านการเจียรไนแล้ว และกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue) 7 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างสีน้ำเงินอ่อน โปร่งใส คุณภาพดี ผ่านการเจียรไนแล้ว ทั้งสองกลุ่มตัวอย่างไม่แสดงการเรืองแสงทั้งภายใต้แสงเหนือม่วงช่วงคลื่นยาว (longwave ultraviolet) และแสงเหนือม่วงช่วงคลื่นสั้น (shortwave ultraviolet)

อีกกลุ่มคือ กลุ่มคุณภาพต่ำ (low quality) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) จำนวน 7 ตัวอย่าง ส่วนมากจะสีหม่นๆ และทึบแสง สีไม่สม่ำเสมอทั้งเม็ด มีรอยแตกค่อนข้างมาก มีสีน้ำตาลเกาะอยู่ที่ผิว คุณภาพต่ำ ยังไม่เจียรไน และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) 6 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างสีน้ำเงินเข้มถึงสีน้ำเงินอ่อนอมเขียว บางเม็ดโปร่งใส บางเม็ดทึบแสง สีไม่สม่ำเสมอทั้งเม็ด คุณภาพต่ำ ยังไม่เจียรไน บางตัวอย่างสามารถเห็นมลทินได้ด้วยตาเปล่า โดยตัวอย่างทั้งหมดไม่แสดงการเรืองแสงทั้งภายใต้แสงเหนือม่วงช่วงคลื่นยาว (longwave ultraviolet) และแสงภายใต้แสงเหนือม่วงช่วงคลื่นสั้น (shortwave ultraviolet) รายละเอียดผลวิเคราะห์ตัวอย่างทั้ง 4 กลุ่มจะรายงานต่อไป

กลุ่มคุณภาพดี:

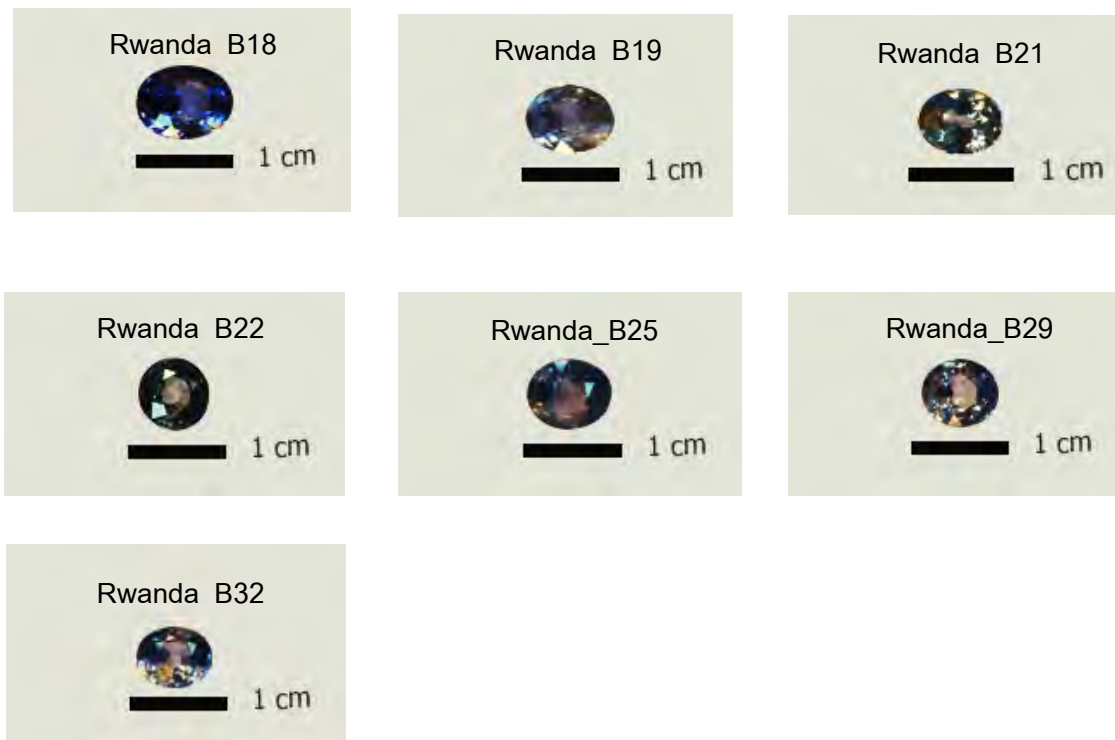
กลุ่มตัวอย่างคุณภาพดี (high quality) มีลักษณะโปร่งแสง มีรอยแตกน้อยและไม่พบรอยกัดกร่อนบริเวณขอบ ประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อย ดังนี้

กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) 11 ตัวอย่าง เจียรไนแล้วและยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (ตามรูป 4.1)



รูป 4.1 ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)

กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue) 7 ตัวอย่าง ที่เจียรระไนแล้วและยังไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (ตามรูป 4.2)

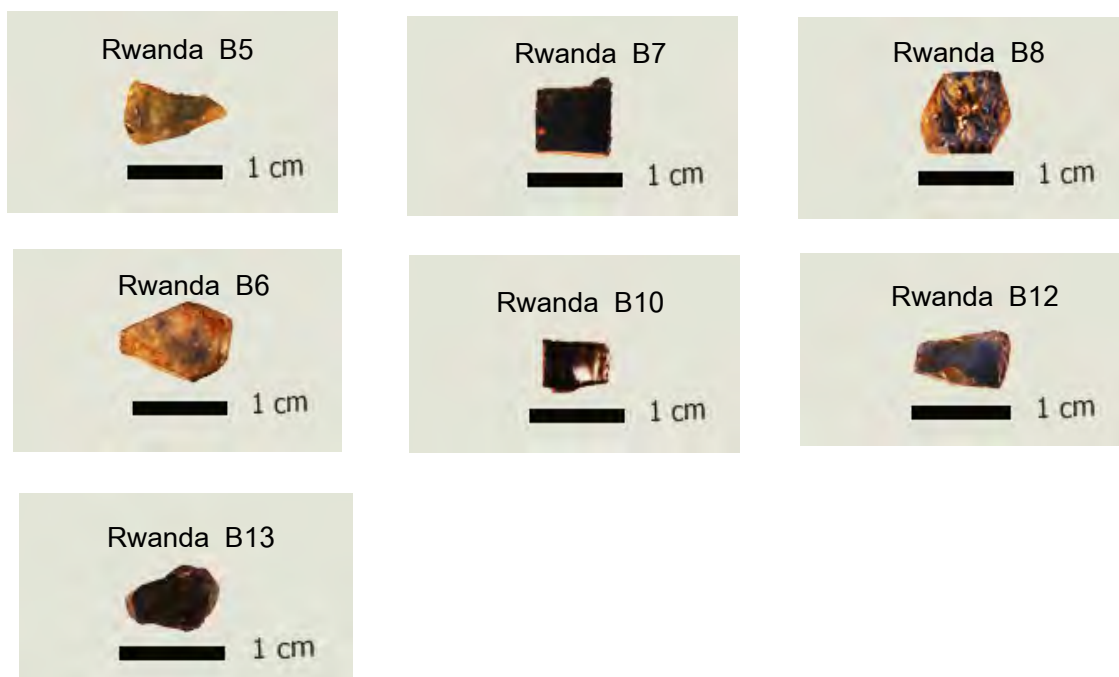


รูป 4.2 ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)

กลุ่มคุณภาพต่ำ:

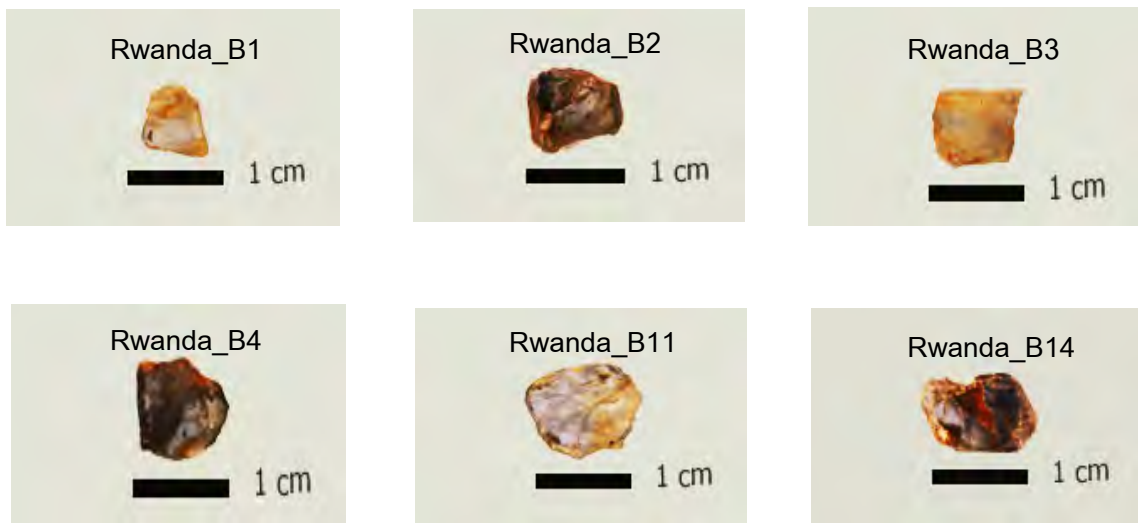
กลุ่มตัวอย่างคุณภาพต่ำ (low quality) มีลักษณะที่บดแสงถึงกึ่งโปร่งแสง พบรอยแตกน้อย และบริเวณขอบมีรอยกัดกร่อนน้อย ประกอบด้วย 2 กลุ่มย่อย ดังนี้

กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสง (opaque dark blue) จำนวน 7 ตัวอย่าง (ตามรูป 4.3)



รูป 4.3 ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสง (opaque dark blue)

กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) 6 ตัวอย่าง (ตามรูป 4.4)



รูป 4.4 ตัวอย่างกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)

ตัวอย่างทั้งหมดดังที่กล่าวมาถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทางอัญมณีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติเฉพาะทางอัญมณีสั่งตารางที่ได้สรุปไว้ในตาราง 4.1 และรายละเอียดรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

ตาราง 4.1 สมบัติทางกายภาพและสมบัติอัญมณีของตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกู

ประเทศวันดา

Sample	Transparency	Weight (ct.)	SG	RI		Birefringence	Fluorescence	
				no	ne		SW	LW
Dark blue	Opaque to Semi- Transparent	1.02-1.98 (1.47)	3.93-4.01 (3.98)	1.770	1.760-1.762 (1.761)	0.008-0.010 (0.009)	inert	inert
Light blue		0.94-1.83 (1.31)	3.95-4.02 (3.98)	1.770	1.760-1.765 (1.762)	0.005-0.010 (0.008)	inert	inert
Opaque	Transparent	0.74-3.77 (1.74)	3.88-3.97 (3.94)	1.770	1.760-1.765 (1.762)	0.005-0.010 (0.008)	inert	inert
Greenish blue		0.81-4.13 (2.71)	3.99-3.97 (3.95)	1.770	1.760-1.762 (1.761)	0.008-0.010 (0.009)	inert	inert

4.2 มลทินเนื้อใน

การศึกษามลทินเนื้อในภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี ในตัวอย่างแซปไฟร์ที่มีกำเนิดชนิดสัมพันธ์กับหินแอลคาไลบะซอลต์ (alkali basalt) จากแหล่งจางกูกู (Cyangugu) ประเทศรวันดา (Rwanda) ทวีปแอฟริกา มลทินที่พบส่วนใหญ่ ได้แก่ มลทินลายนิ้วมือ (fingerprint) มลทินผลึกแร่ (cystals) และมลทินชนิดอื่นๆ ได้แก่ แถบสี (color zoning) ระนาบของผลึกแฝด (twinning) กลุ่มหมอก (cloud)

จากผลวิเคราะห์ดังสรุปในตาราง 4.2 มลทินลายนิ้วมือ ระนาบผลึกแฝดและแถบสี จะพบมากในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพดี (high quality) ของกลุ่มสีน้ำเงินเข้ม และกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน และมลทินผลึกแร่ จะพบมากในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพต่ำ (low quality)

อย่างไรก็ตาม มลทินผลึกแร่ที่โผล่ขึ้นมาที่ผิวอัญมณี จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อระบุหาชนิดของมลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope และ EPMA ต่อไป

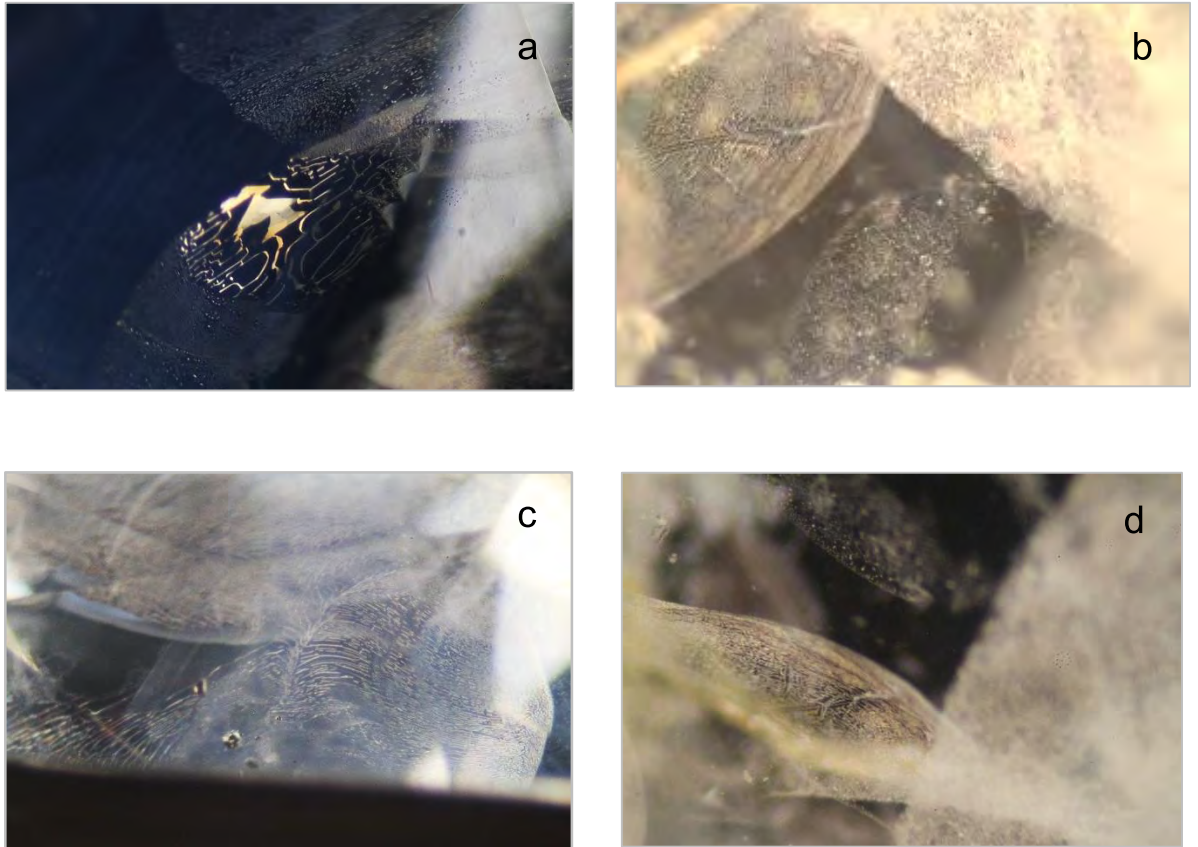
ตาราง 4.2 ชนิดของมลทินรูปแบบต่างๆ และความถี่ที่พบในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกูกู ประเทศรวันดา

Type of inclusions	High quality		Low quality	
	Dark blue	Light blue	Opaque dark blue	Greenish blue
- มลทินผลึกแร่ (Crystal)	**	*	***	***
- มลทินลายนิ้วมือ (Fingerprint)	***	***	*	**
- ระนาบผลึกแฝด (Twinning)	***	*	*	*
- แถบสี (Color zoning)	***	**	*	**
- มลทินฝุ่น (Cloud)	-	*	-	*
- มลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็ก (Minute particles)	-	*	-	*

หมายเหตุ - ไม่พบเลย *พบน้อย **พบบ้าง ***พบบ่อย

มลทินที่พบทั่วไป ประกอบด้วย

มลทินรอยนิ้วมือ (fingerprint) เป็นมลทินที่พบอยู่บ่อยครั้งในแชปไฟร์ สามารถพบได้ในทุกกลุ่มตัวอย่าง โดยเฉพาะในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพดี (high quality) (รูป 4.5)

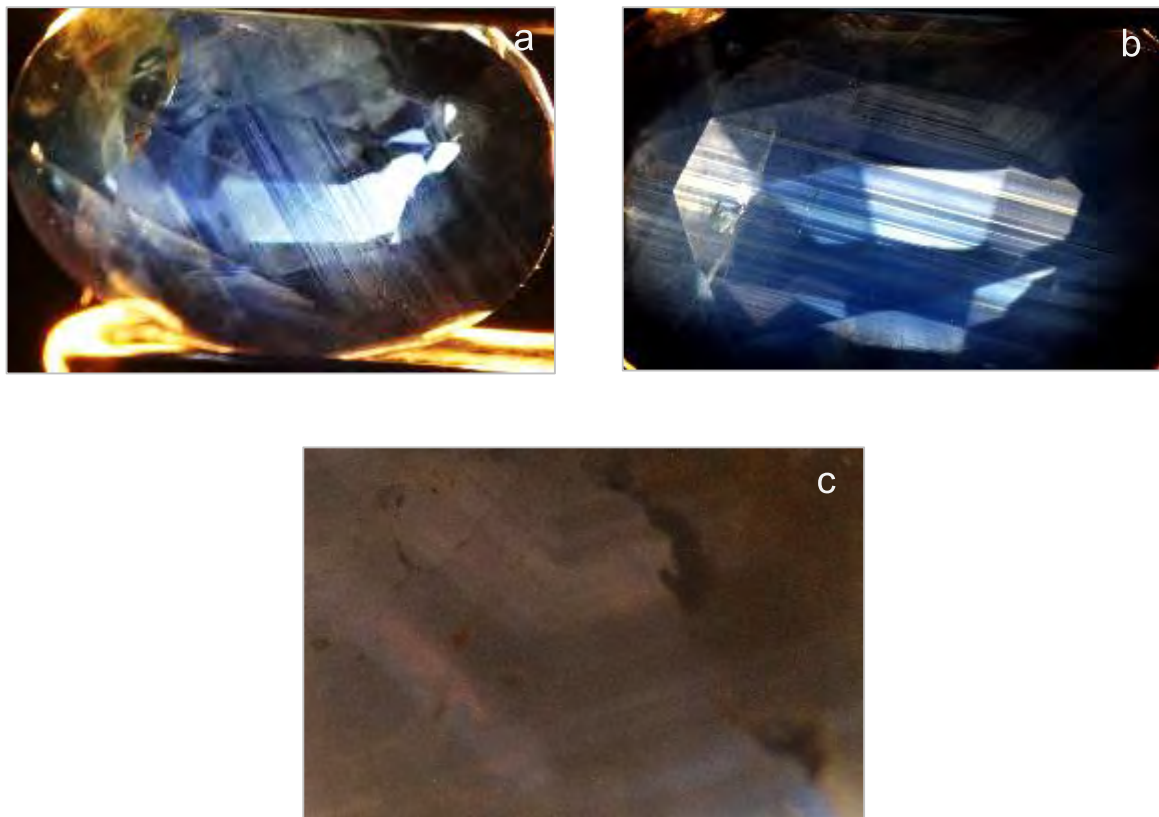


รูป 4.5 มลทินรอยนิ้วมือแบบต่างๆ ในตัวอย่างแชปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

- a) มลทินรอยนิ้วมือ (Rwanda_B14) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)
- b) มลทินรอยนิ้วมือ (Rwanda_B11) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)
- c) มลทินรอยนิ้วมือ (Rwanda_B19) กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)
- d) มลทินรอยนิ้วมือ (Rwanda_B3) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)

มลทินชนิดที่พบบ่อยในกลุ่มคุณภาพดี ประกอบด้วย

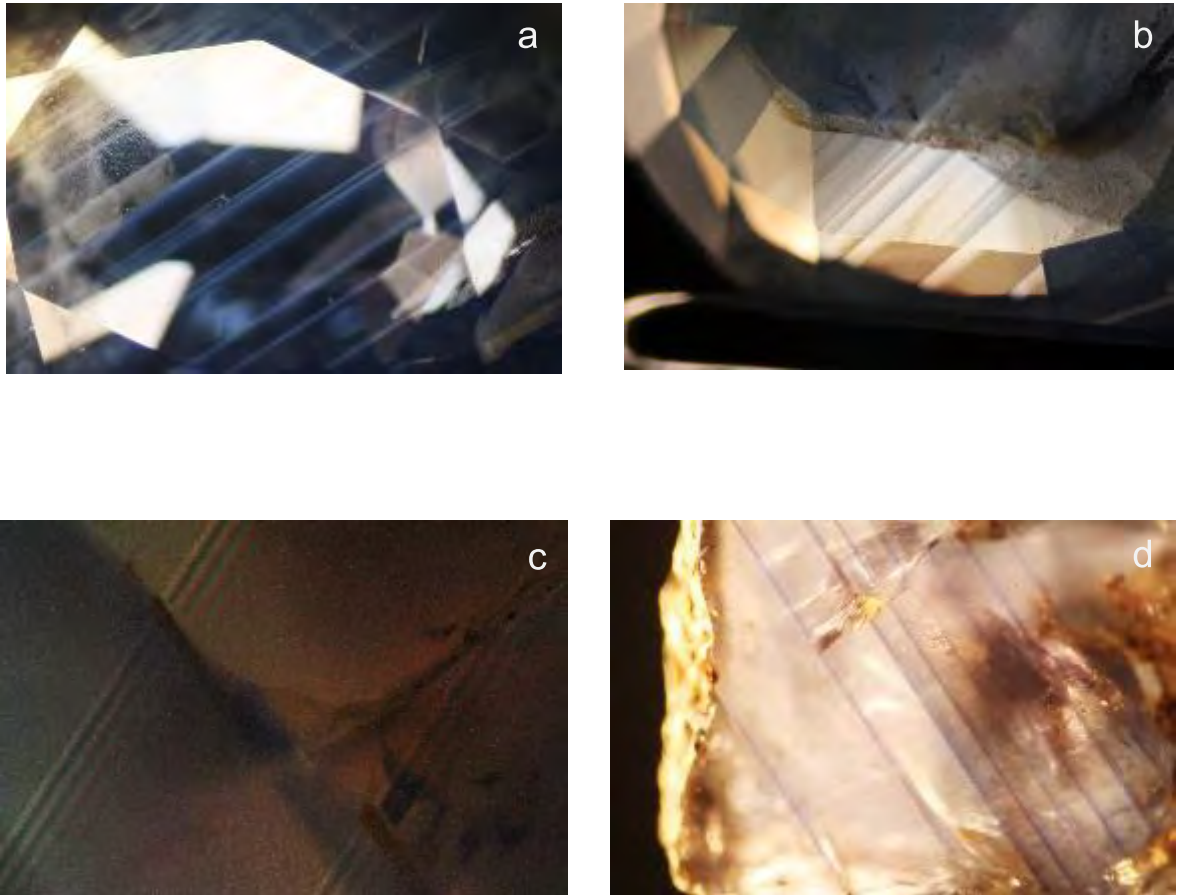
แถบสี (color zoning) ที่พบในตัวอย่างแซปไฟร์ส่วนใหญ่จะแสดงแถบสีเส้นตรงและแถบสีหักมุม ซึ่งจะสังเกตแถบสีได้ชัดในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพดี (high quality) (รูป 4.6)



รูป 4.6 มลทินแถบสีเส้นตรงและแถบสีหักมุม ในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา

- a) แถบสีตรง (Rwanda_B20) กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)
- b) แถบสีตรงและหักมุม (Rwanda_B23) กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)
- c) แถบสีหักมุม (Rwanda_B8) กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue)

ระนาบผลึกแฝด (twinning) พบว่าระนาบของผลึกแฝดมีการเรียงตัวขนานกันอย่างชัดเจน และมีบางส่วนที่มีลักษณะตัดกัน สังเกตเห็นได้ชัดในตัวอย่างกลุ่มคุณภาพดี (high quality) (รูป 4.7)

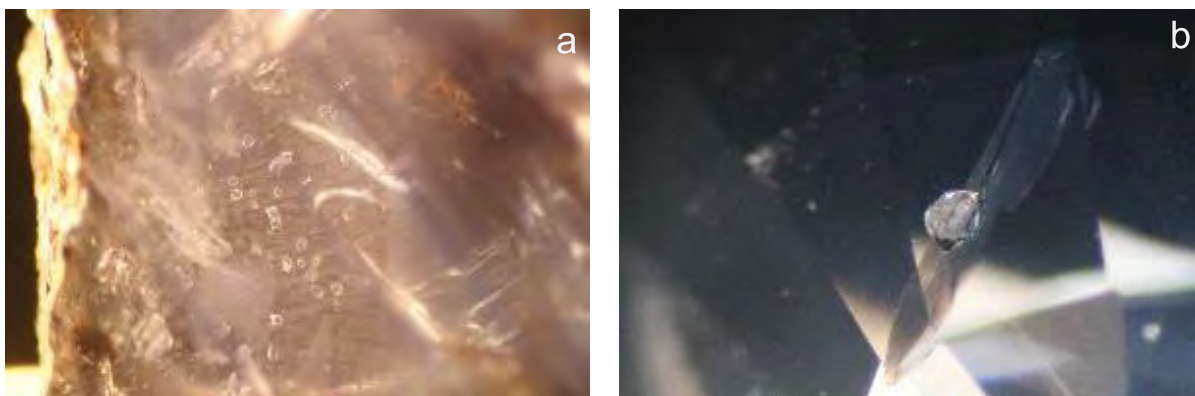


รูป 4.7 มลทินระนาบผลึกแฝด ในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

- a) ระนาบผลึกแฝดขนานกัน (Rwanda_B18) กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)
- b) ระนาบผลึกแฝดขนานกัน แต่เห็นไม่ค่อยชัดเจนเนื่องจากมลทินเนื้อใน
บดบัง (Rwanda_B31) กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)
- c) ระนาบผลึกแฝดขนานกัน (Rwanda_B7) กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue)
- d) ระนาบผลึกแฝดขนานกัน (Rwanda_B11) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)

มลทินชนิดที่พบบ่อยในกลุ่มคุณภาพต่ำ ประกอบด้วย

มลทินผลึกแร่ (Cystals) ที่พบในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา พบบ่อยในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพต่ำ (low quality) ของกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) ประกอบด้วย มลทินผลึกใสเดี่ยว มลทินผลึกสีดำ มลทินผลึกสีน้ำเงิน มลทินผลึกสีน้ำตาล รูปร่างไม่แน่นอน บางตัวอย่างมีลักษณะเป็นแท่ง บางตัวอย่างถูกล้อมรอบด้วยมลทินรอยนิ้วมือหรือมลทินรอยแตกรูปจาน และมลทินผลึกขนาดเล็กจำนวนมากพบร่วมกับมลทินรอยนิ้วมือ เมื่อวิเคราะห์มลทินผลึกแร่ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope และเครื่อง EPMA ทำให้ทราบว่ามลทินผลึกแร่ที่พบมากในแซปไฟร์แหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา ได้แก่ ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) เนฟีลีน (nepheline) สปิเนล (spinel) เซอร์คอน (zircon) และเฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite)

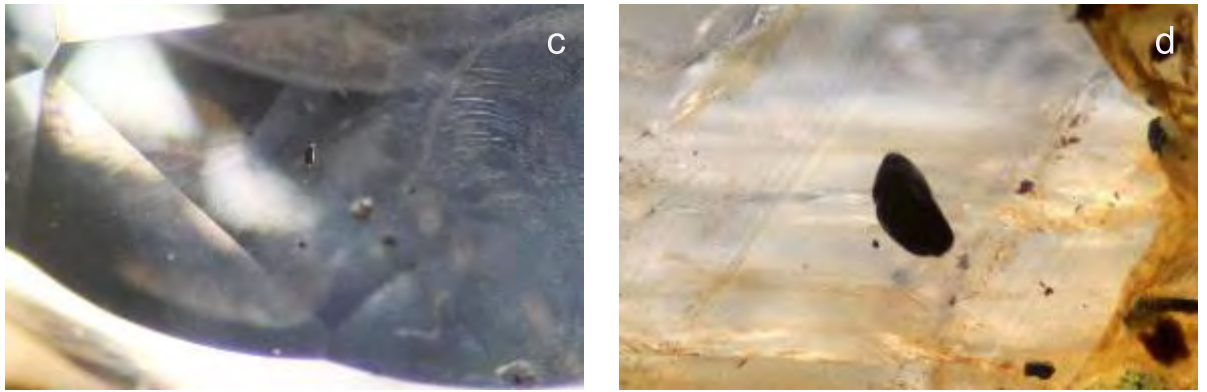


รูป 4.8 มลทินผลึกแร่ชนิดต่างๆ ในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา

- a) มลทินผลึกใส ของแร่เซอร์คอน (Rwanda_B11) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)
- b) มลทินผลึกใสถูกล้อมรอบด้วยมลทินรอยแตกรูปจาน (feldspar with tension crack) (Rwanda_13) กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)

c

d

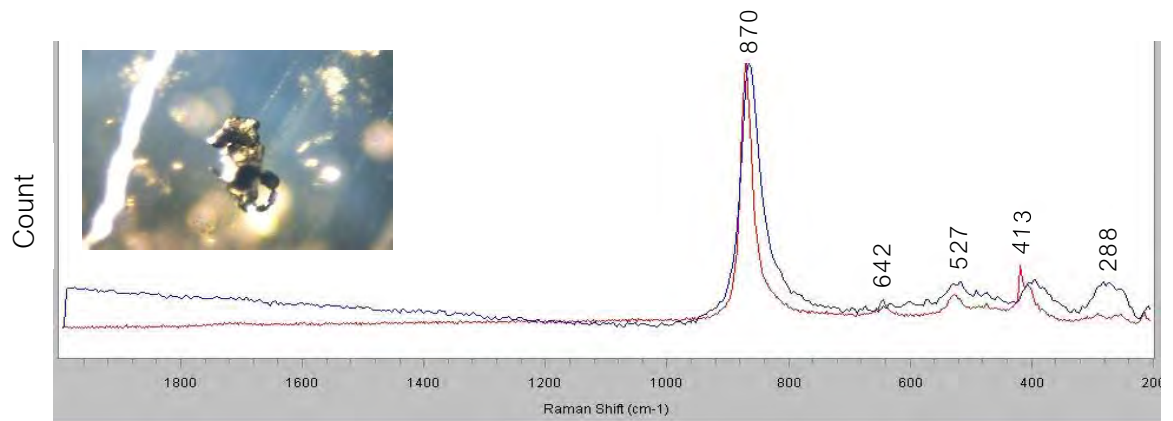


รูป 4.9 มลทินผลึกแร่ชนิดต่างๆ ในตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

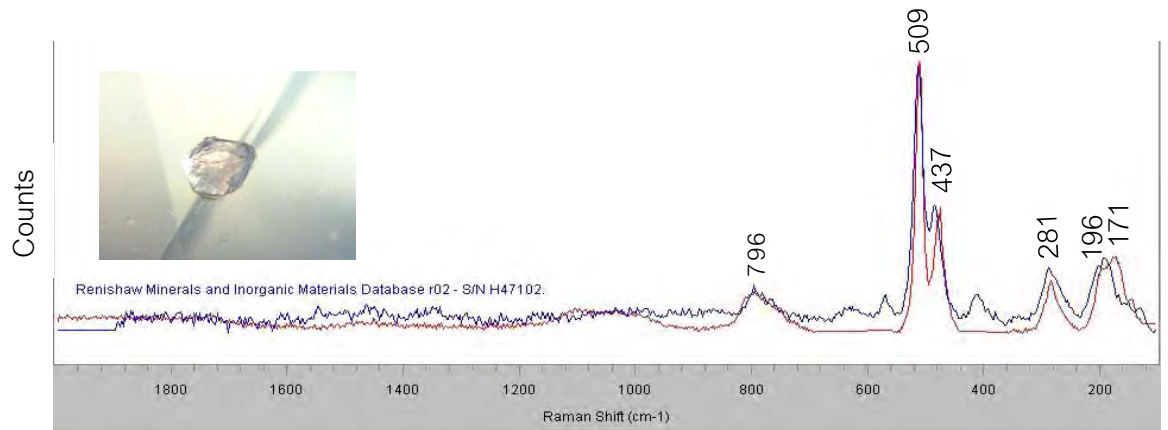
c) มลทินผลึกสีน้ำเงิน ของแร่สปิเนล (spinel) ถูกล้อมรอบด้วยมลทินรอยนิ้วมือ (Rwanda_B19) กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)

d) มลทินผลึกสีดำ ที่บ่งแสงของแร่โคลัมไบต์ (ferrocolumbite) (Rwanda_B1) กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)

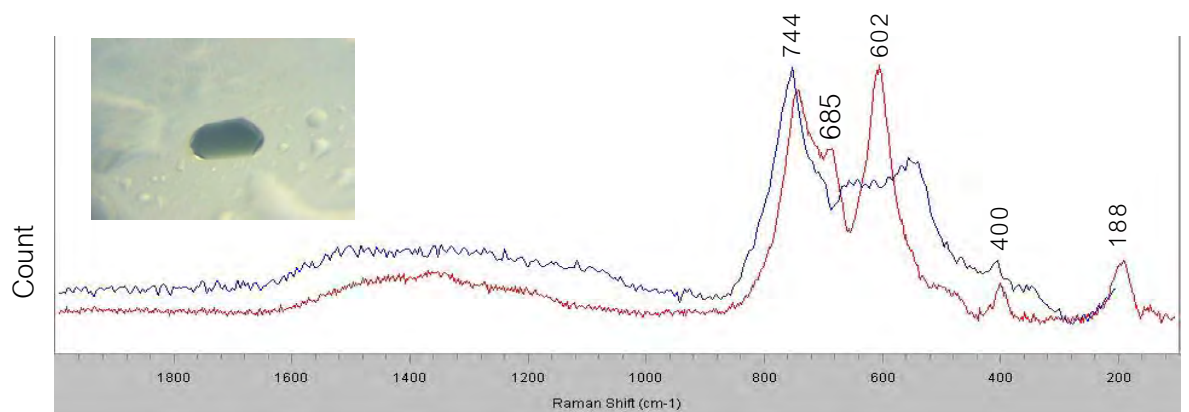
มลทินผลึกแร่จากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy



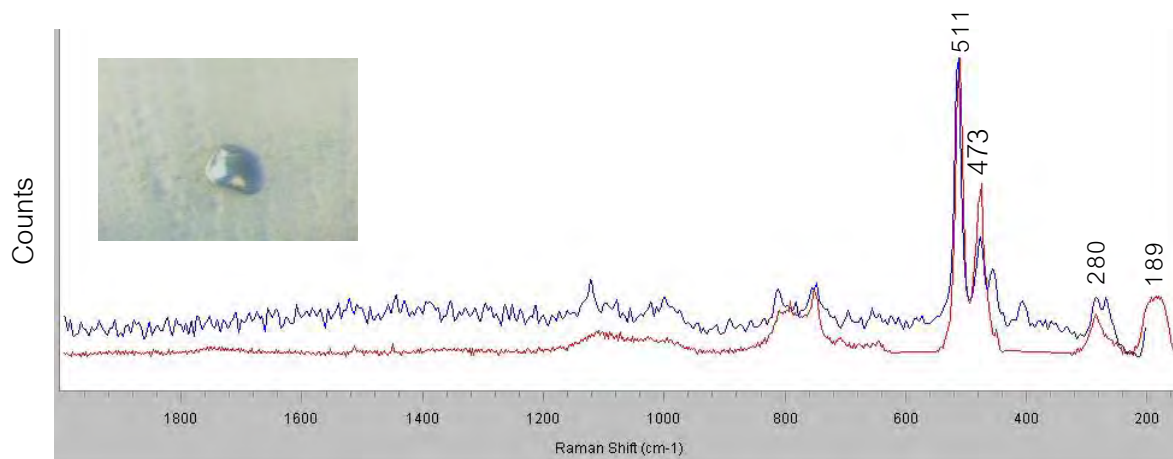
รูป 4.10 Raman Spectrum ผลึกแร่เฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) ของตัวอย่าง Rwanda_B5 กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)



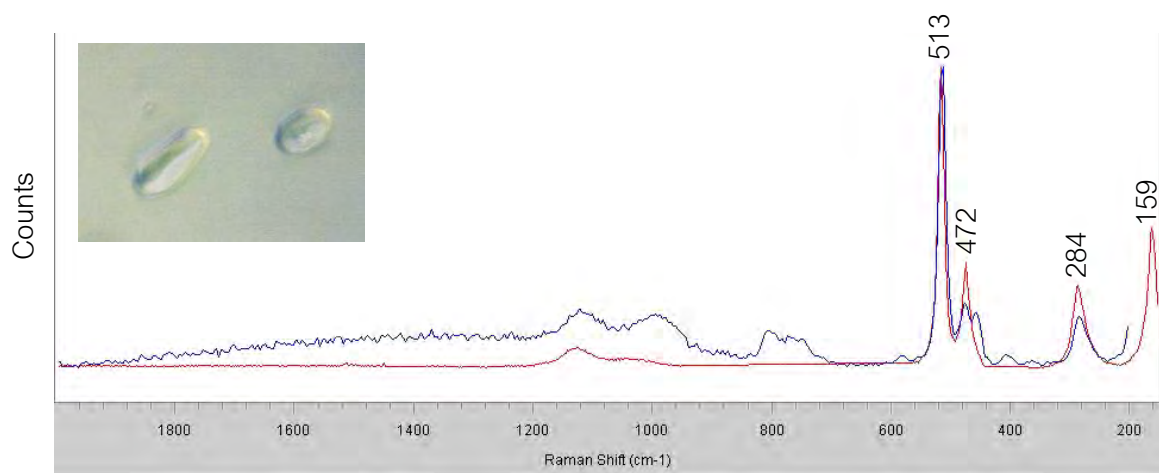
รูป 4.11 Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) ถูกฉีกอมรอบด้วยมลทินรอยแตกรูปจาน (feldspar with tension crack) ของตัวอย่าง Rwanda_B1 กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue)



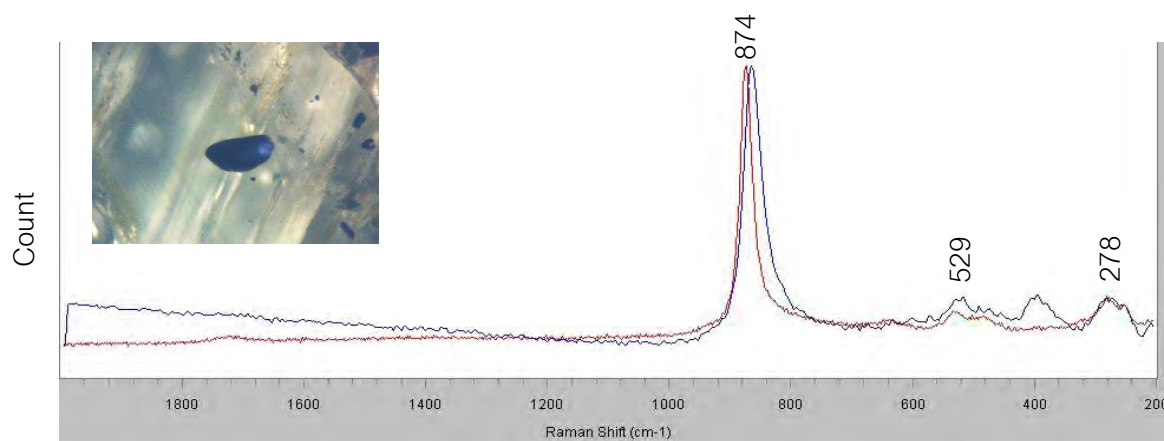
รูป 4.12 Raman Spectrum ผลึกแร่สปิเนล (spinel) ของตัวอย่าง Rwanda_B19 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)



รูป 4.13 Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) ของตัวอย่าง Rwanda_B29
กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)



รูป 4.14 Raman Spectrum ผลึกแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar) ของตัวอย่าง Rwanda_B1
กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)



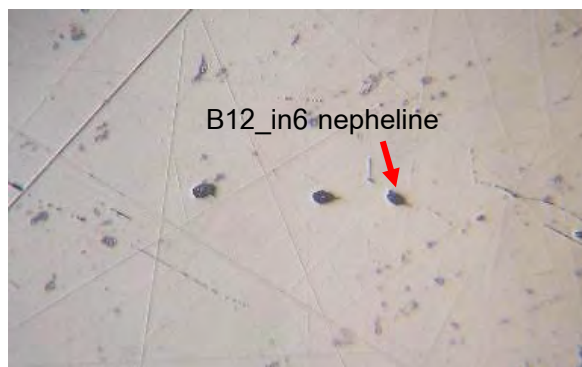
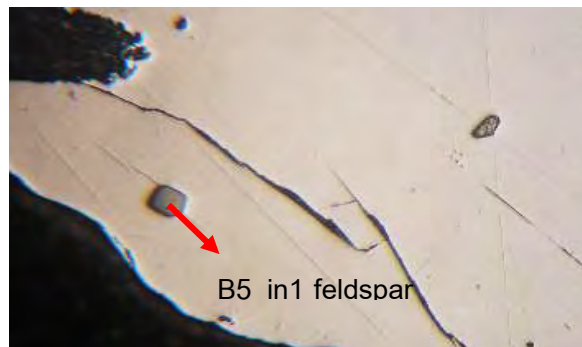
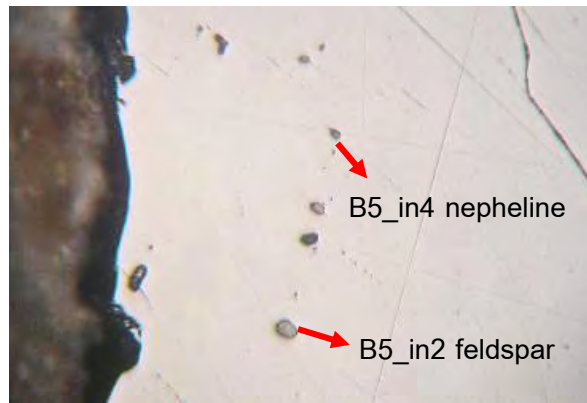
รูป 4.15 Raman Spectrum ผลึกแร่เฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) ของตัวอย่าง
Rwand_B1 กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue)

ตาราง 4.3 ผลการวิเคราะห์หิมลทินผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar inclusions) ที่พบในตัวอย่าง
 แซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว
 (greenish blue) ของแหล่งจางกูญ ประเทศเวียดนามด้วยเครื่อง EPMA

Mineral phase Analysis (wt%)	Low quality		
	Opaque dark blue		Greenish blue
	B5_in1	B5_in2	B2_in4
SiO ₂	66.63	67.71	57.82
Al ₂ O ₃	19.64	19.49	20.81
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.01
FeO	0.08	0.14	0.06
TiO ₂	0.08	0.05	0.04
MgO	0.01	0.00	0.03
P ₂ O ₅	0.03	0.06	0.04
BaO	0.02	0.00	0.06
CaO	0.11	0.27	0.35
Nb ₂ O ₅	0.01	0.06	0.01
Na ₂ O	2.33	0.55	6.07
MnO	0.01	0.00	0.00
K ₂ O	7.27	3.39	4.75
HfO ₂	0.00	0.00	0.00
Total	96.23	91.71	90.05

ตาราง 4.4 ผลการวิเคราะห์ **มลทินผลึกแร่เนเฟลีน (nepheline inclusions)** ที่พบในตัวอย่าง
 แซปไฟร์กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว
 (greenish blue) ของแหล่งจางกุก ประเทศเวียดนามด้วยเครื่อง EPMA

Mineral phase Analysis (wt%)	Low quality	
	Opaque dark blue	
	B5_in4	B12_in6
SiO ₂	41.13	49.69
Al ₂ O ₃	38.25	38.47
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00
FeO	0.10	0.31
TiO ₂	0.04	0.07
MgO	0.016	0.05
P ₂ O ₅	0.04	0.47
BaO	0.02	0.00
CaO	0.23	0.31
Nb ₂ O ₅	0.00	0.00
Na ₂ O	15.46	2.53
MnO	0.00	0.09
K ₂ O	4.69	5.26
HfO ₂	0.07	0.12
Total	100.10	97.35

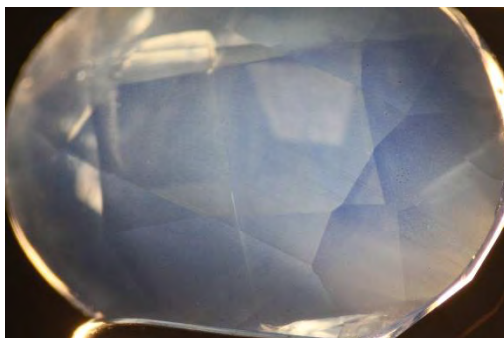


รูป 4.16 ตัวอย่างผลวิเคราะห์มหัตินผลึกแร่ด้วยเครื่อง EPMA บริเวณผิวของเซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

- a) ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) และแร่เนฟิลีน (nepheline) ของตัวอย่าง Rwanda_B5 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)
- b) ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) ของตัวอย่าง Rwanda_B5 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)
- c) ผลึกแร่เนฟิลีน (nepheline) ของตัวอย่าง Rwanda_B12 กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน (light blue)

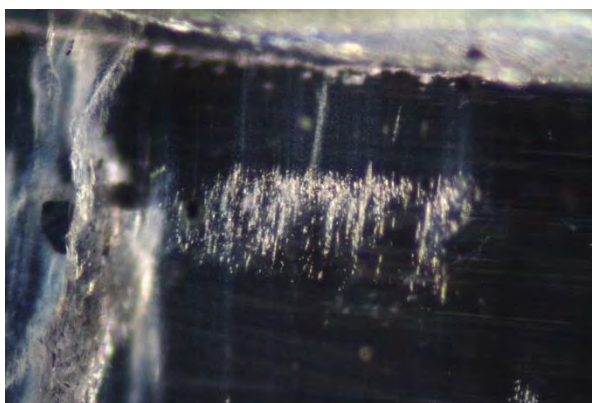
มลทินอื่นๆ ประกอบด้วย

มลทินกลุ่มหมอก (Cloud) มลทินชนิดนี้จะทำให้เนื้อพลอยมีลักษณะขุ่นมัว ไม่โปร่งใส (รูป 4.17)



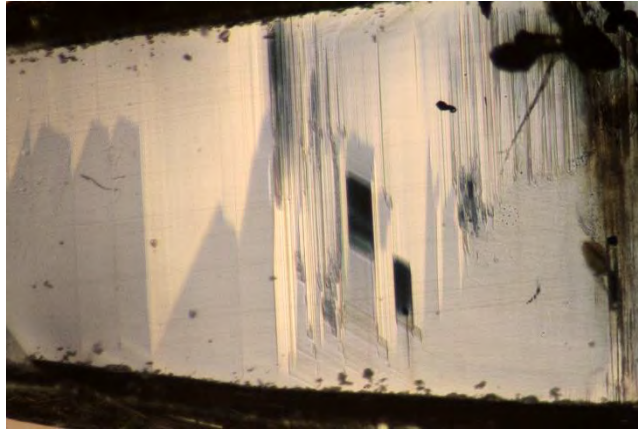
รูป 4.17 มลทินกลุ่มหมอก (cloud) ในตัวอย่างแซปไฟร์ (Rwanda_B16)
กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา

มลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็ก ลักษณะเหมือนดาวหาง (Comet-like) สีขาวขุ่นเป็นแนว (รูป 4.18)



รูป 4.18 มลทินกลุ่มผลึกแร่ขนาดเล็กเหมือนดาวหางในตัวอย่างแซปไฟร์ (Rwanda_B4)
กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา

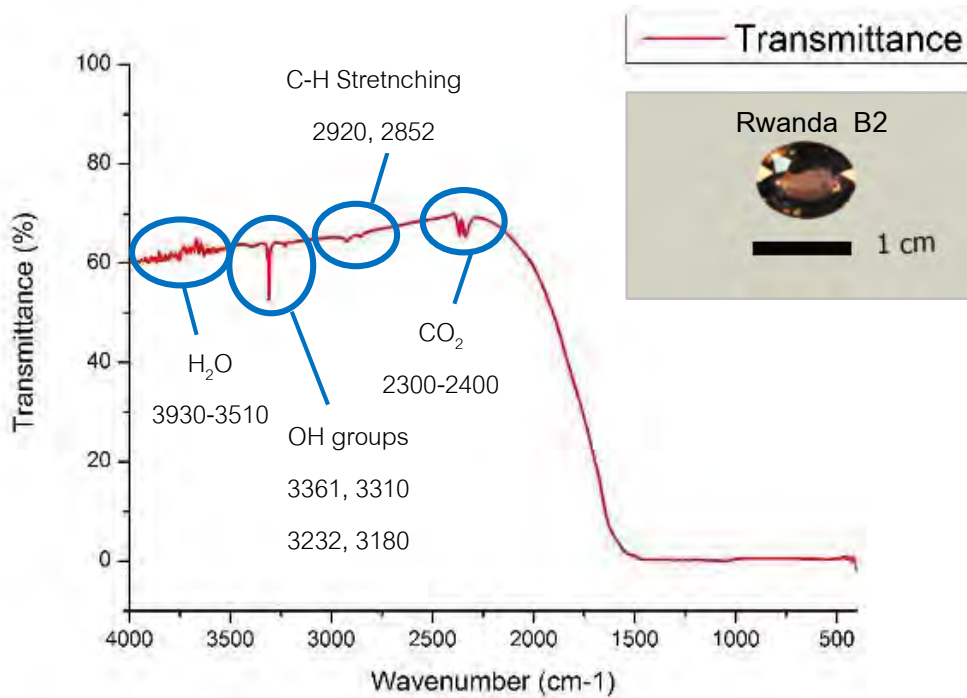
มลทินแถบสี (Color pad) ตามแนวของผลึกแฝด (Twining) (จากรูป 4.19)



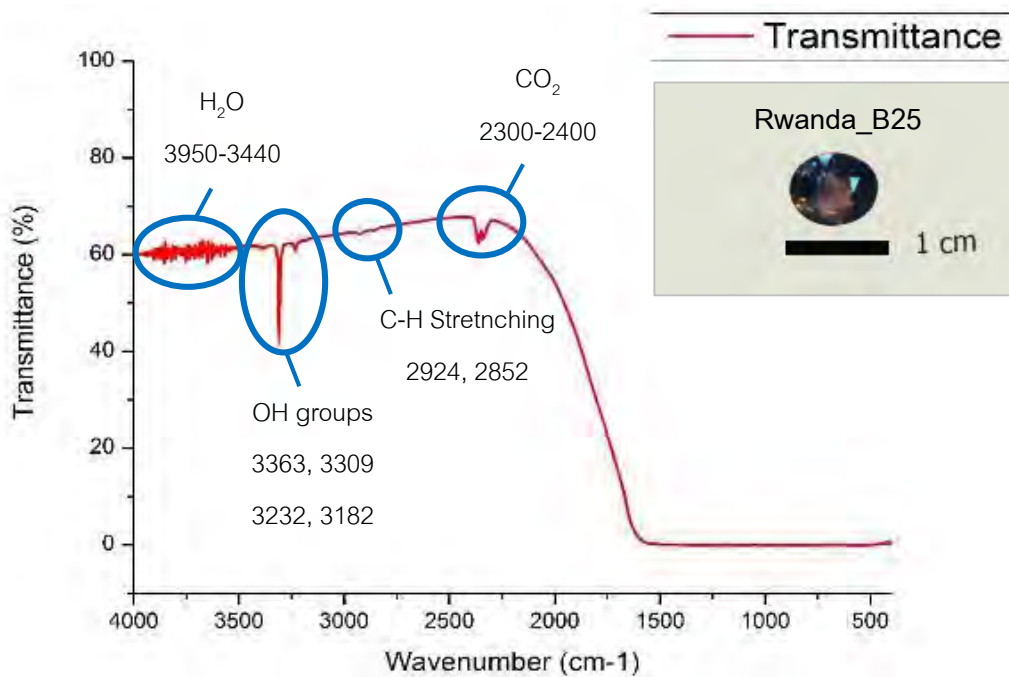
รูป 4.19 มลทินแถบสีตามแนวของผลึกแฝดในตัวอย่างแซปไฟร์ (Rwanda_B4)
กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา

4.3 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด

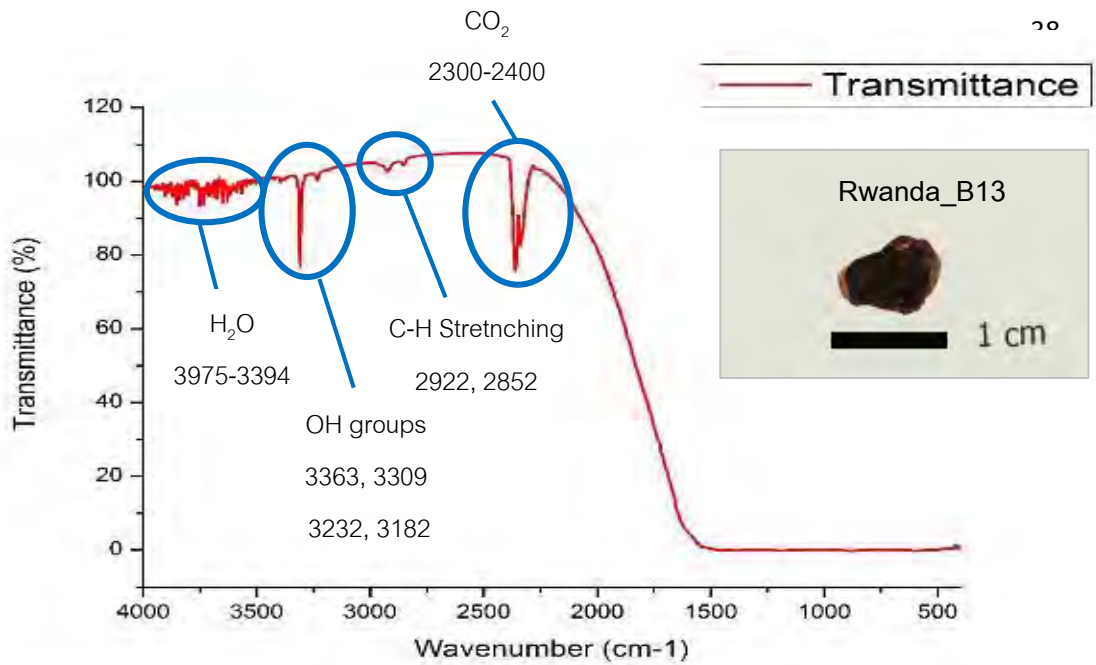
ลักษณะทั่วไปของการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด (FTIR) แสดงการดูดกลืนของ H_2O ในช่วงประมาณ $3400 - 3900\text{ cm}^{-1}$ การดูดกลืนของ CO_2 ในช่วงประมาณ $2300 - 2400\text{ cm}^{-1}$ การดูดกลืนของ C-H Stretching ที่ตำแหน่งประมาณ 2850 และ 2920 cm^{-1} ซึ่งสามารถพบลักษณะการดูดกลืนที่กล่าวมานี้ได้ในทุกแหล่งเป็นการดูดกลืนทั่วไป (ดูรูป 4.20-4.23) อย่างไรก็ตาม พบการดูดกลืนพิเศษในตัวอย่างแชปไฟร์จากแหล่งที่นำมาศึกษา ได้แก่ การดูดกลืนของ OH groups ซึ่งแสดงค่าการดูดกลืน ในช่วงประมาณ $3100-3400\text{ cm}^{-1}$ โดยแสดงยอดการดูดกลืนหลักที่ตำแหน่ง 3309 cm^{-1} และสามารถพบการดูดกลืนของการดูดกลืนย่อยที่ตำแหน่งประมาณ 3363 , 3232 และ 3182 cm^{-1} ร่วมด้วย โดยช่วงการดูดกลืนเหล่านี้สามารถใช้เป็นเกณฑ์คร่าวๆ ในการบ่งชี้ว่าตัวอย่างนั้นๆ ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนมาแล้วหรือไม่ อีกทั้งยังสามารถบ่งชี้ชนิดของแหล่งกำเนิดของแชปไฟร์ระหว่างชนิดบะซอลต์และชนิดแปรสภาพ โดยรูปแบบการดูดกลืนของตัวอย่างแชปไฟร์ที่พบ สามารถบ่งชี้ได้ว่าแชปไฟร์ แหล่งจางกูญ ประเทศเวียดนาม มีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์ โดยแสดงตัวอย่างของทั้ง 4 กลุ่มตัวอย่างในรูป 4.20, 4.21, 4.22 และ 4.23 และรูปแบบการดูดกลืนทั้งหมดรวบรวมในภาคผนวก ข



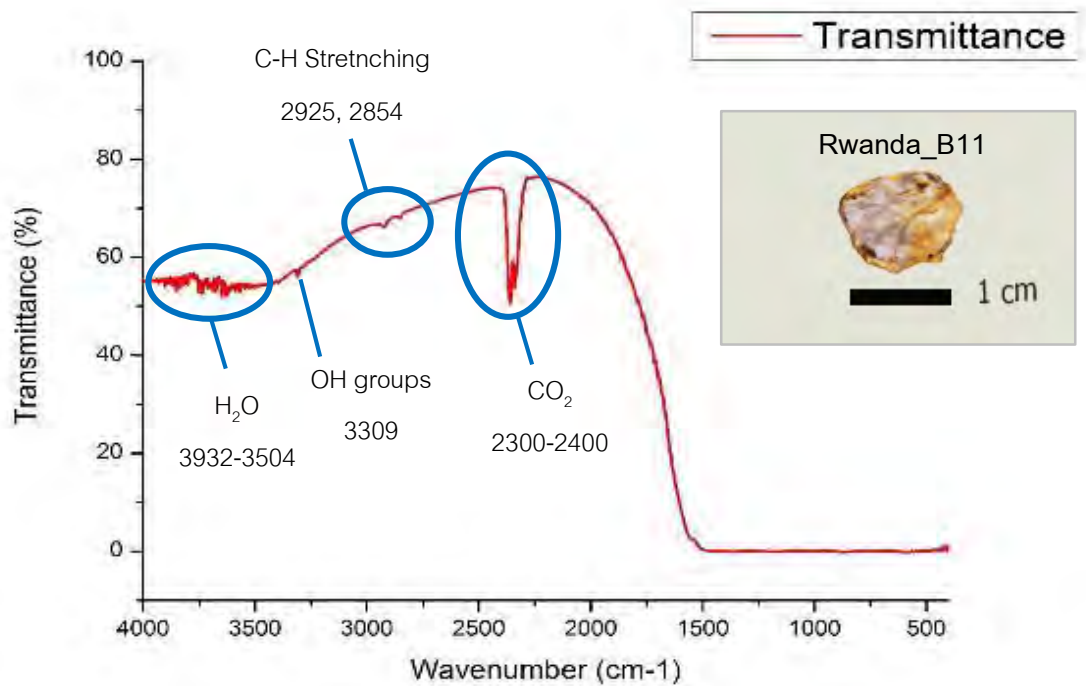
รูป 4.20 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B2) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



รูป 4.21 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B25) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



รูป 4.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) จากแหล่งจางกู่ ประเทศรวันดา (Rwanda_B13) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

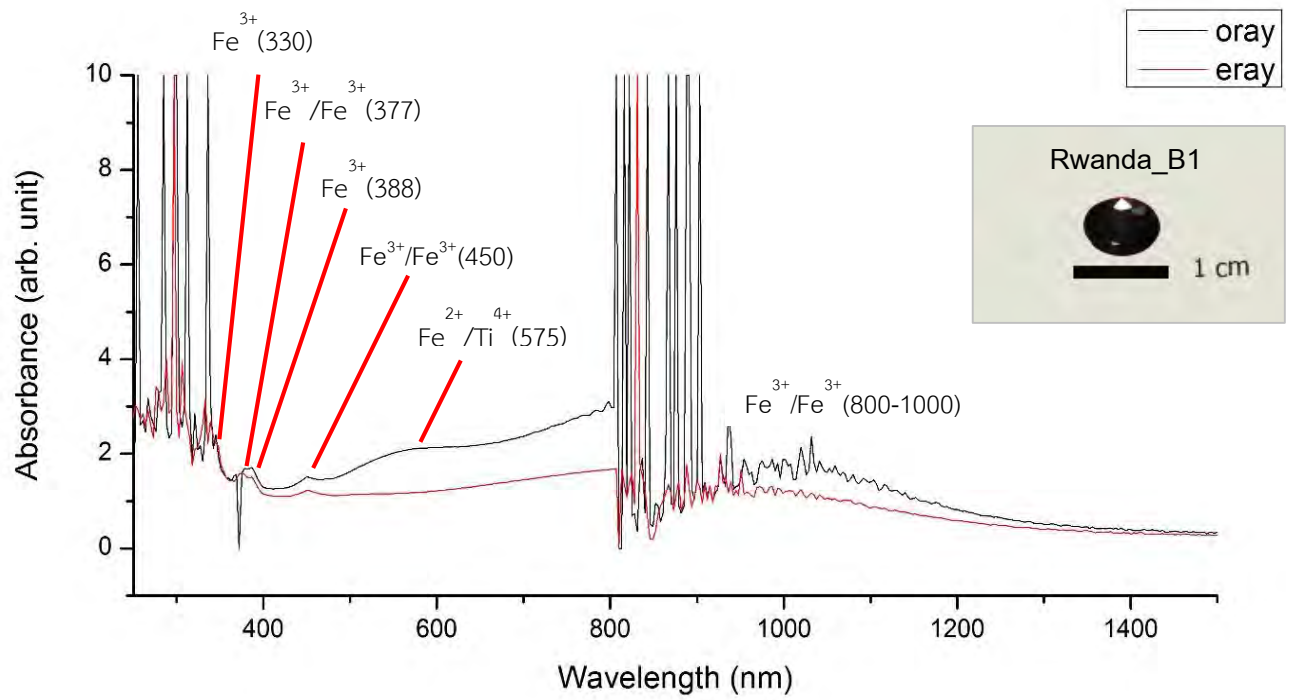


รูป 4.23 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู่ ประเทศรวันดา (Rwanda_B11) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

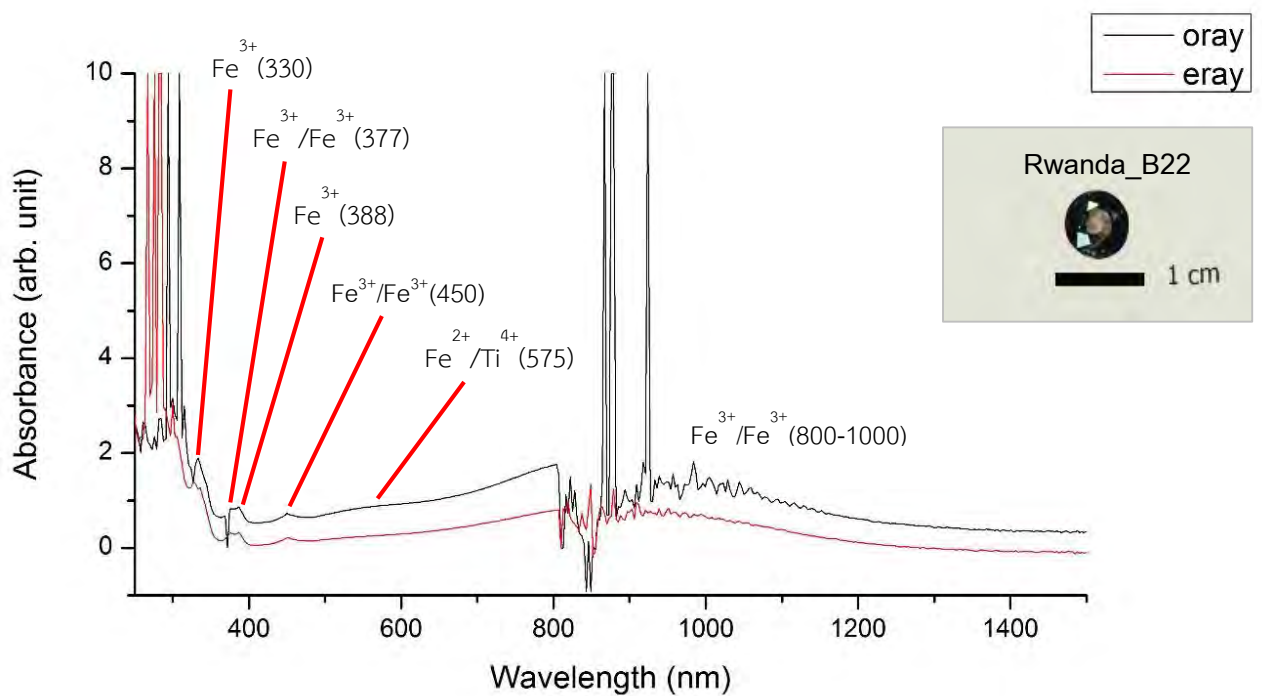
4.4 การดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR

ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-VIS-NIR ของตัวอย่างแชปไฟร์ แหล่งจางกู จากประเทศเวียดนาม ทั้ง 4 กลุ่ม โดยทั่วไปแสดงรูปแบบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันทั้งหมด (ดูรูป 4.24-4.27) แสดงยอดการดูดกลืน Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 330 และ 388 nm, ยอดการดูดกลืนของ Fe^{3+}/Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 377 และ 450 nm และแถบการดูดกลืนในช่วง 800-1000 nm ซึ่งจะแสดงแถบดูดกลืนในช่วงนี้เฉพาะแชปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์ อีกทั้ง การดูดกลืนของ Fe^{3+} มีผลให้แชปไฟร์มีสีเขียว, แถบการดูดกลืนของ Fe^{2+}/Ti^{4+} ที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-600 nm โดยแสดงยอดการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 575 nm โดยการดูดกลืนที่ตำแหน่งนี้มีผลต่อความเข้มของสีน้ำเงินของตัวอย่าง

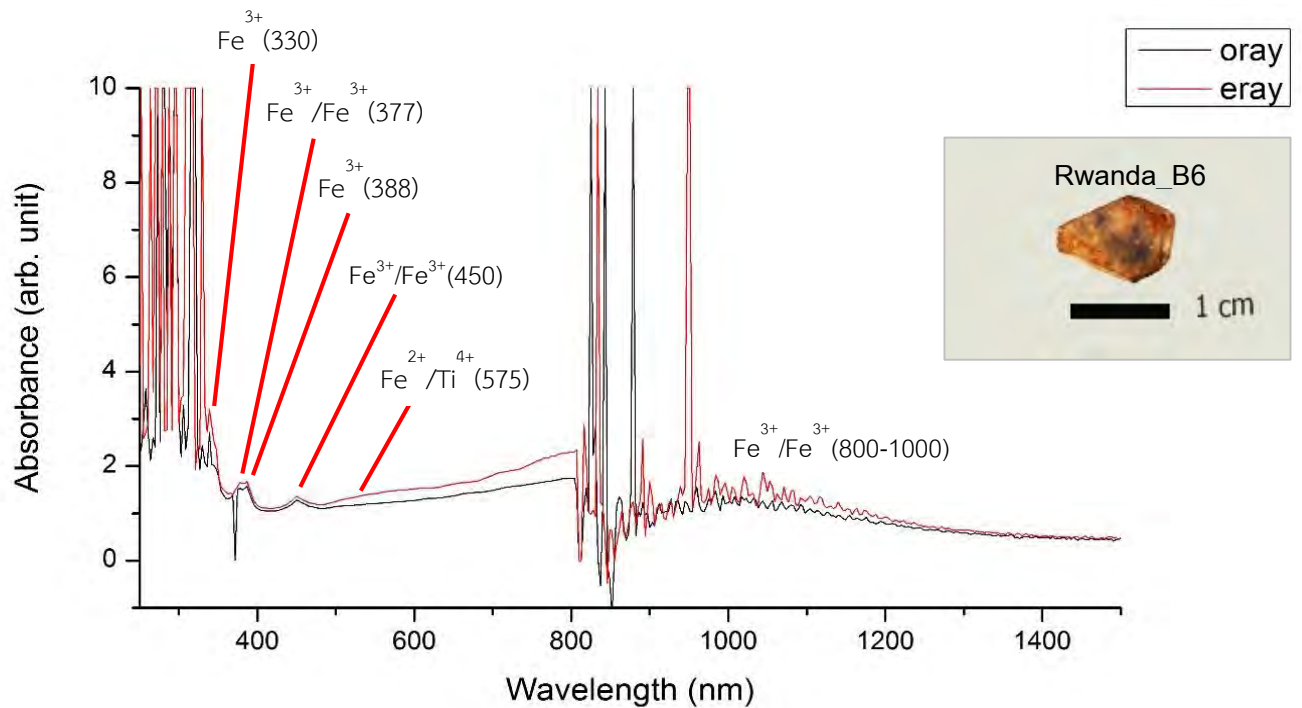
จากผลการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่า ตัวอย่างแชปไฟร์ทุกกลุ่มจากแหล่งจางกู ประเทศเวียดนาม ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสงและกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว แสดงยอดการดูดกลืน Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 330 และ 388 nm, ยอดการดูดกลืนของ Fe^{3+}/Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 377 และ 450 nm และมีแถบการดูดกลืนของ Fe^{3+}/Fe^{3+} ในช่วง 800-1000 nm ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าแชปไฟร์กลุ่มนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์และการดูดกลืนของ Fe^{3+} มีผลให้แชปไฟร์มีสีเขียว ตัวอย่างที่พบจึงมีสีน้ำเงินเข้ม และน้ำเงินปนเขียว นอกจากนี้ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม จะแสดงแถบการดูดกลืนของ Fe^{2+}/Ti^{4+} (มีผลต่อความเข้มของสีน้ำเงิน) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-600 nm โดยมียอดการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 575 nm มากกว่ากลุ่มตัวอย่างอื่นๆ โดยรูปแบบการดูดกลืนคลื่นแสงในแต่ละกลุ่มตัวอย่างแสดงในรูป 4.24- 4.27 ตามลำดับ และรูปแบบการดูดกลืนทั้งหมดรวบรวมในภาคผนวก ค



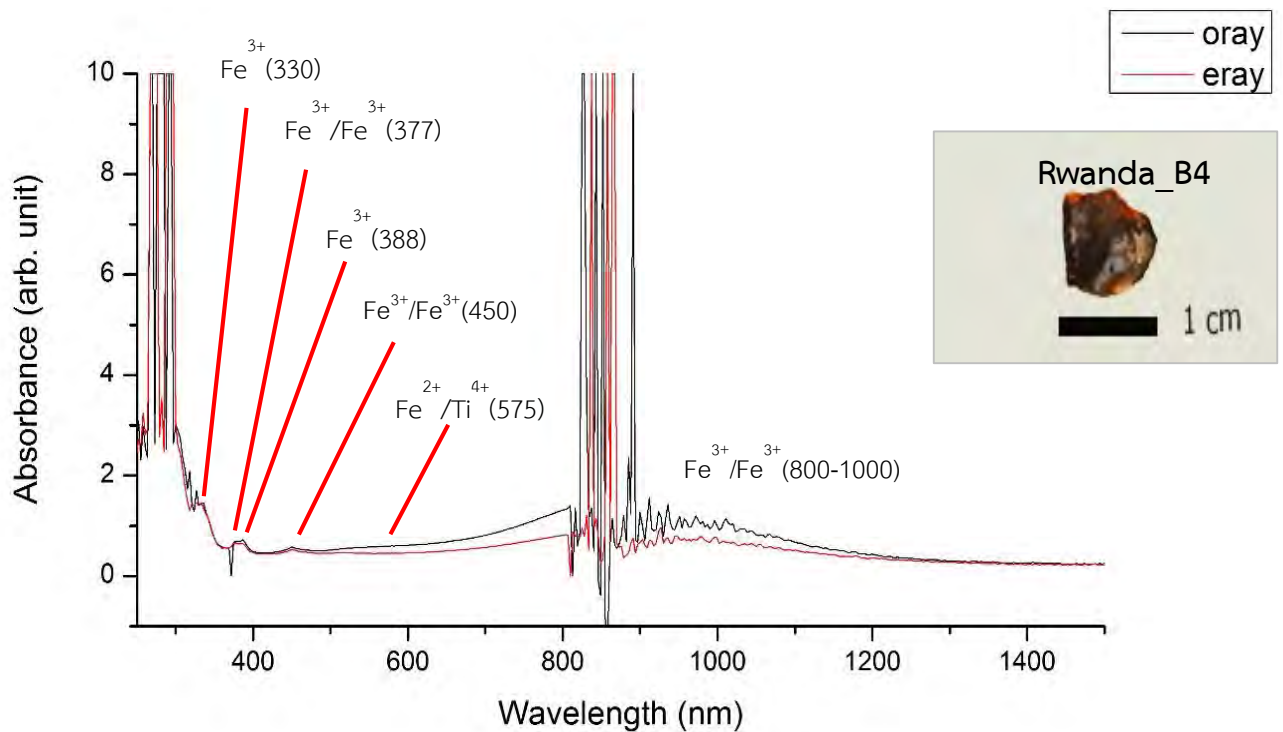
รูป 4.24 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพไลนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B1) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$



รูป 4.25 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพไลนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B2) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$



รูป 4.26 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพไลนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่ง
จางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B6) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ และ
 $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$



รูป 4.27 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพไลนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_B4) แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$

4.5. องค์ประกอบทางเคมี

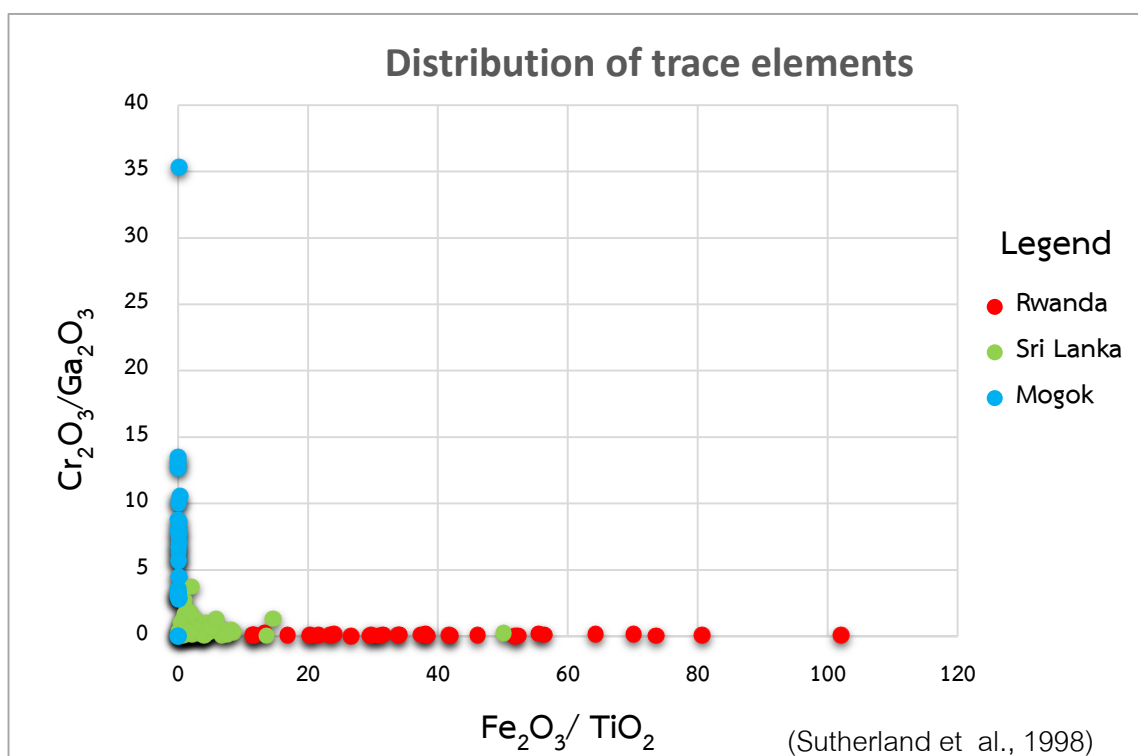
ผลวิเคราะห์โดย EDXRF การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของແປປໄຟຣ໌ ທີ່ມີองค์ประกอบเคมีหลัก Al_2O_3 และองค์ประกอบของธาตุร่องรอยในตัวอย่างหลายชนิด จากการศึกษาได้เลือกวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุร่องรอยในรูปแบบของออกไซด์ที่มักพบบ่อยในແປປໄຟຣ໌ ທີ່บางธาตุเป็นสาเหตุสำคัญในการทำให้เกิดสีที่แตกต่างกัน จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยແປປໄຟຣ໌ ແຫ່ງຈາງ ກູ ປະເທດຣຽນດາ พบว่าประกอบด้วยธาตุองค์ประกอบหลักคือธาตุ Al_2O_3 ธาตุร่องรอยที่มีค่ารองลงมาคือ Fe_2O_3 และ Ga_2O_3 ตามลำดับ ธาตุร่องรอยอื่นๆ คือ TiO_2 , V_2O_5 และ Cr_2O_3 พบในปริมาณน้อยลงมาตามลำดับ โดยคำนวณปริมาณรวมทั้งหมดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt) ดังตาราง 4.5 และรายละเอียดรวบรวมในภาคผนวก ง

ตาราง 4.5 สรุปผลวิเคราะห์ทางเคมีของແປປໄຟຣ໌ ຈາກແຫ່ງຈາງ ກູ ປະເທດຣຽນດາด้วยเครื่อง EDXRF

Elements	High quality		Low quality	
	Dark blue	Light blue	Opaque dark blue	Greenish blue
Al_2O_3	99.42-99.82 (99.62±0.11)	99.63-99.73 (99.68±0.03)	99.50-99.66 (99.58±0.06)	99.44-99.88 (99.66±0.10)
Fe_2O_3	0.14-0.53 (0.34±0.12)	0.23-0.33 (0.28±0.03)	0.28-0.45 (0.37±0.06)	0.26-0.49 (0.38±0.01)
Ga_2O_3	0.02-0.04 (0.03±0.005)	0.02-0.05 (0.04±0.01)	0.03-0.04 (0.04±0.005)	0.03-0.04 (0.04±0.003)
TiO_2	0.00-0.03 (0.15±0.002)	0.00-0.01 (0.01±0.003)	0.01-0.03 (0.02±0.01)	0.01-0.02 (0.02±0.008)
V_2O_5	0.00-0.01 (0.01±0.002)	0.00-0.01 (0.01±0.002)	0.00-0.01 (0.01±0.001)	0.00-0.01 (0.01±0.003)
Cr_2O_3	0.00-0.01 (0.01±0.002)	0.00-0.01 (0.01±0.001)	0.00-0.01 (0.01±0.001)	0.00-0.01 (0.01±0.001)

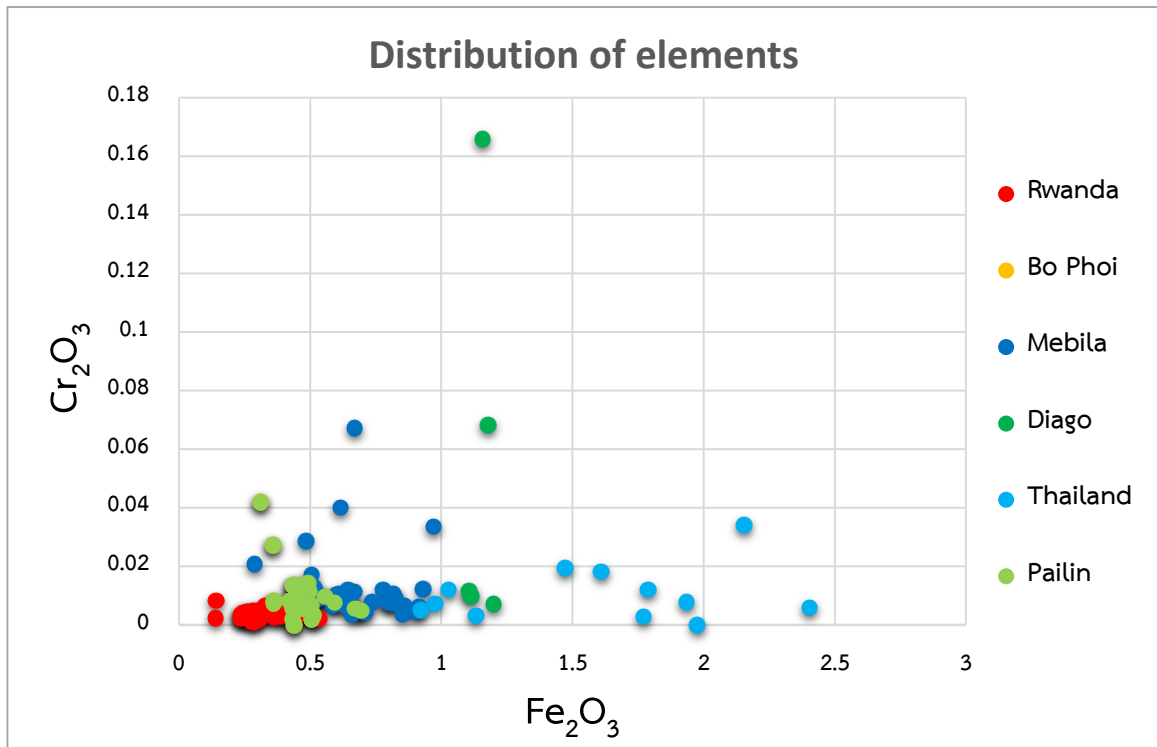
ตัวอย่างแชปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดาที่นำมาวิเคราะห์ มีมีตั้งแต่สีน้ำเงินเข้ม สีน้ำเงินอ่อน ไปจนถึงสีน้ำเงินอมเขียว และที่บดแสง พบว่าแหล่งจางกู ประเทศรวันดา เป็นแหล่งที่มีปริมาณโครเมียม ไทเทเนียมและวานเดียมต่ำ มีปริมาณเหล็กและแกดเลียมค่อนข้างสูง สีส่วนใหญ่จึงมีสีน้ำเงินอมเขียว

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดแชปไฟร์พบว่า ตัวอย่างแชปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ มีปริมาณเหล็กสูง และโครเมียมต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง แชปไฟร์ที่มาจากแหล่งกำเนิดหินแปร (Sutherland et al., 1998) จึงสามารถใช้ปริมาณของเหล็กและโครเมียมในการแยกแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์กับแหล่งกำเนิดหินแปรได้ (รูป 4.28 และ 4.29)



รูป 4.28 ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของแชปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ และแชปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินแปร (ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF)

จากภาพ พบว่า แชปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (แหล่งกำเนิดหินบะซอลต์) มีค่าเหล็กสูงมากและโครเมียมต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับแชปไฟร์จากแหล่งโมกก ประเทศพม่า และแชปไฟร์ไม่รู้แหล่ง จากประเทศศรีลังกา ซึ่งมาจากแหล่งกำเนิดหินแปร



รูป 4.29 ความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีของเซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ (ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF)

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของแหล่งกำเนิดระหว่างเหล็กและโครเมียม จะเห็นได้ว่าแหล่งจางกู ประเทศรวันดา มีปริมาณเหล็กและโครเมียมน้อยที่สุด (รูป 4.28) ในขณะที่แหล่งกำเนิดหิน บะซอลต์อื่นๆ จะมีปริมาณเหล็กและโครเมียมสูงกว่าอย่างชัดเจน จึงสามารถใช้เหล็กและโครเมียมในการแยกแหล่งจางกู ประเทศรวันดาออกจากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์อื่นๆ

ผลวิเคราะห์โดย EPMA องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยเซปไฟร์แหล่งจางกู ประเทศรวันดากลุ่มคุณภาพต่ำ (low quality) ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) พบว่าธาตุองค์ประกอบหลักคือ Al_2O_3 ส่วนธาตุรองรอยที่มีค่ารองลงมาคือธาตุ Fe_2O_3 , Ga_2O_3 และ TiO_2 ส่วนธาตุรองรอยอื่นๆ พบในปริมาณน้อยมาก ซึ่งผลวิเคราะห์ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับผลวิเคราะห์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF โดยผลวิเคราะห์ที่ได้สรุปในตาราง 4.6 และรายละเอียดรวบรวมในภาคผนวก จ

ตาราง 4.6 แสดงผลวิเคราะห์ทางเคมีของแหล่งจางกุกู ประเทศเวียดนามด้วยเครื่อง EPMA

Mass percent		
Elements	Low Quality	
	Opaque-Dark blue	Greenish blue
Al ₂ O ₃	99.63-99.78 (98.98±0.78)	93.54-99.71 (98.64±2.09)
FeO	0.33-0.52 (0.44±0.06)	0.20-0.43 (0.39±0.06)
Ga ₂ O ₃	0.03-0.18 (0.05±0.05)	0.00-0.10 (0.04±0.03)
TiO ₂	0.00-0.05 (0.03±0.02)	0.00-0.06 (0.02±0.02)
V ₂ O ₅	0-0.03 (0.01±0.01)	0.00-0.02 (0.01±0.01)
Cr ₂ O ₃	0.00-0.04 (0.01±0.01)	0.00-0.01 (0.01±0.00)
MnO	0.00-0.01 (0.01±0.00)	0.00-0.03 (0.01±0.00)
K ₂ O	0.00-0.01 (0.00)	0.00-0.01 (0.00)
MgO	0.000-0.004 (0.00)	0.00-0.005 (0.00)
CaO	0.00-0.02 (0.00)	0.00-0.01 (0.00)

ผลวิเคราะห์โดย LA-ICP-MS มีความแตกต่างออกไปจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF และ EPMA โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS เป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ สามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีปริมาณน้อยมากหรือธาตุร่องรอยได้ในระดับหนึ่งส่วนในล้านส่วน (ppm, part per million) ซึ่งแตกต่างจากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDXRF และ EPMA ที่ได้ค่าออกมาเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) แต่ด้วยเทคนิคของวิธีนี้ ตัวอย่างที่ใช้ อาจจะต้องมีการทำลายตัวอย่างบางส่วน

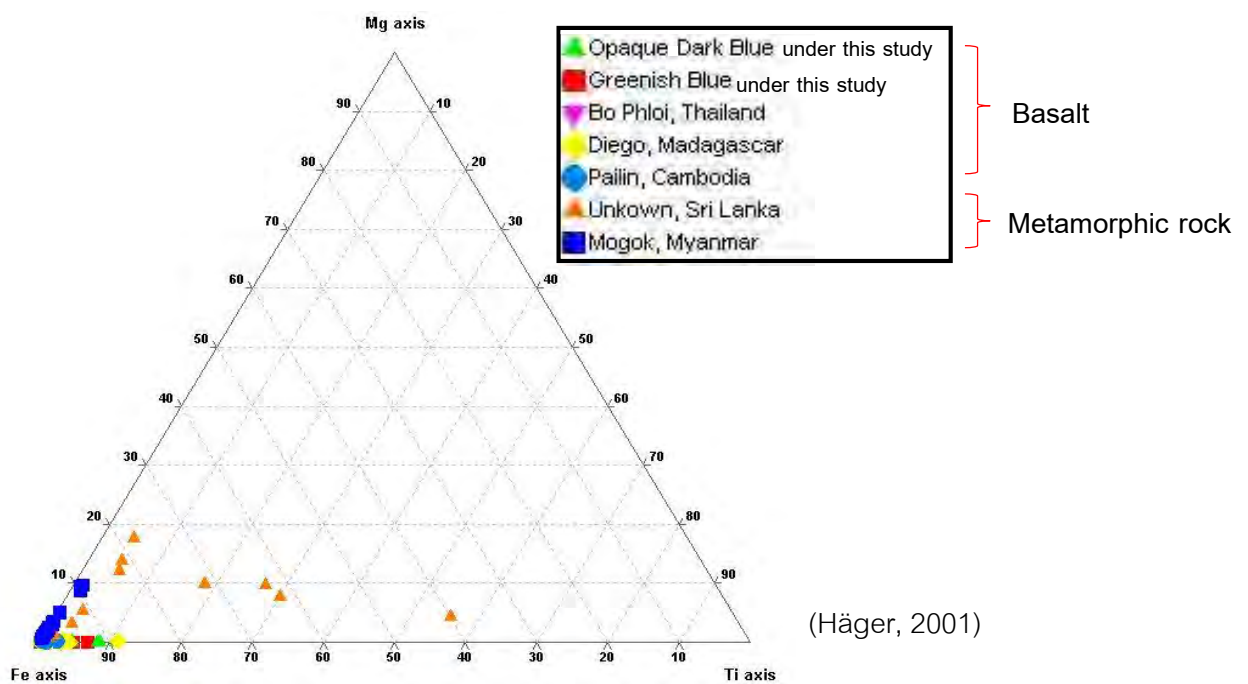
การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของธาตุร่องรอยเพื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุในแต่ละแหล่งของการเกิดแชปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ ซึ่งมีปริมาณเหล็กสูงกว่ากลุ่มของแชปไฟร์ที่มาจากแหล่งกำเนิดหินแปร การศึกษาลักษณะเฉพาะของแชปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศเวียดนาม เป็นการศึกษเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแชปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดจากหินบะซอลต์และแหล่งกำเนิดจากหินแปรด้วยเครื่อง Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ (ตาราง 4.7) หาความสัมพันธ์ของแต่ละแหล่ง เพื่อใช้ข้อมูลที่ได้ในการจำแนกแหล่งกำเนิดของแชปไฟร์ต่อไป โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ผลวิเคราะห์จากธาตุ เหล็ก แมกนีเซียมและไทเทเนียม ในการวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างของแชปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ และแชปไฟร์ที่มีแหล่งกำเนิดหินแปร ดังภาพ 4.30 และรายละเอียดรวบรวมในภาคผนวก ข

ตาราง 4.7 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศเวียดนาม

Element	Opaque dark blue	Greenish blue
Fe (ppm)	2418.38-6409.45 (4174.62±1059.80)	2495.88-3815.79 (3090.99±407.90)
Ca (ppm)	819.05-1433.69 (1069.14±172.75)	608.02-1724.86 (1099.11±253.74)
Ga(ppm)	126.57-545.25 (181.58±85.12)	120.90-194.08 (151.83±19.23)
Ti (ppm)	7.62-444.97 (126.36±127.24)	6.03-244.74 (57.51±63.67)
Cr (ppm)	6.59-39.05 (11.73±9.04)	5.13-10.49 (8.26±1.13)
V (ppm)	1.53-16.9 (4.46±3.90)	0.99-3.74 (2.06±0.86)
Mn (ppm)	1.64-2.62 (2.05±0.28)	1.33-5.17 (2.34±0.82)
Mg (ppm)	0.53-10.00 (2.05±1.94)	0.66-7.45 (1.43±1.49)
Sn (ppm)	0.85-3.97 (1.57±0.92)	0.94-1.45 (1.17±0.17)
Co (ppm)	0.32-0.60 (0.45±0.07)	608.02-1724.86 (0.51±0.08)
Th (ppm)	0.09-6.65 (0.68±1.71)	0.10-0.20 (0.15±0.03)
U (ppm)	0.15-2.30 (0.10±0.02)	0.07-0.14 (0.12±0.02)

จากผลการวิเคราะห์ ตาราง 4.7 ของตัวอย่างแชปไฟร์ของกลุ่มคุณภาพต่ำ (low quality) ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินทึบแสง (opaque dark blue) และกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว (greenish-blue) แหล่งจางกู ประเทศเวียดนาม พบว่ามีปริมาณเหล็กและแคลเซียมสูง มีปริมาณแกลเลียมและไทเทเนียมปานกลาง และมีปริมาณโครเมียม วาเนเดียม แมงกานีสและแมกนีเซียมต่ำ ส่วนธาตุร่องรอยตัวอื่นๆ พบในตัวปริมาณน้อยมาก

จากการศึกษาปริมาณธาตุร่องรอยของแชปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์และแหล่งกำเนิดหินแปร (รูป 4.30) พบว่าสามารถแยกแชปไฟร์ที่มีจากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ออกจากแชปไฟร์ที่มาจากแหล่งกำเนิดหินแปรได้อย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณธาตุร่องรอยของแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ เช่น เหล็ก มีค่าสูงกว่าแหล่งกำเนิดหินแปร ในขณะที่ปริมาณธาตุร่องรอยของแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ เช่น แมกนีเซียมและไทเทเนียม มีค่าต่ำกว่าแหล่งกำเนิดหินแปร จึงสามารถใช้ปริมาณของธาตุร่องรอยในการแยกแหล่งกำเนิดของแชปไฟร์ได้



รูปที่ 4.30 สัดส่วนขององค์ประกอบธาตุร่องรอย แสดงการกระจายตัวของเหล็ก ไทเทเนียม และแมกนีเซียม

4.6 อภิปรายและสรุปผล

จากตัวอย่างทั้งหมด 31 ตัวอย่างในพื้นที่ศึกษาแหล่งจางกุก ประเทศเวียดนาม ทวีปแอฟริกา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. กลุ่มคุณภาพดี (High Quality) ได้แก่ กลุ่ม Dark Blue 11 ตัวอย่าง และกลุ่ม Light Blue 7 ตัวอย่าง มีลักษณะสีน้ำเงิน โปร่งใสถึงกึ่งโปร่งใส มีรอยแตกน้อย
2. กลุ่มคุณภาพต่ำ (Low Quality) ได้แก่ กลุ่ม Opaque 7 ตัวอย่าง และกลุ่ม Greenish Blue 6 ตัวอย่าง มีลักษณะสีน้ำเงินทึบแสงถึงกึ่งโปร่งแสง มีรอยแตกมาก อาจมีสีสนิมเหล็กปนอยู่บ้าง

ตัวอย่างพลอยมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางแสงอยู่ในช่วงปกติของคอรัันดัมทั่วไปคือ ค่าความถ่วงจำเพาะ อยู่ในช่วง 3.94-3.98 ค่าดัชนีหักเหของลำแสงปกติ 1.770-1.772 และตัวอย่างพลอยทั้งหมด ไม่แสดงการเรืองแสงภายใต้รังสีอัลตราไวโอเล็ตช่วงคลื่นยาว (longwave ultraviolet) และช่วงคลื่นสั้น (shortwave ultraviolet)

มลทินเนื้อในที่พบมากในตัวอย่างแซปไฟร์แหล่งจางกุก ประเทศเวียดนาม ได้แก่ มลทินผลึกแร่ (crystal) ซึ่งพบบ่อยในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพต่ำ ได้แก่ ผลึกแร่เฟลสปาร์ (feldspar) เนฟิลีน (nepheline) สปิเนล (spinel) เซอร์คอน (zircon) และเฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) นอกจากนี้ ยังพบมลทินรอยนิ้วมือ (fingerprint) ระบบผลึกแฝด (twining) แถบสี (color zoning) ซึ่งพบมากกว่าในกลุ่มตัวอย่างคุณภาพดี

การดูดกลืนคลื่นแสง โดยเครื่อง FTIR แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าแซปไฟร์จากแหล่งจางกุก ประเทศเวียดนามมีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์ สำหรับการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis-NIR แสดงยอดการดูดกลืน Fe^{3+} ที่ความยาวคลื่น 330 และ 388 nm ยอดการดูดกลืนของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ความยาวคลื่น 377 และ 450 nm และมีแถบการดูดกลืนของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ในช่วง 800-1000 nm ในตัวอย่างแซปไฟร์ทุกกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน กลุ่มทึบแสงและกลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าแซปไฟร์กลุ่มนี้มีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์และการดูดกลืนของ Fe^{3+} มีผลให้แซปไฟร์มีสีเขียว ตัวอย่างที่พบจึงมีสีน้ำเงินเข้ม และน้ำเงินปนเขียว นอกจากนี้ กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม

จะแสดงแถบการดูดกลืนของ Fe^{2+}/Ti^4 (มีผลต่อความเข้มของสีน้ำเงิน) ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 500-600 nm โดยมียอดการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 575 nm มากกว่ากลุ่มตัวอย่างอื่นๆ

ผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างจากแซปไฟร์แหล่งจางกุก ประเทศเวียดนามทั้ง 4 กลุ่ม พบว่าธาตุองค์ประกอบหลักคือ ธาตุ Al_2O_3 ส่วนธาตุร่องรอยที่มีค่ารองลงมาคือ ธาตุ Fe_2O_3 และ Ga_2O_3 ตามลำดับ ส่วนธาตุร่องรอยอื่นๆ ได้แก่ TiO_2 , V_2O_5 และ Cr_2O_3 พบในปริมาณน้อยลงมาตามลำดับ

จะเห็นได้ว่าแซปไฟร์จากแหล่งจางกุก ประเทศเวียดนาม มีแหล่งกำเนิดมาจากหินบะซอลต์ เนื่องจากพบแถบการดูดกลืนของ Fe^{3+}/Fe^{3+} ในช่วงความยาวคลื่น 800-1000 nm (ผลวิเคราะห์ UV-VIS-NIR) และพบมลทินเนื้อในที่สามารถพบได้ทั่วไปในแซปไฟร์จากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์ ได้แก่ มลทินผลึกแร่เฟลสปาร์ (fledspar) เนฟีลีน (nepheline) สปิเนล (spinel) เซอร์คอน (zircon) และเฟอร์โรโคลัมไบต์ (ferrocolumbite) นอกจากนี้ แซปไฟร์จากแหล่งจางกุก ประเทศเวียดนาม ยังมีลักษณะเฉพาะทางเคมี คือมีธาตุเหล็ก โครเมียมและไทเทเนียมต่ำกว่าแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์อื่นๆ

จากผลวิเคราะห์ทางกายภาพ ทางแสงและองค์ประกอบทางเคมีที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าลักษณะเฉพาะของอัญมณีในแต่ละแหล่งอาจจะสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกแหล่งที่มาของอัญมณีที่ไม่ทราบแหล่งกำเนิดแน่ชัดได้

เอกสารอ้างอิง

- จักรพันธ์ สุทธิรัตน์และคณะ. 31 มกราคม 2557. “รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์: โครงการศึกษา
ลักษณะเฉพาะของทับทิมและไพลินจากแหล่งกำเนิดหินบะซอลต์.” กรุงเทพมหานคร:
สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน).
- พงษ์ศักดิ์ วิจิต, กำเนิดพลอย ทับทิม-แซปไฟร์ในหินบะซอลต์. ข่าวสารการธรณี. พฤษภาคม 2520,
ปีที่ 22, ฉบับที่ 5, หน้า 83-95.
- รัก หรรษาเวกและกฤตยา ปัทมาลัย, ศักยภาพแหล่งพลอยแซปไฟร์และทับทิมของไทย: เอกสาร
ประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซป
ไฟร์”, 21 กันยายน 2548, กรมทรัพยากรธรณี, กรุงเทพฯ, หน้า 125-140.
- สุพร อินทโสภา, 2544, การกำเนิดพลอยทับทิมและแซปไฟร์: เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง
“พลอยมาดากัสการ์: นวัตกรรมใหม่ ของผู้ประกอบการไทย”, 15 กุมภาพันธ์ 2544, กรม
ทรัพยากรธรณีวิทยา, กรุงเทพฯ, หน้า 23-32.
- Coenraad, R.R., 1992a, Surface features on natural rubies and sapphires derived from
volcanic provinces: Journal of Gemmology, v.23, no.2, p.151-160.
- Guo, J., Wang, F., and Yakoumelos, G., 1992, Sapphires from Change in Shandong
province, China: Gems&Gemology, v.28, no.4, p.255-260.
- Khamloet, P., Pisutha-Arnond, V., and Sutthirat, C., 2014, Mineral inclusions in sapphire
from the basalt-related deposit in Bo Phloi, Kanchanaburi, western Thailand:
indication of their genesis: Russian Geology and Geophysics, v.55, p.1087-
1102.
- Krzemnicki, M.S., Hanni, H.A., Guggenheim, R., and Mathys, D., 1996, Investigation on
sapphires from an alkali basalt, South West Rwanda: Gemmological Association
and Gem Testing Laboratory of Great Britain, v.25, no.2, p.90-106.
- Levinson, A.A., and Cook, F.A., 1994, Gem corundum in alkali basalt: origin and
occurrence: Gems&Gemology, v.30, no.4, p.253-262.
- Sutherland, F.L., Schwarz, D., Jobbins, E.A., Coenraads, R.R., and Webb, G., 1998,
Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: a comparative
study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields:
Journal of Gemmology, v.26, no.2, p.65-85.

ภาคผนวก ก

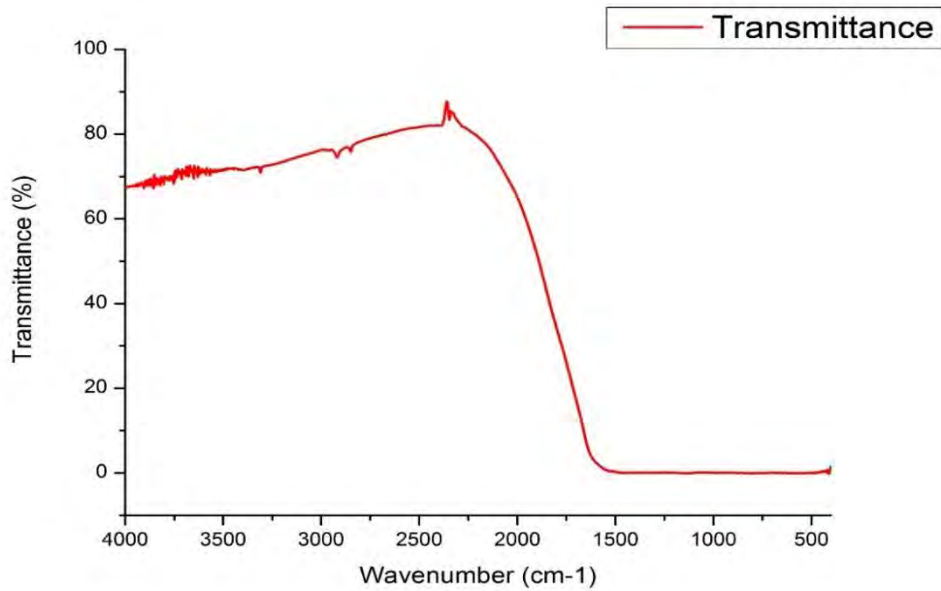
สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางอัญมณีของตัวอย่างแซปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

Group	Sample	Carat	SG	RI		Birefringence	Fluorescence	
		(ct)	(g/cm ³)	no	ne		LW	SW
Opaque	B-5	2.011	3.973	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-6	3.772	3.921	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-7	1.207	3.942	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-8	1.216	3.926	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-10	0.744	3.955	1.770	1.765	0.005	inert	inert
	B-12	1.358	3.971	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-13	1.894	3.881	1.770	1.762	0.008	inert	inert
Greenish blue	B-1	0.807	3.960	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-2	2.808	3.967	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-3	4.128	3.923	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-4	3.857	3.956	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-11	2.461	3.970	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-14	2.226	3.928	1.770	1.760	0.010	inert	inert
Dark blue	B-15	1.976	3.987	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-16	1.821	3.929	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-17	1.271	3.992	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	B-20	1.621	3.996	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	B-23	1.584	3.974	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-24	1.795	3.990	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-26	1.335	3.981	1.770	1.761	0.009	inert	inert
	B-27	1.262	3.982	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-28	1.171	3.979	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-30	1.311	3.981	1.768	1.762	0.006	inert	inert
	B-31	1.022	4.006	1.770	1.762	0.008	inert	inert
Light blue	B-18	1.833	3.986	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-19	0.943	3.990	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-21	1.278	3.984	1.770	1.762	0.008	inert	inert
	B-22	1.311	3.999	1.770	1.765	0.005	inert	inert
	B-25	1.373	3.962	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-29	1.076	3.947	1.770	1.760	0.010	inert	inert
	B-32	1.328	4.020	1.770	1.762	0.008	inert	inert

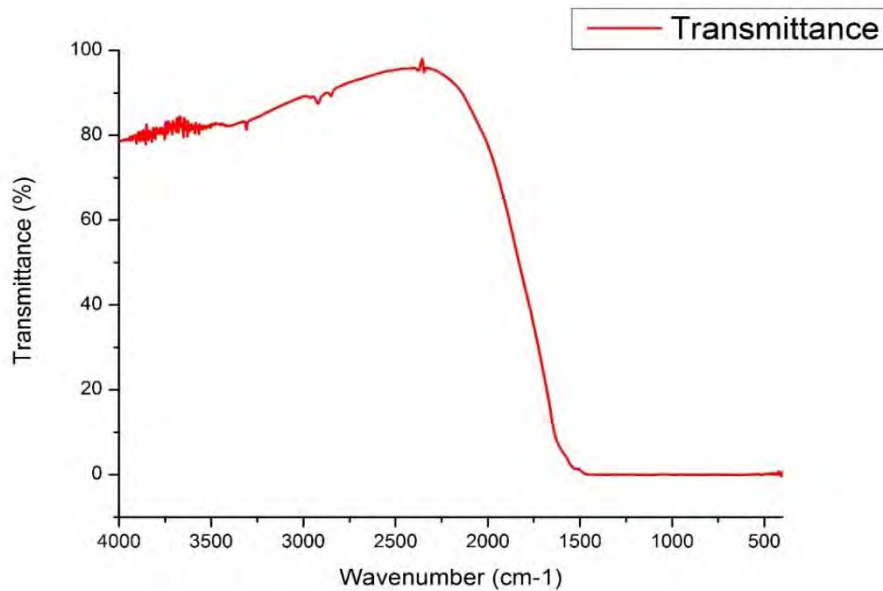
ภาคผนวก ข

ข้อมูลการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอินฟราเรด

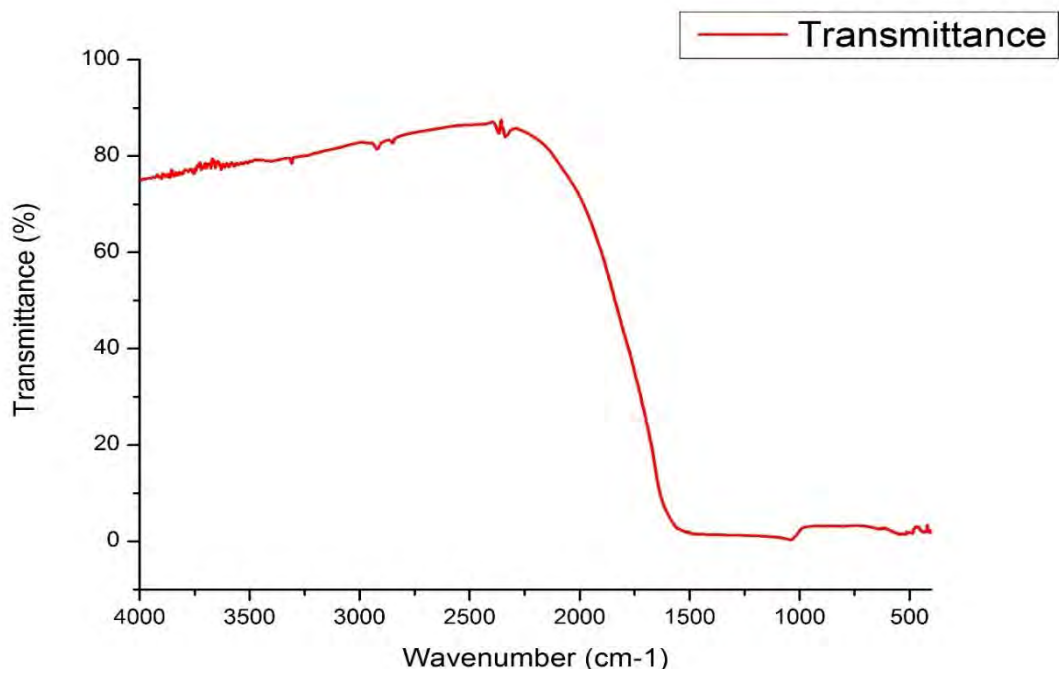
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินเข้ม (dark blue) จำนวน 11 ตัวอย่าง



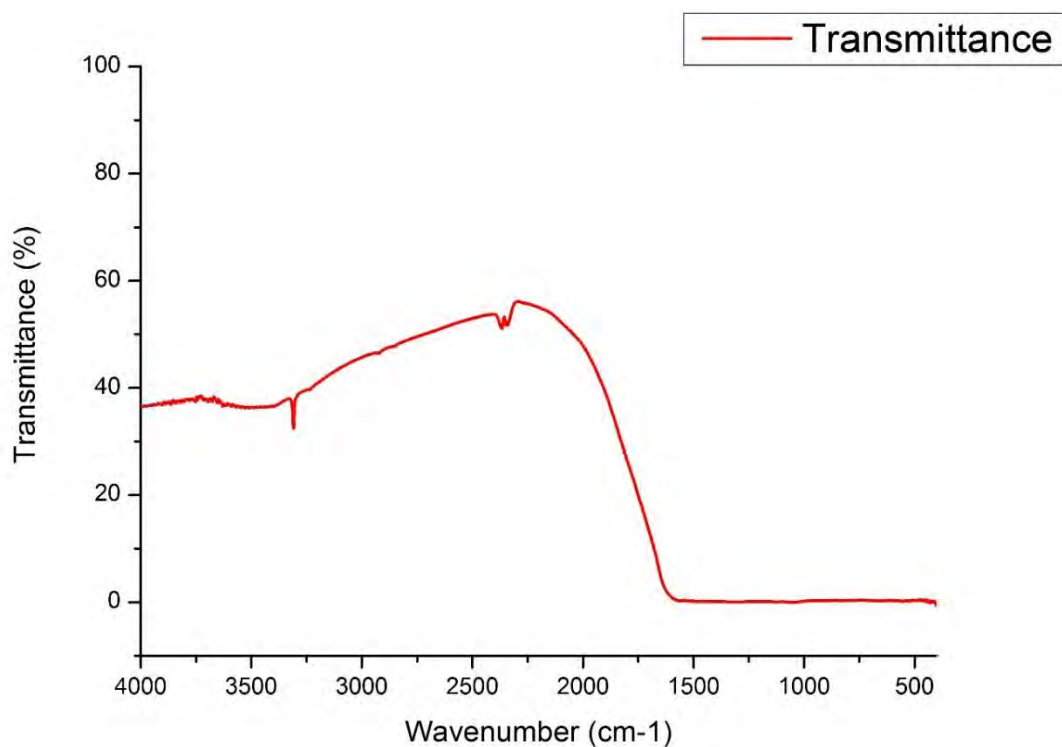
รูป ข.1 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูฏ ประเทศรวันดา (Rwanda_B15) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



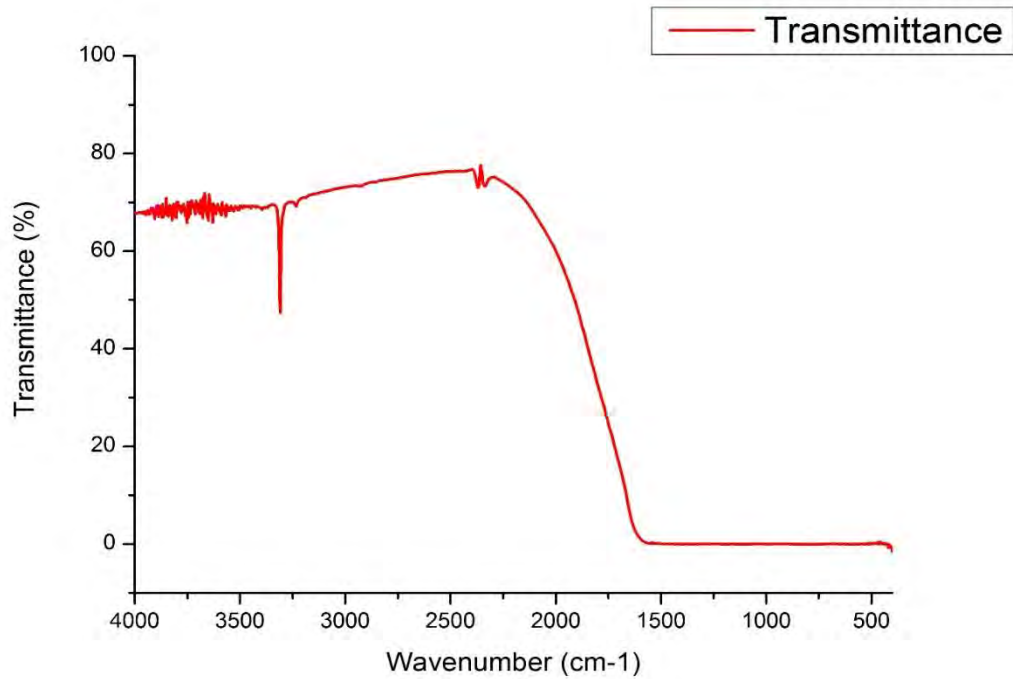
รูป ข.2 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูฏ ประเทศรวันดา (Rwanda_B16) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



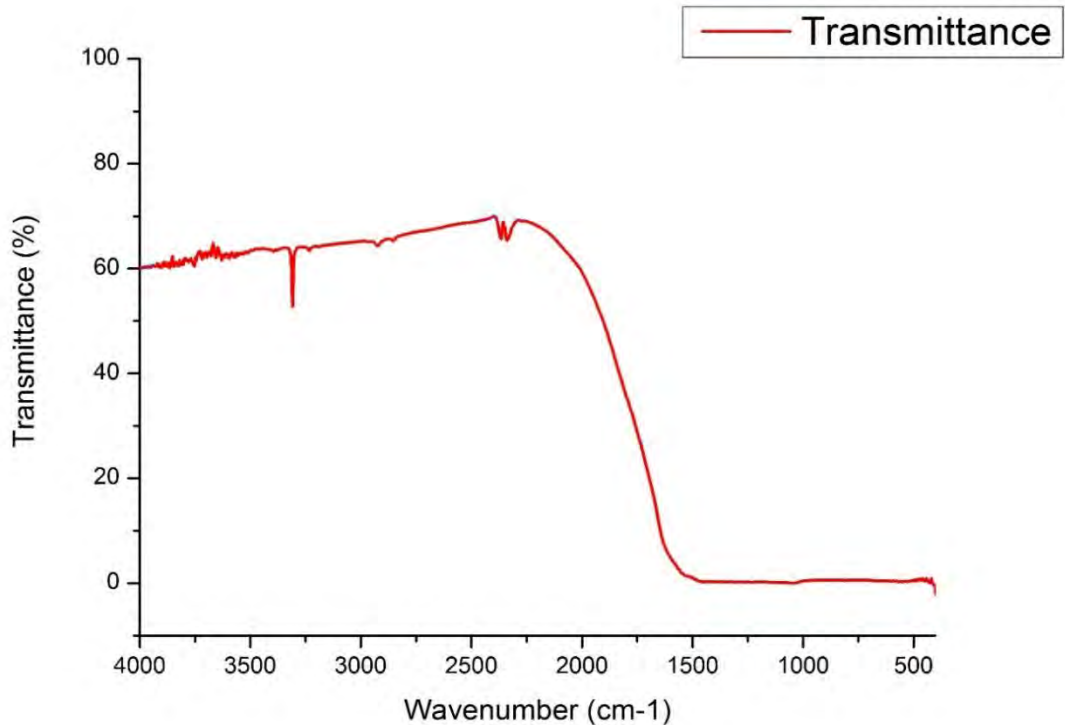
รูป ข.3 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B17) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



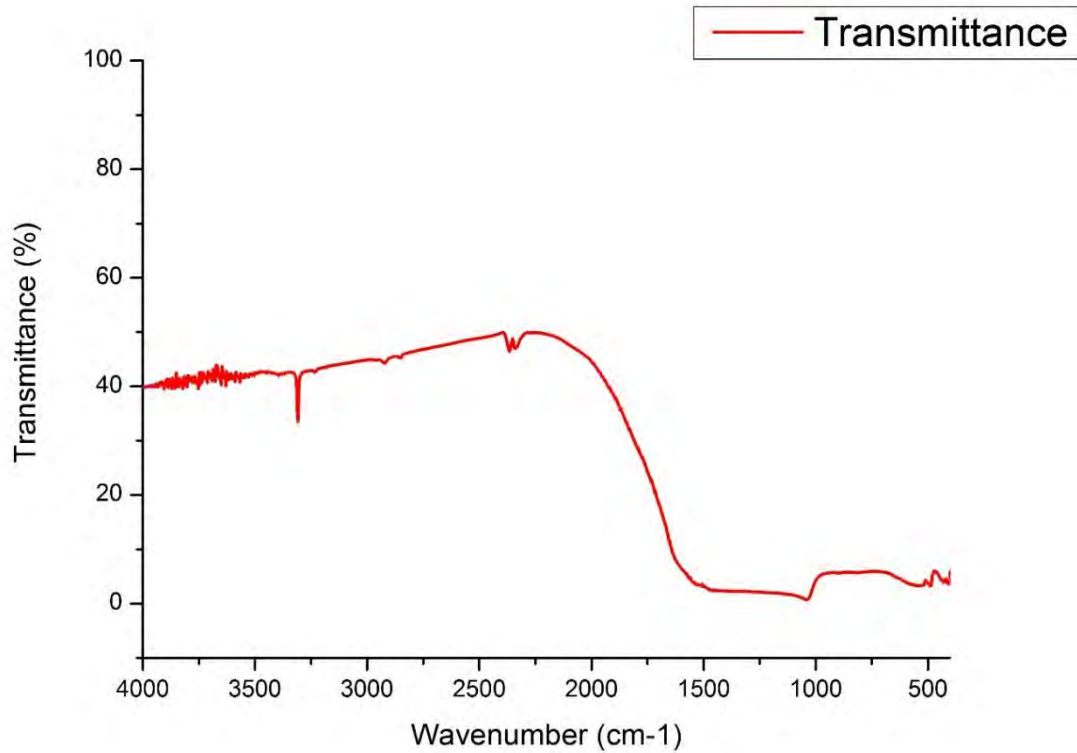
รูป ข.4 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B20) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



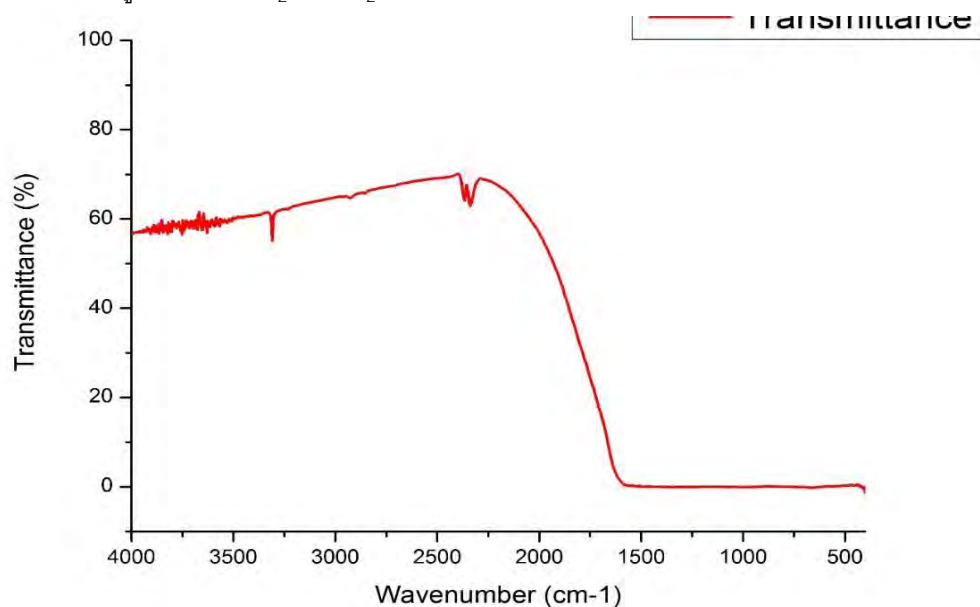
รูป ข.5 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B23) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



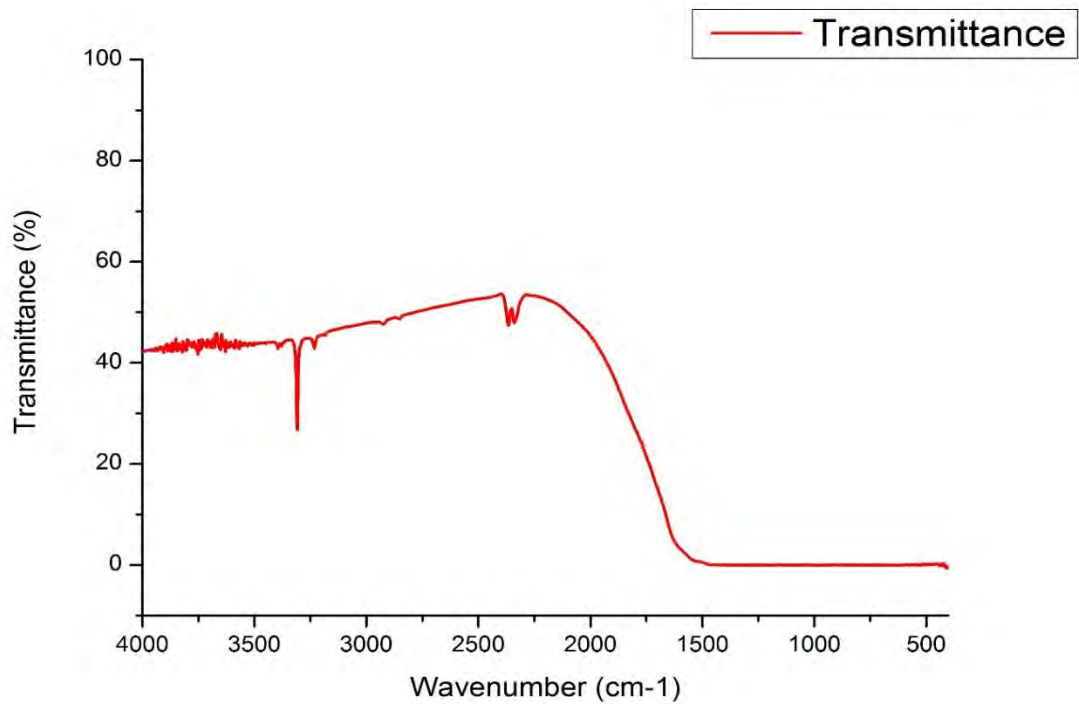
รูป ข.6 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B24) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



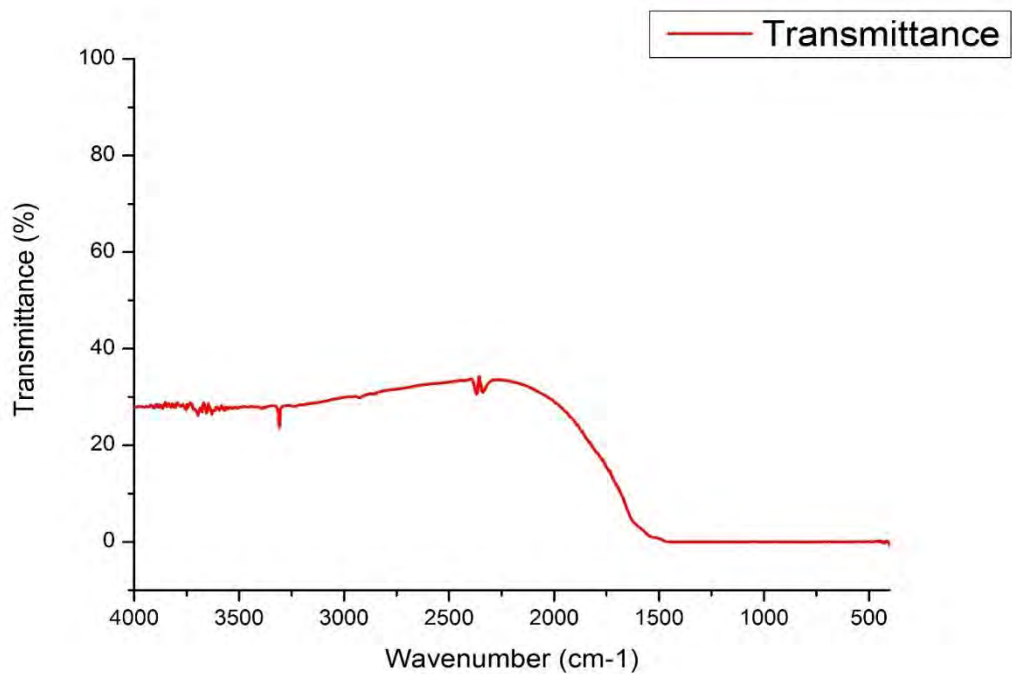
รูป ข.7 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B26) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



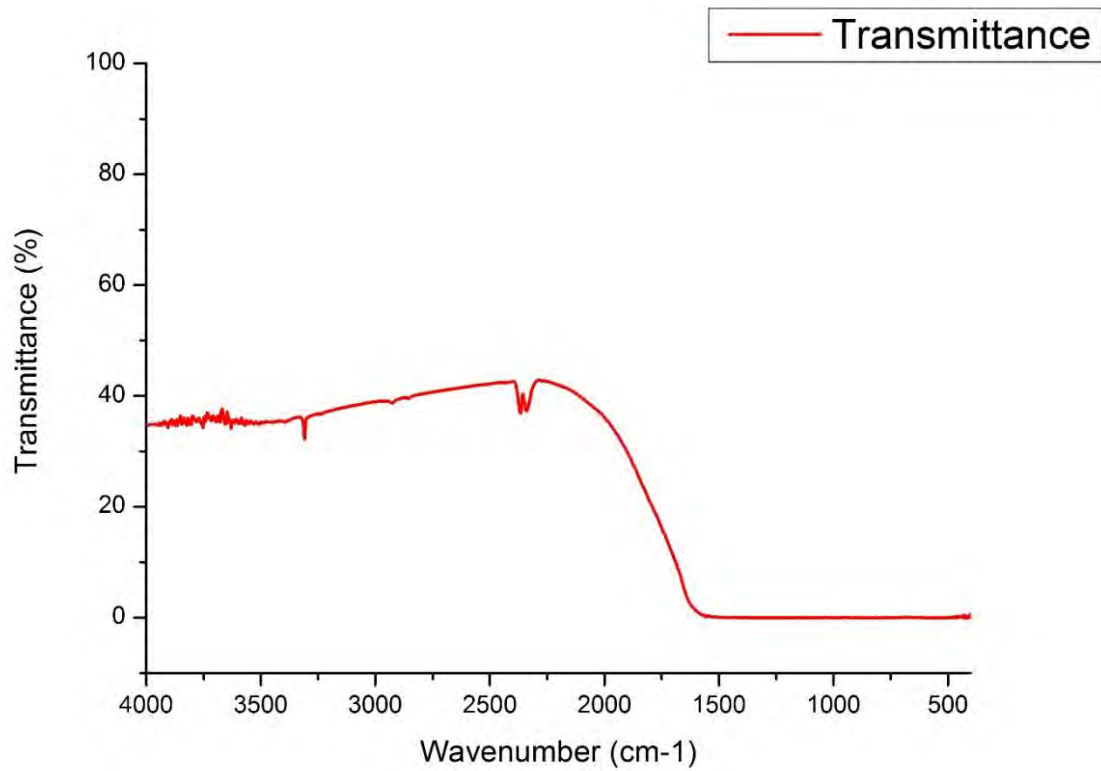
รูป ข.8 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B27) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



รูป ข.9 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B28) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

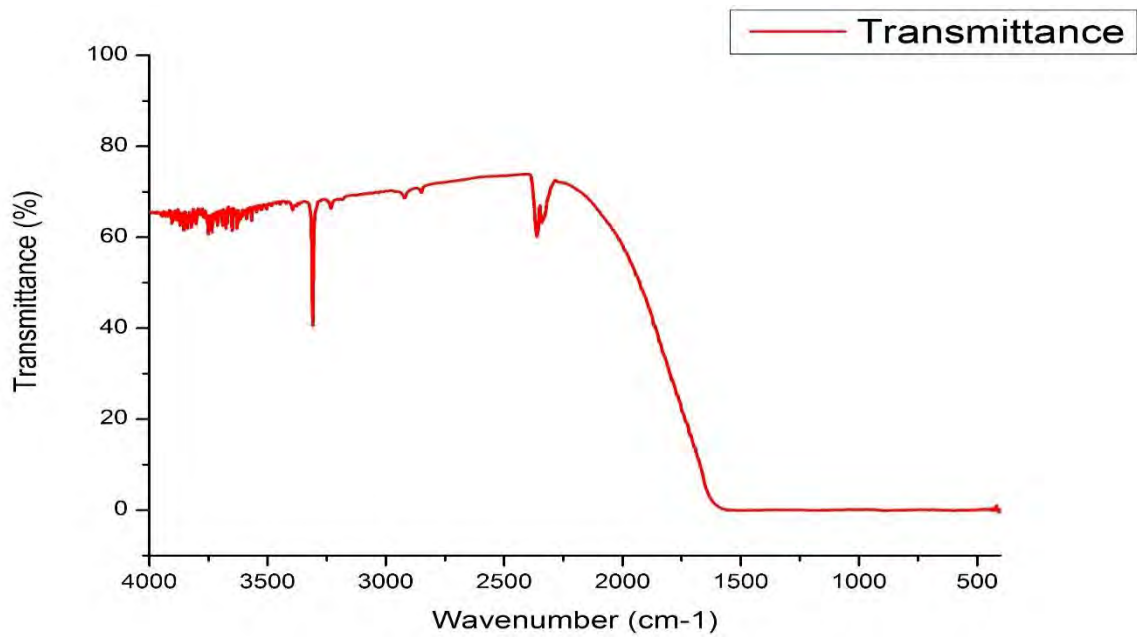


รูป ข.10 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B30) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

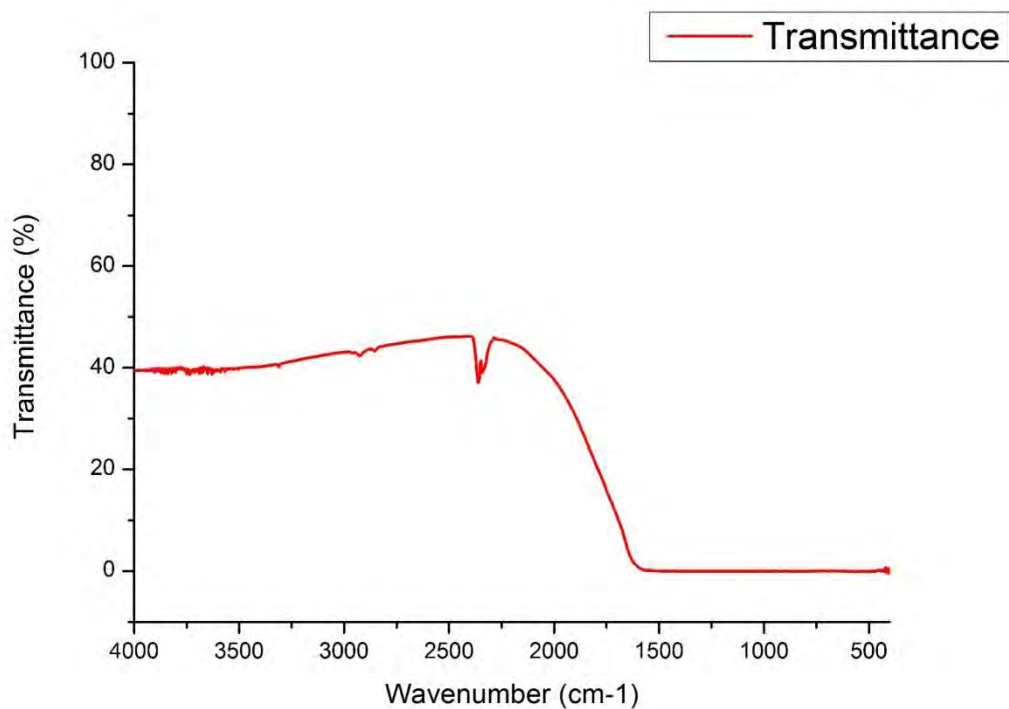


รูป ข.11 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีเอทิลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B31) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

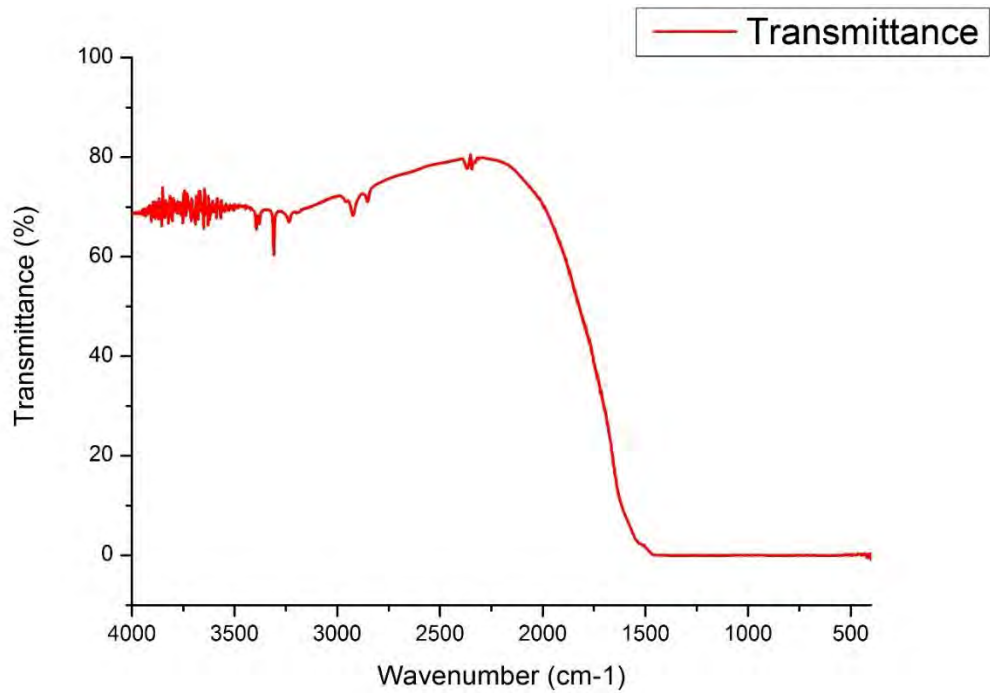
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินอ่อน (light blue) จำนวน 7 ตัวอย่าง



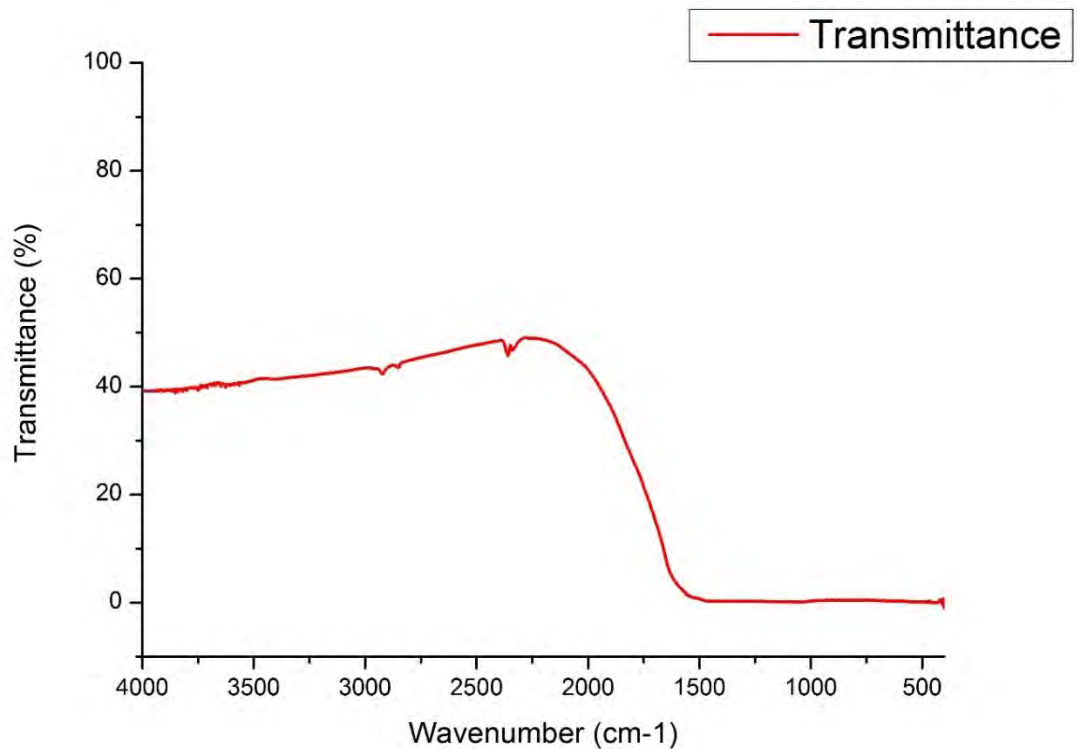
รูป ข.18 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B18) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



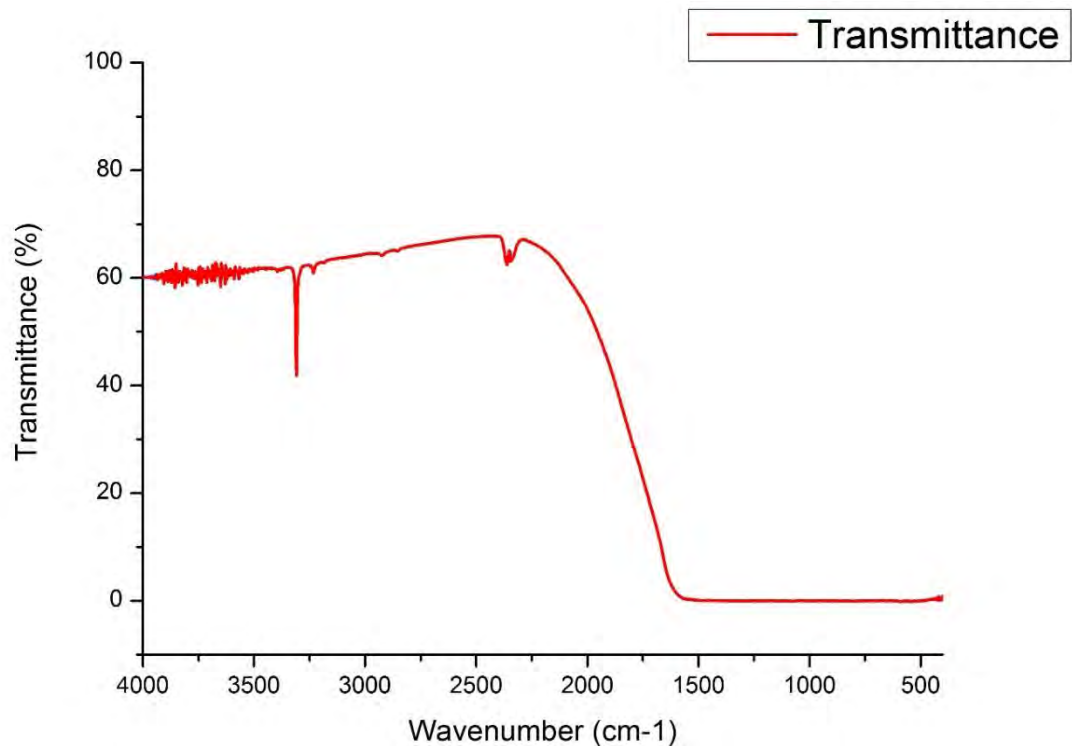
รูป ข.19 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B19) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



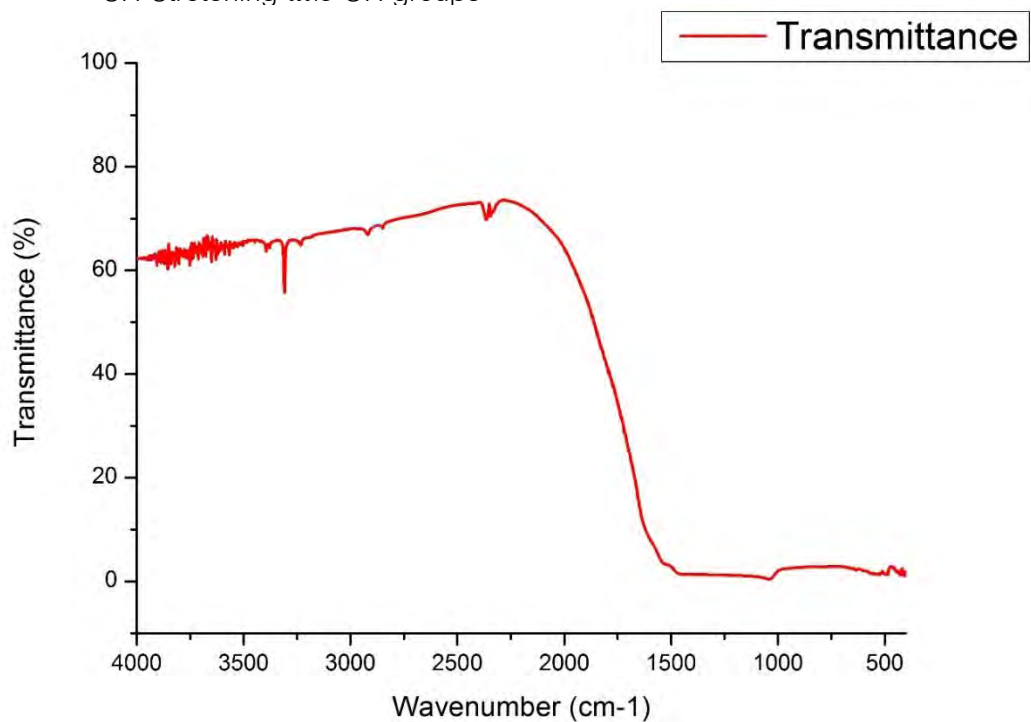
รูป ข.17 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B21) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



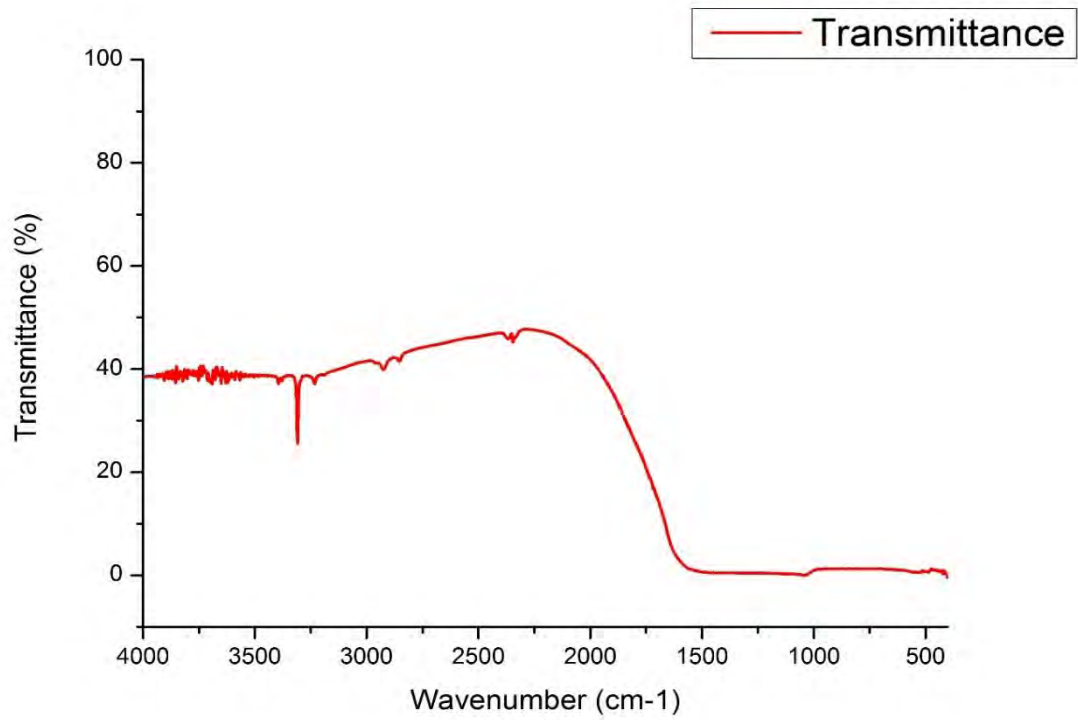
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B22) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีเอทิลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุก ประเทศรวันดา (Rwanda_B25) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

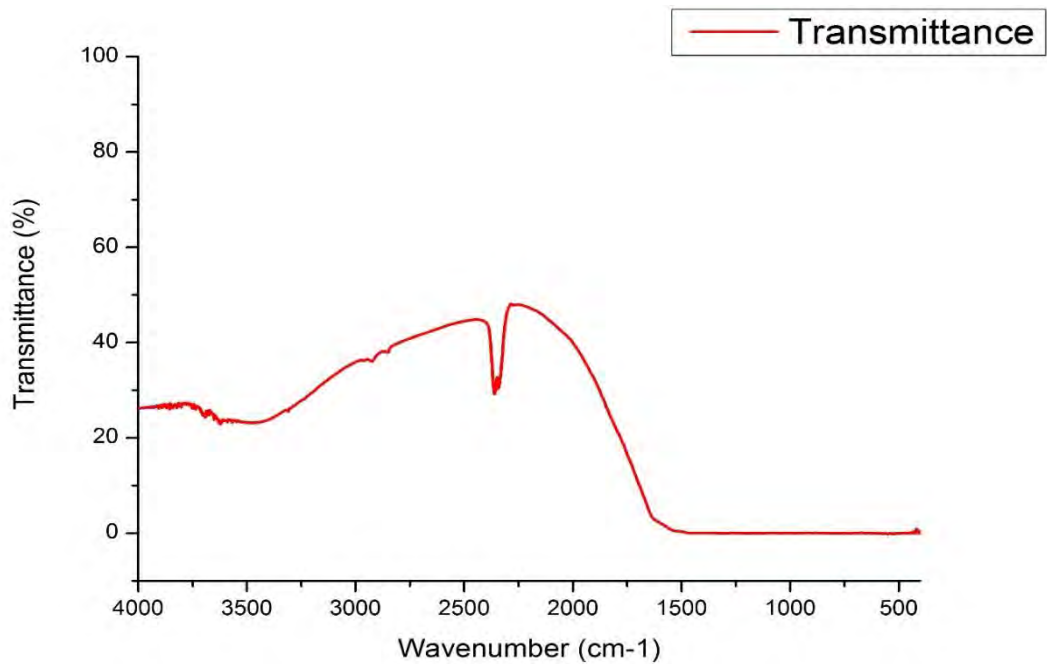


รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของโพลีเอทิลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุก ประเทศรวันดา (Rwanda_B29) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



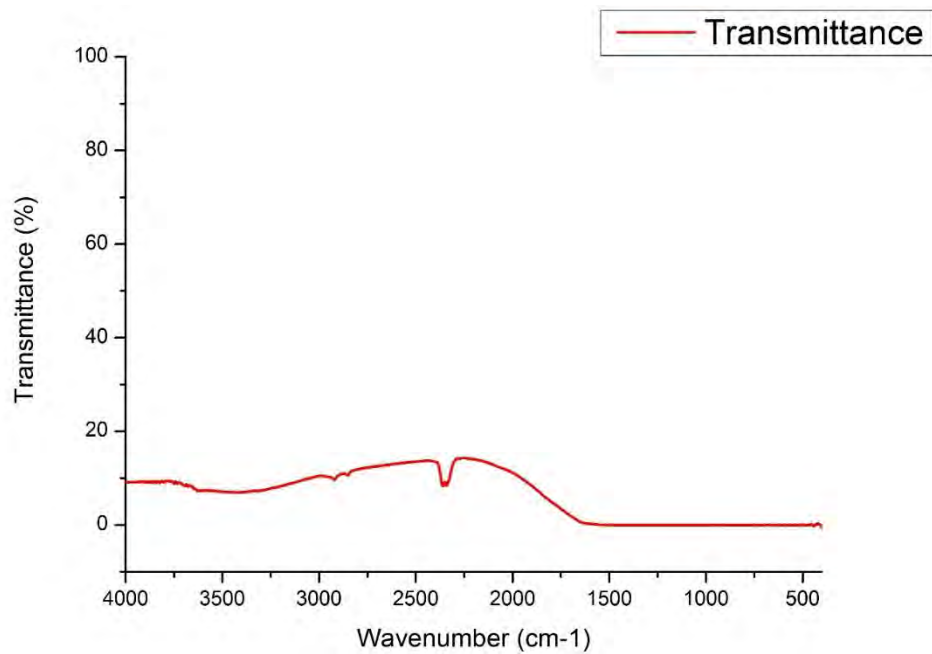
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B32) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินเข้มทึบแสง (opaque dark blue) จำนวน 7 ตัวอย่าง



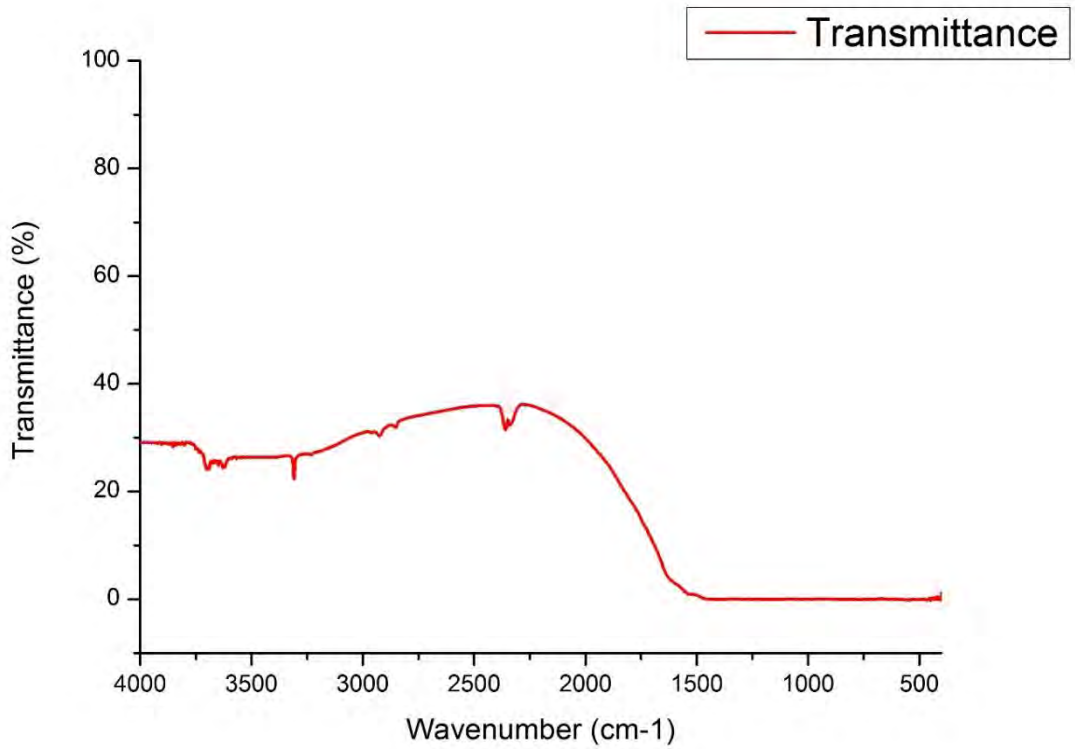
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง)

จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B5) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

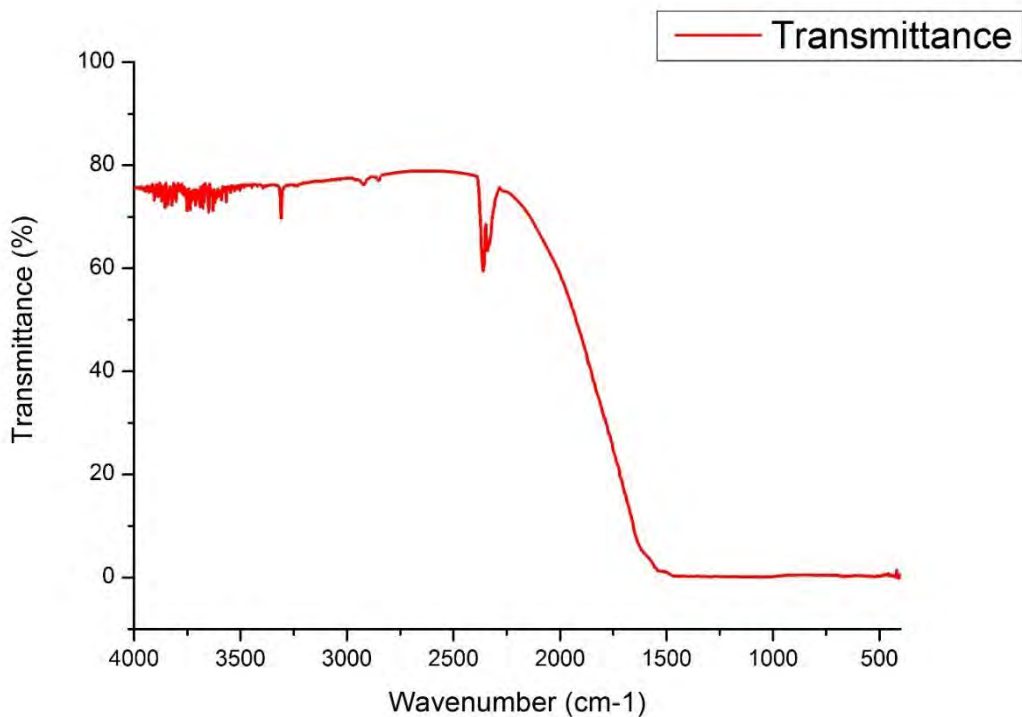


รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง)

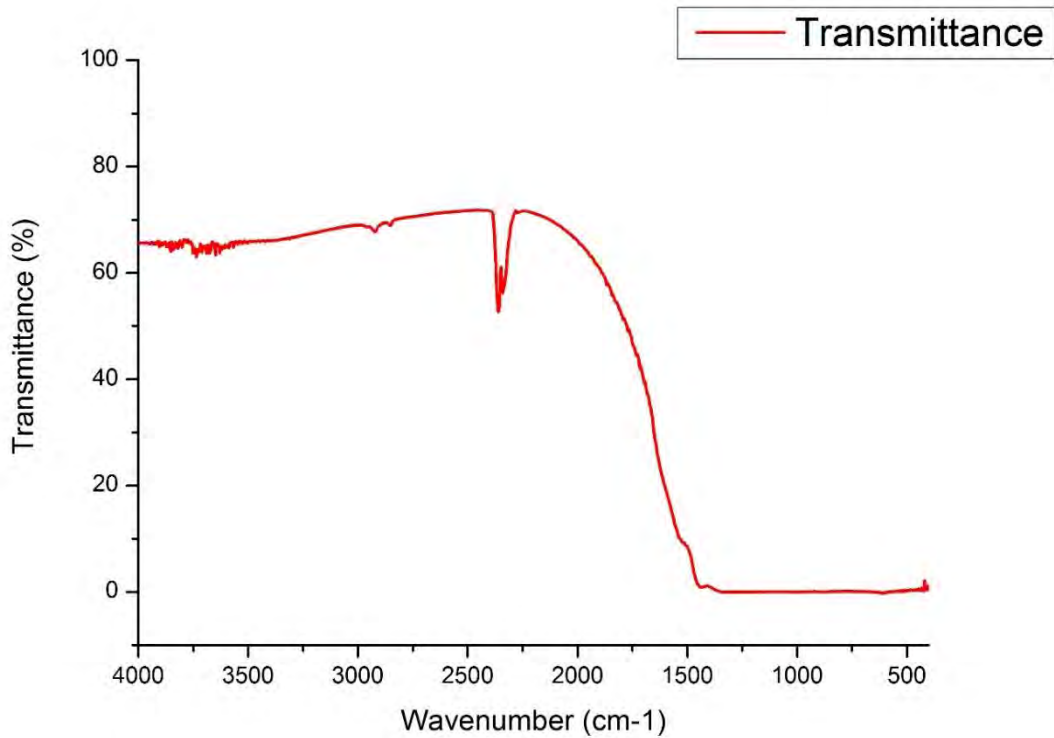
จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B6) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



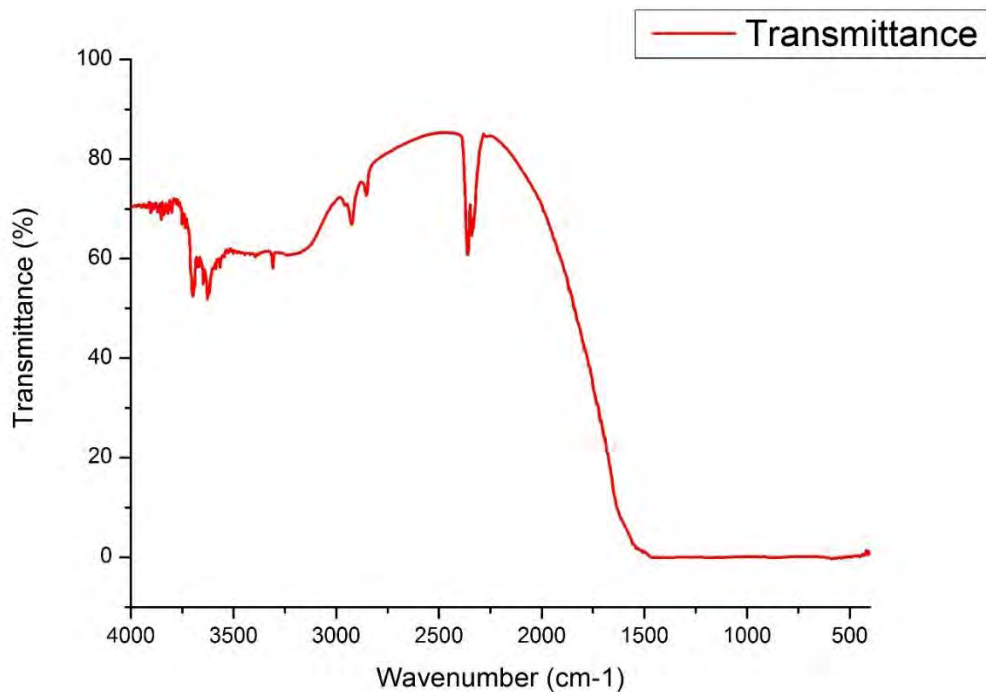
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บ่งแสง) จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา (Rwanda_B7) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



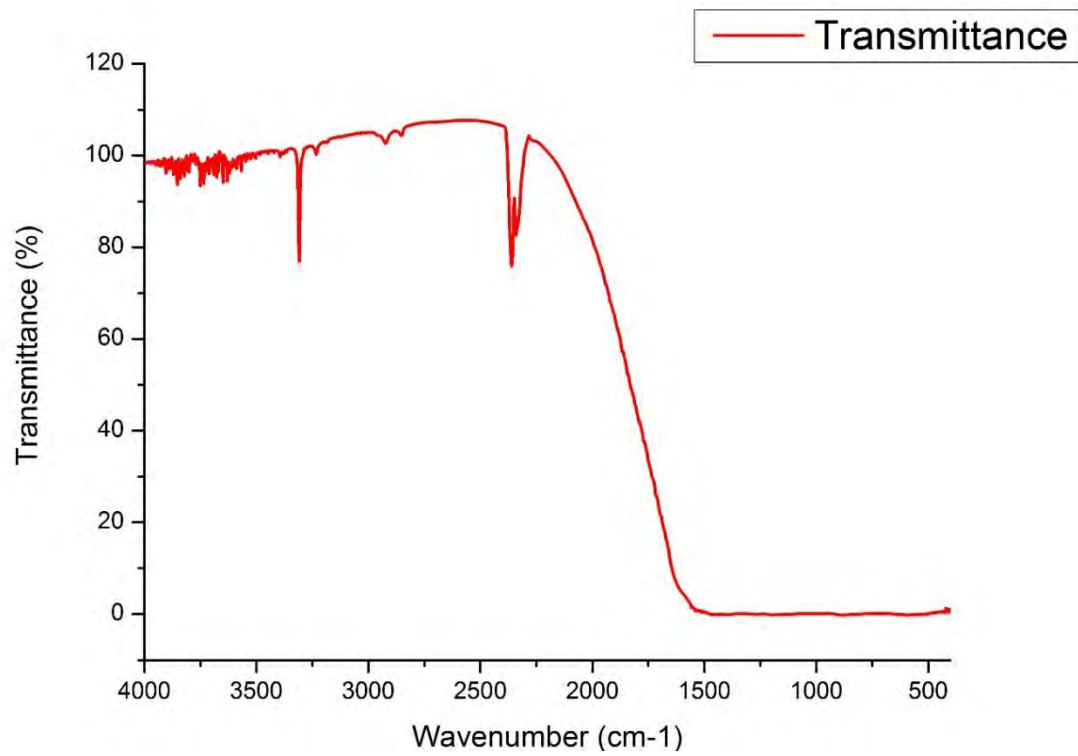
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บ่งแสง) จากแหล่งจางกุฎ ประเทศรวันดา (Rwanda_B8) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บัสแสง)
จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B10) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ
 H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

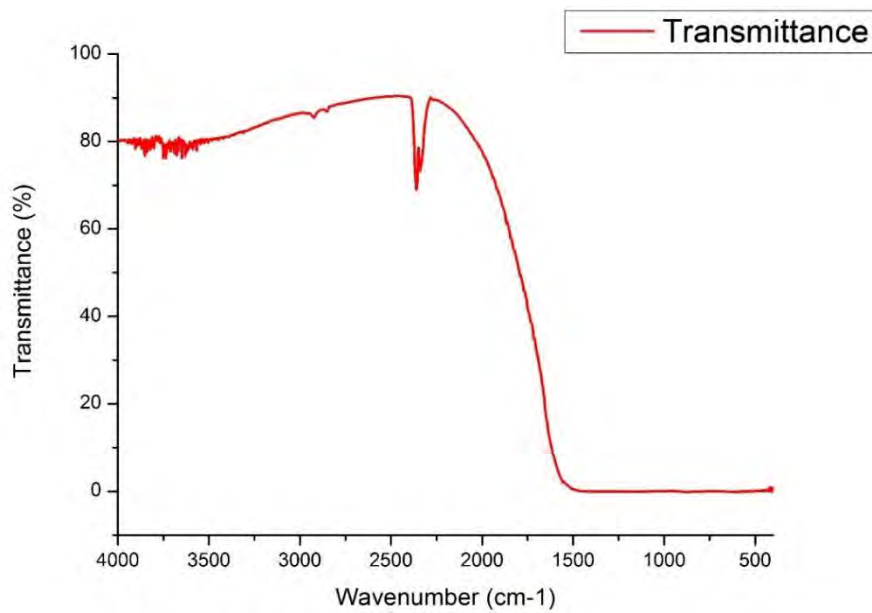


รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บัสแสง)
จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B12) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ
 H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



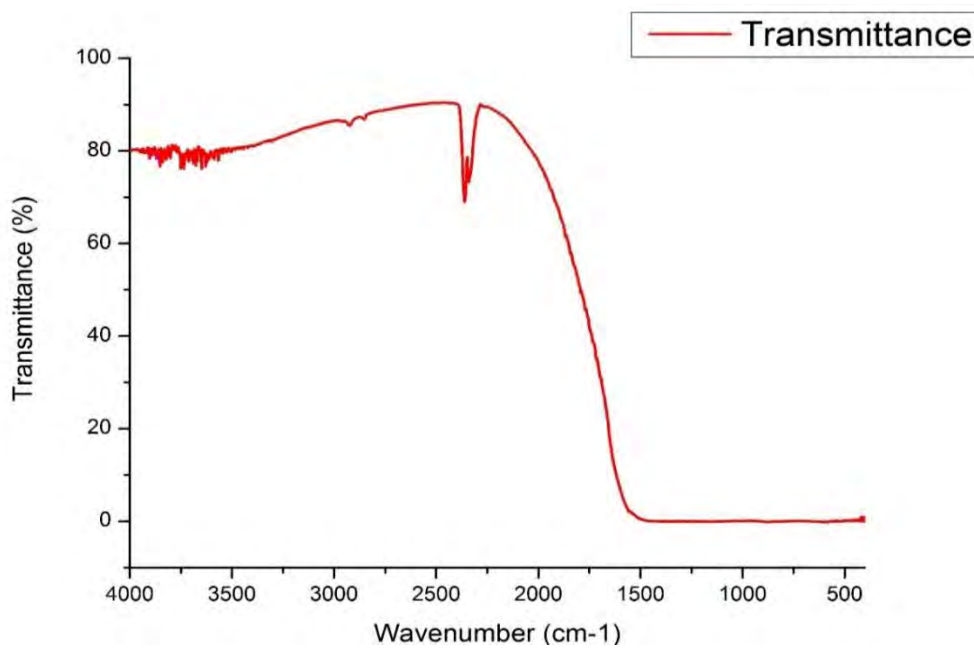
รูป ข.22 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บัสแสง)
จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B12) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ
 H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินอมเขียว (greenish blue) จำนวน 6 ตัวอย่าง



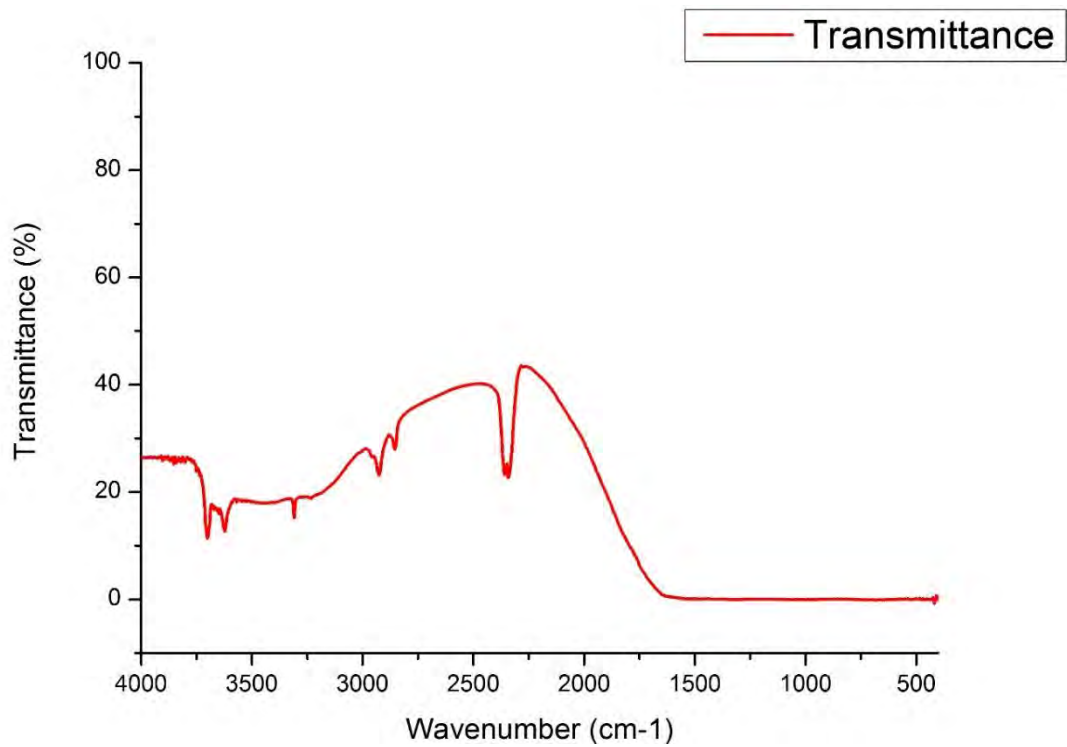
รูป ข.12 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B1) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



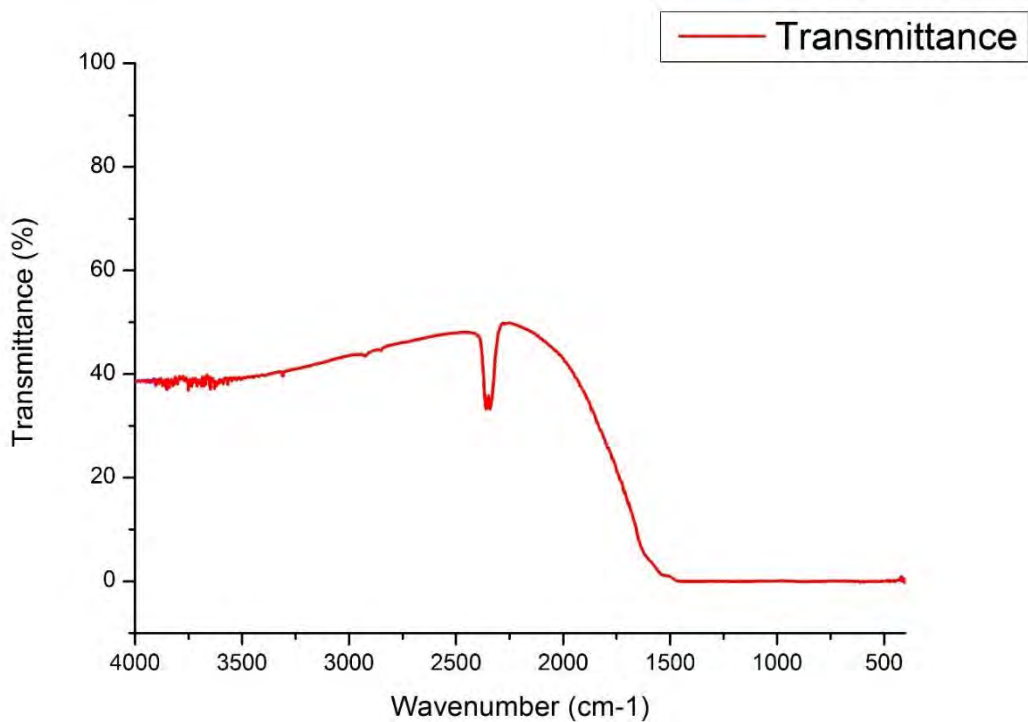
รูป ข.13 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B2) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups



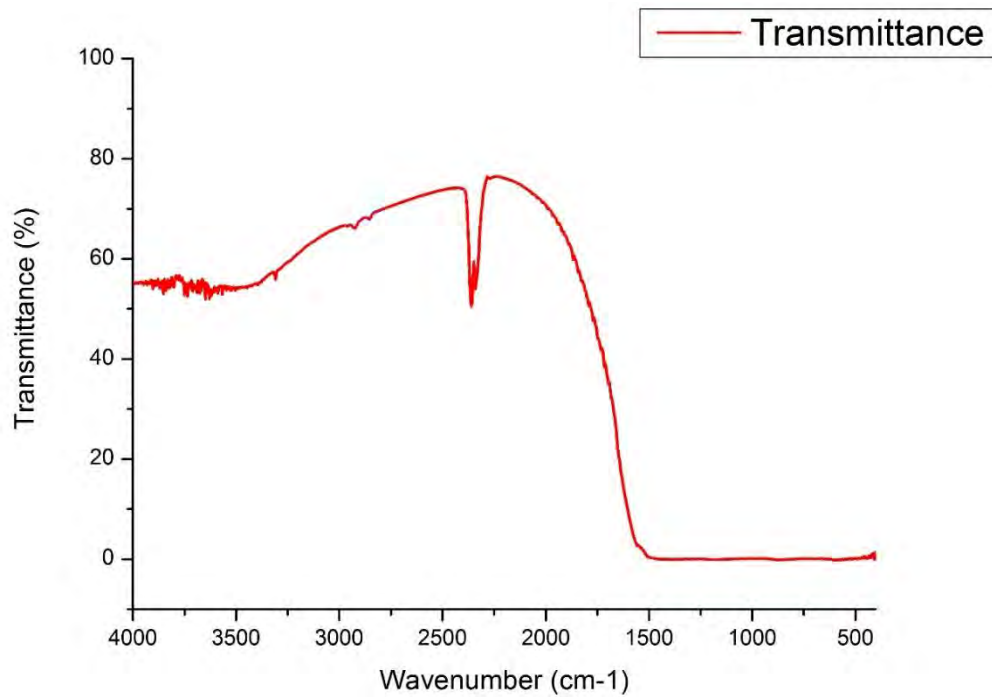
รูป ข.14 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B3) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups

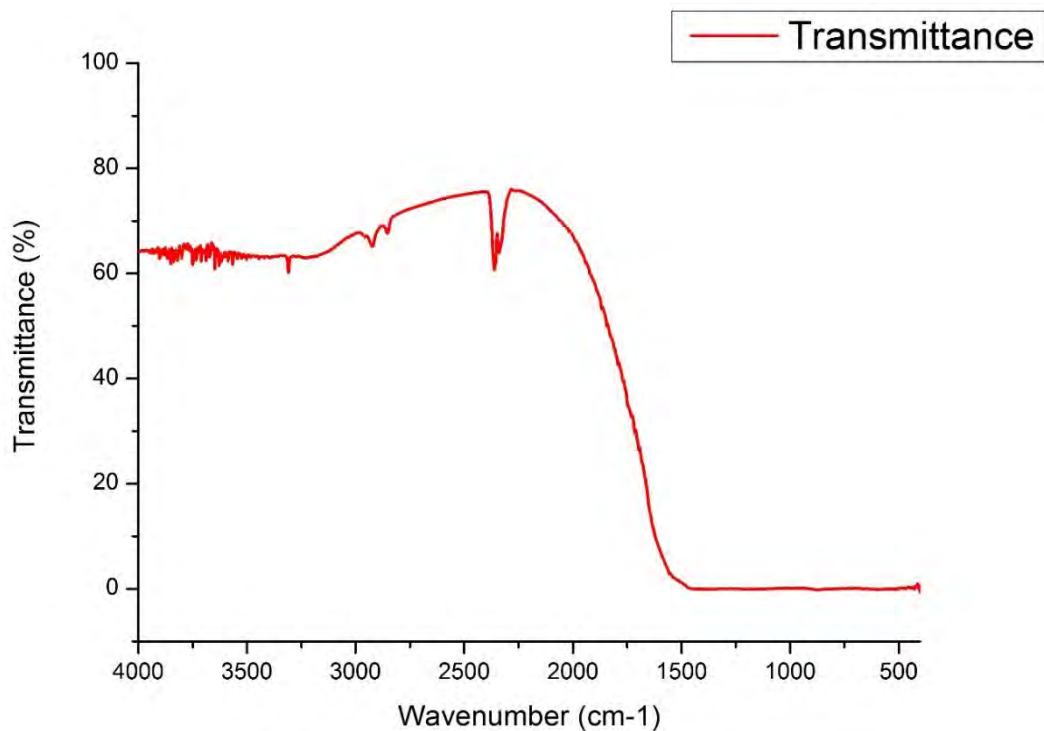


รูป ข.15 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B4) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H₂O, CO₂, CH-Stretching และ OH groups



รูป ข.16 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B11) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

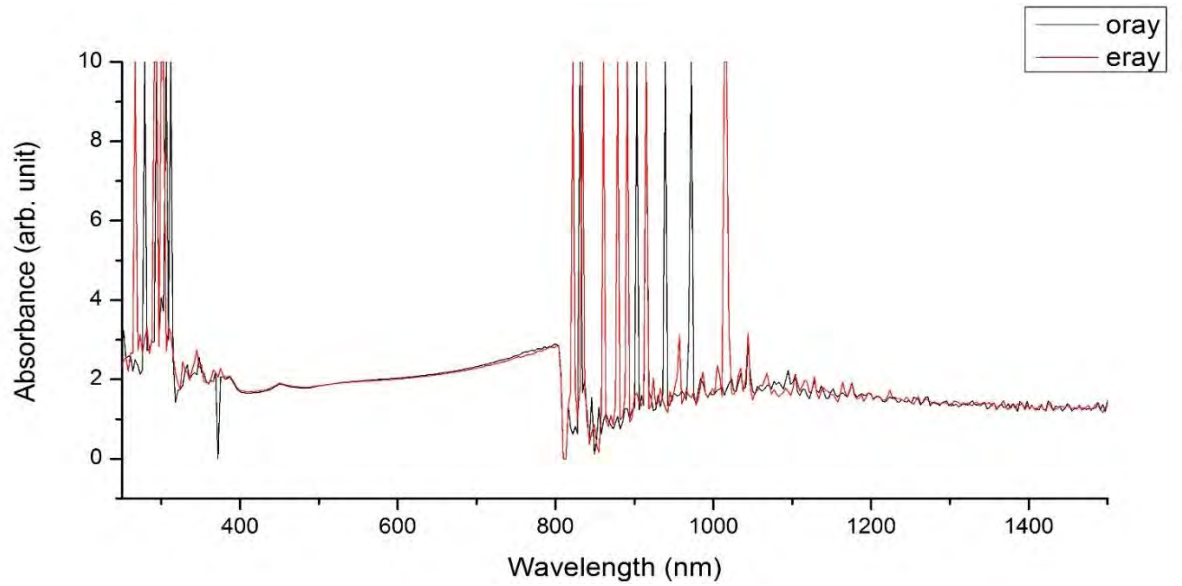


รูป ข.17 ตัวอย่าง FTIR Spectrum ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B14) แสดงรูปแบบและช่วงการดูดกลืนของ H_2O , CO_2 , CH-Stretching และ OH groups

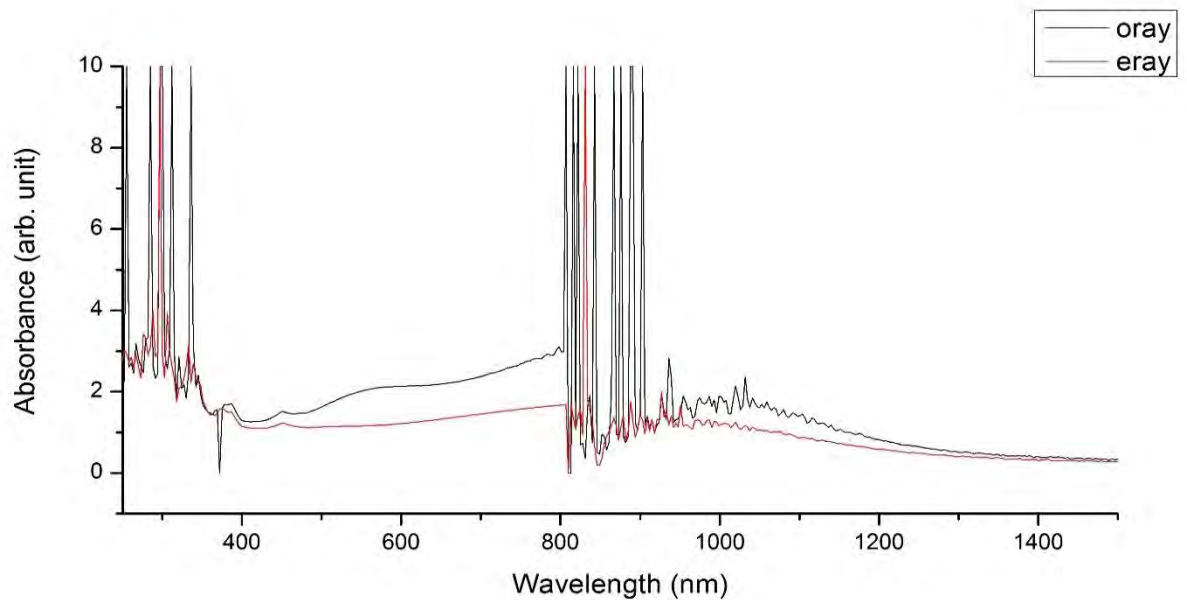
ภาคผนวก ค

ข้อมูลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR

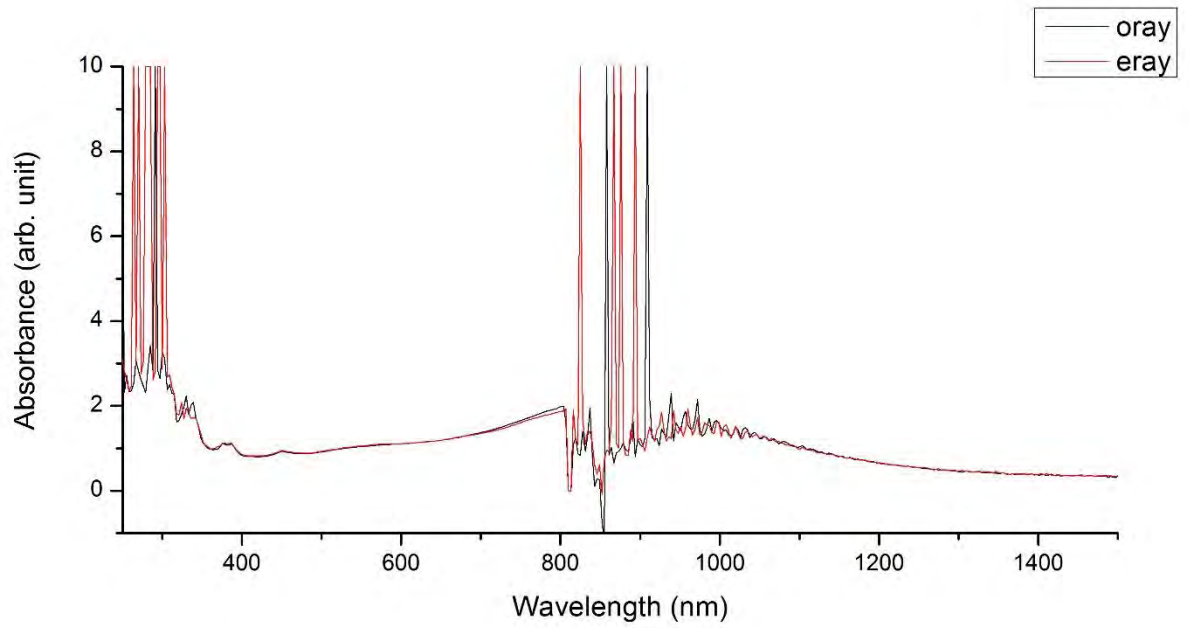
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินเข้ม จำนวน 11 ตัวอย่าง



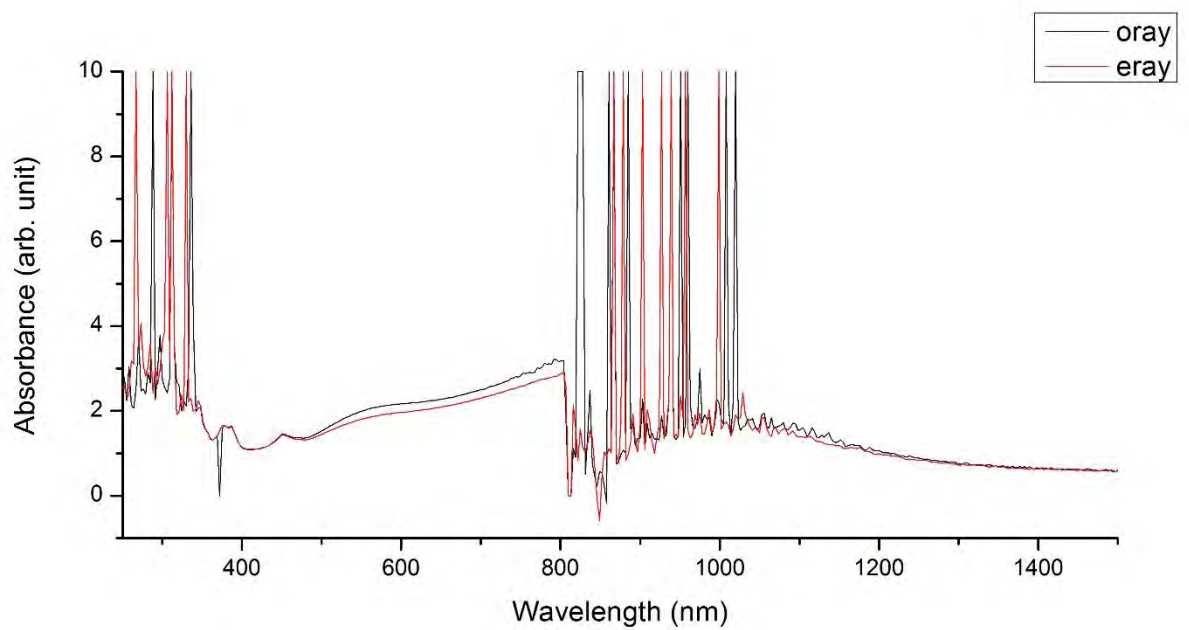
รูป ค.1 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุญ
ประเทศรวันดา (Rwanda_B15)



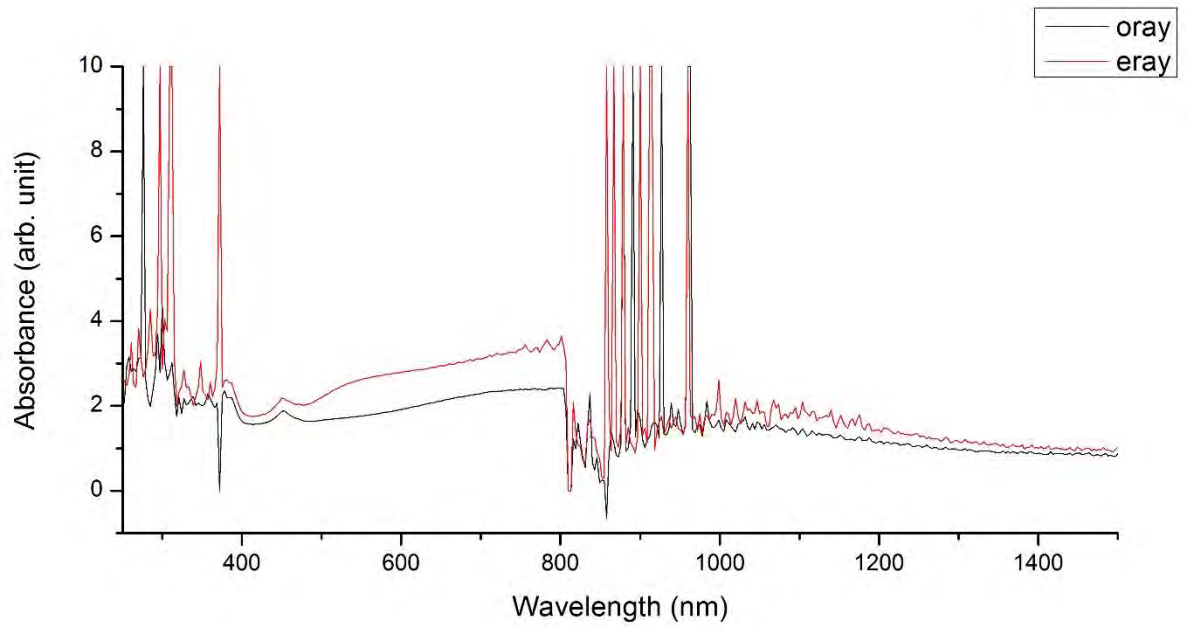
รูป ค.2 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไพลินกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกุญ
ประเทศรวันดา (Rwanda_B16)



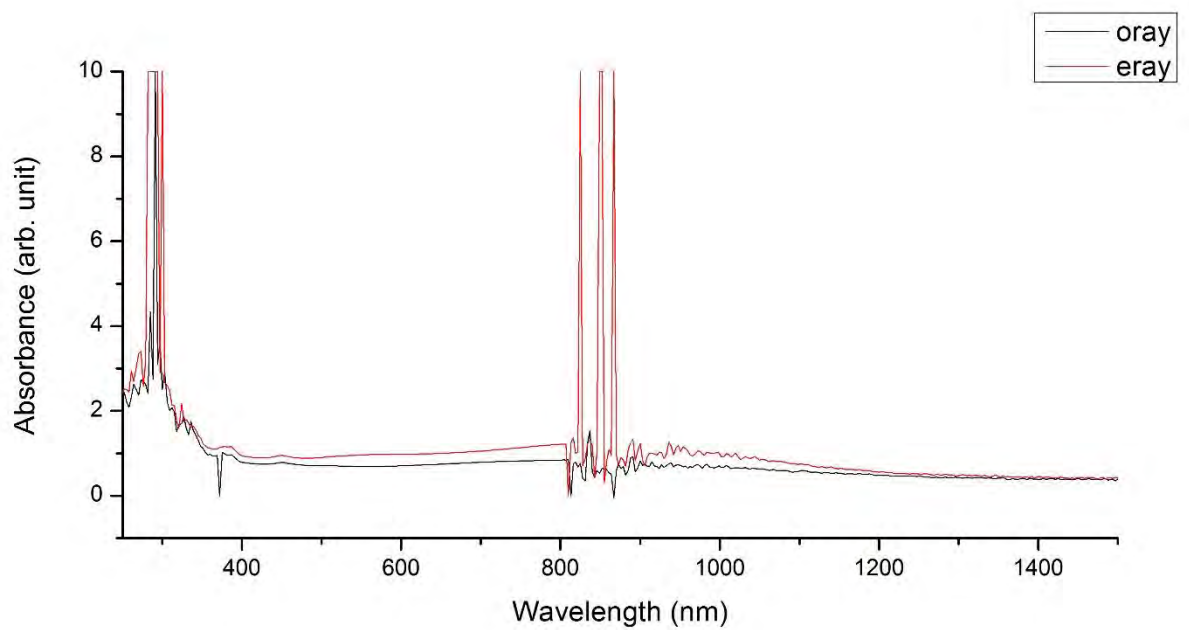
รูป ค.3 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_B17)



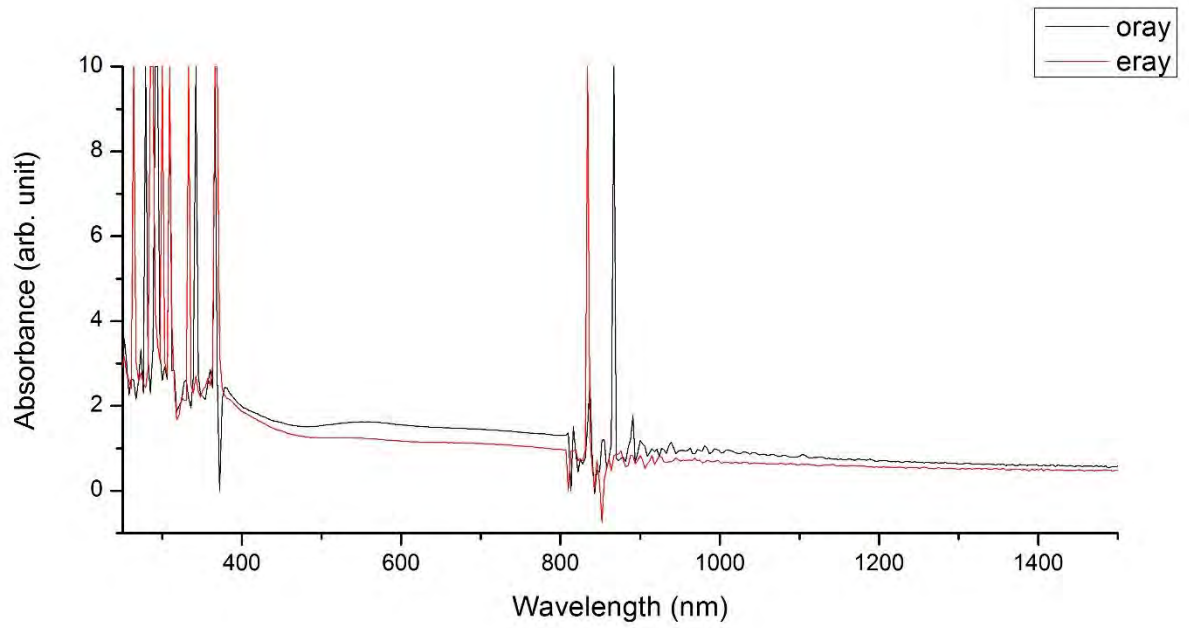
รูป ค.4 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_B20)



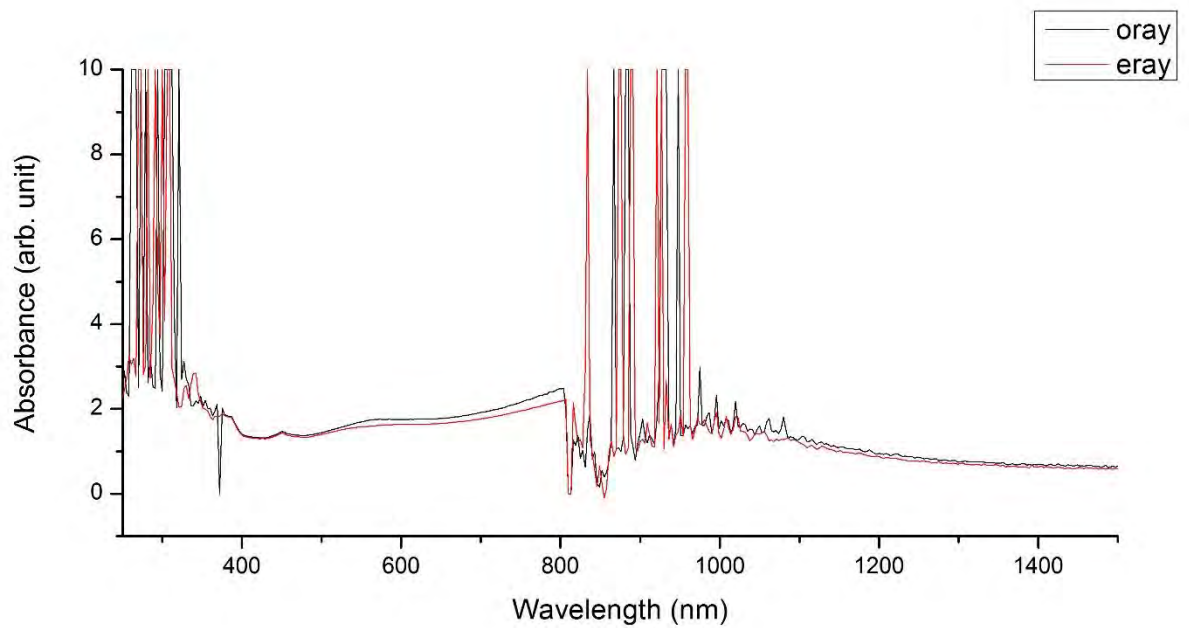
รูป ค.5 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_B23)



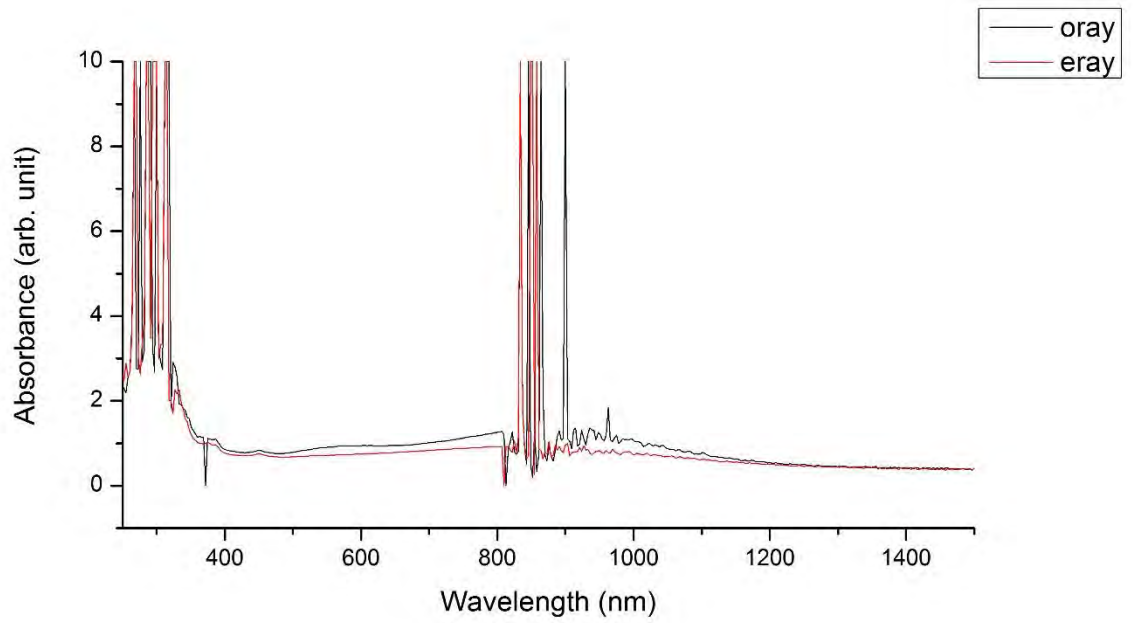
รูป ค.6 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_24)



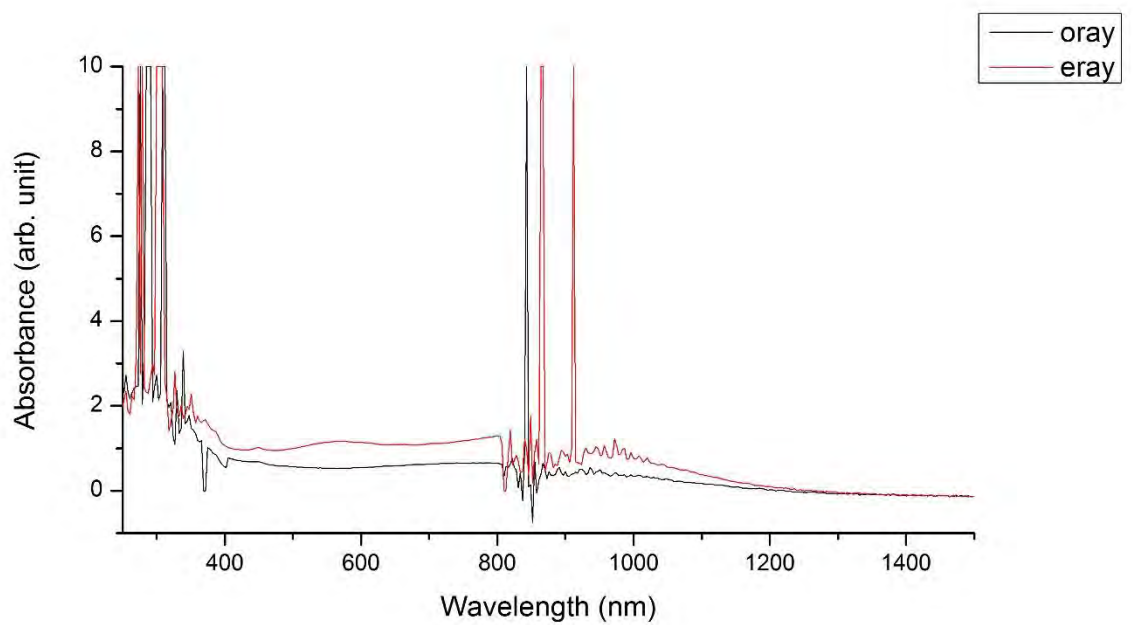
รูป ค.7 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_B26)



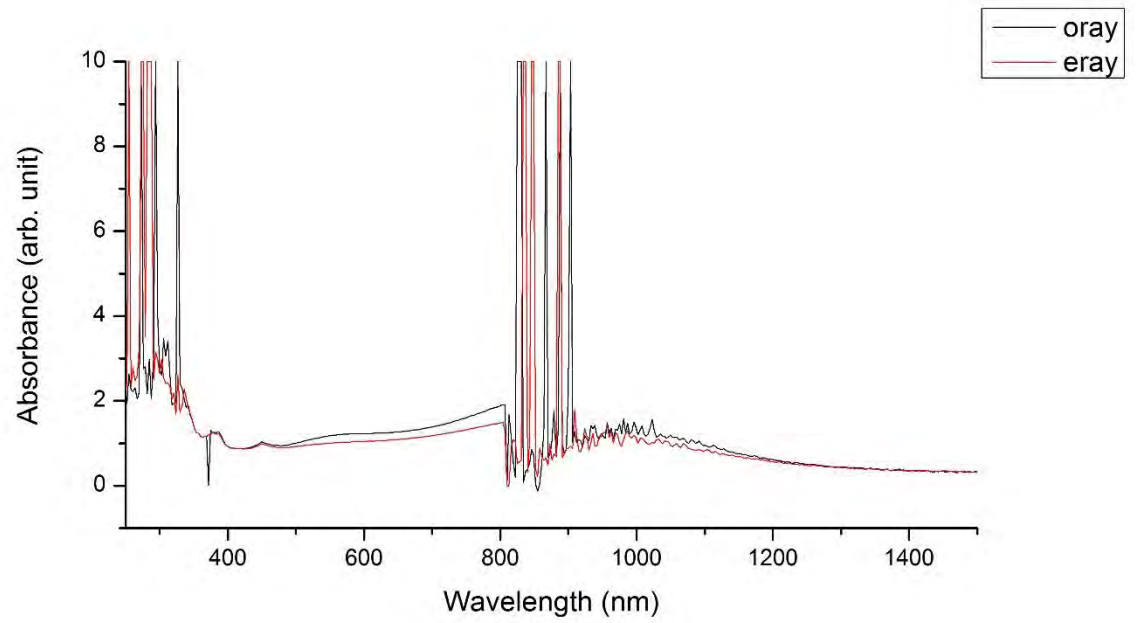
รูป ค.8 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู
ประเทศรวันดา (Rwanda_27)



รูป ค.9 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B28)

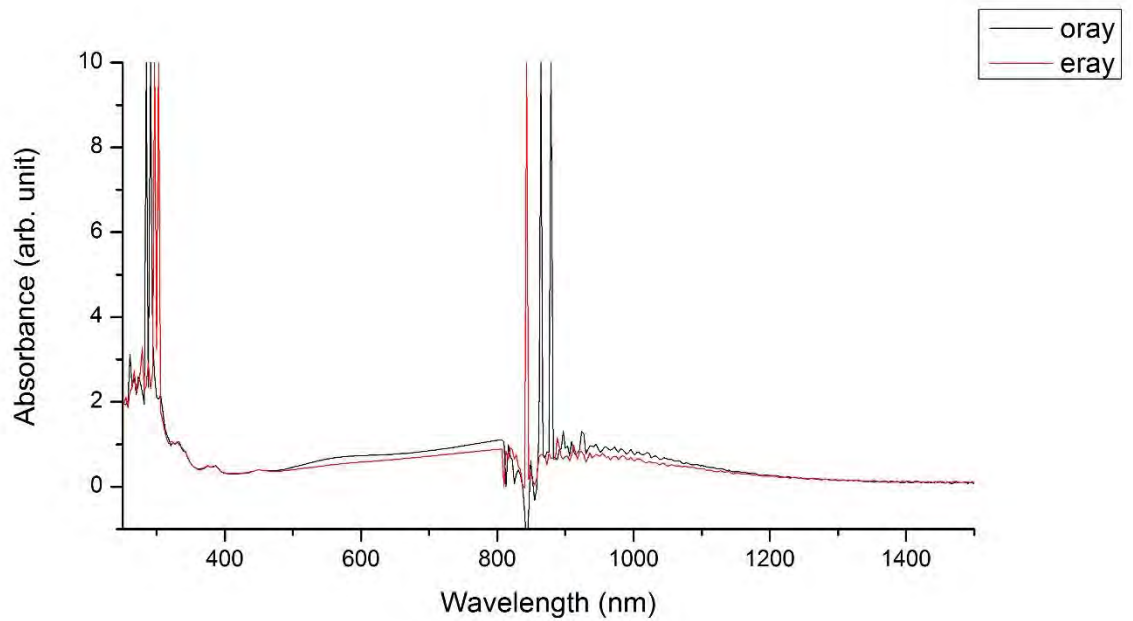


รูป ค.10 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_30)

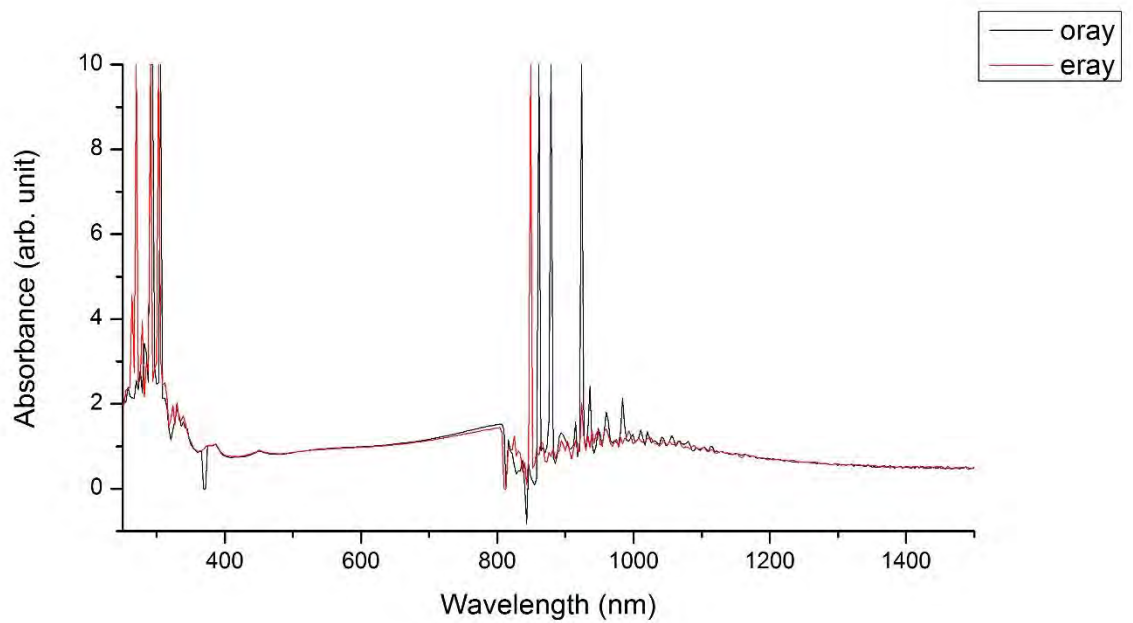


รูป ค.11 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_31)

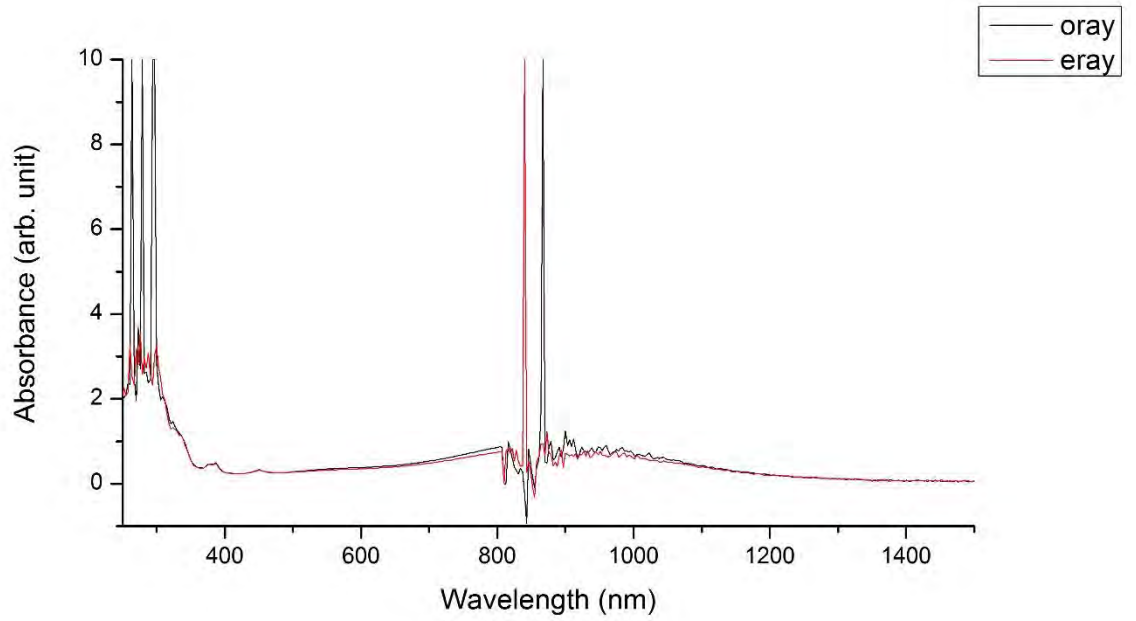
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินอ่อน จำนวน 7 ตัวอย่าง



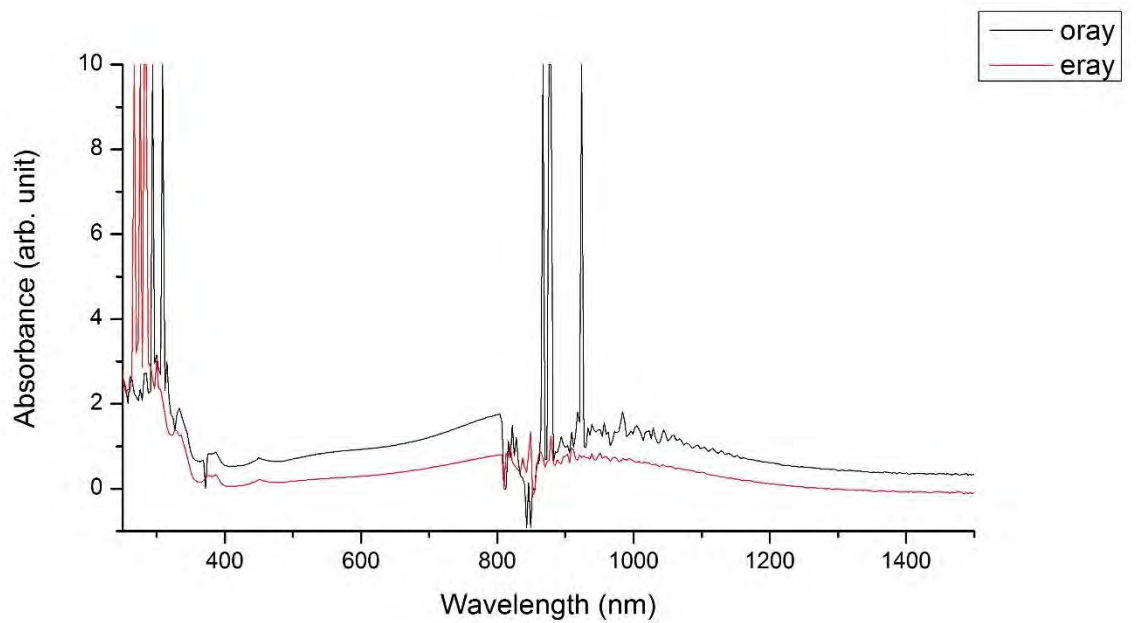
รูป ค.12 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B18)



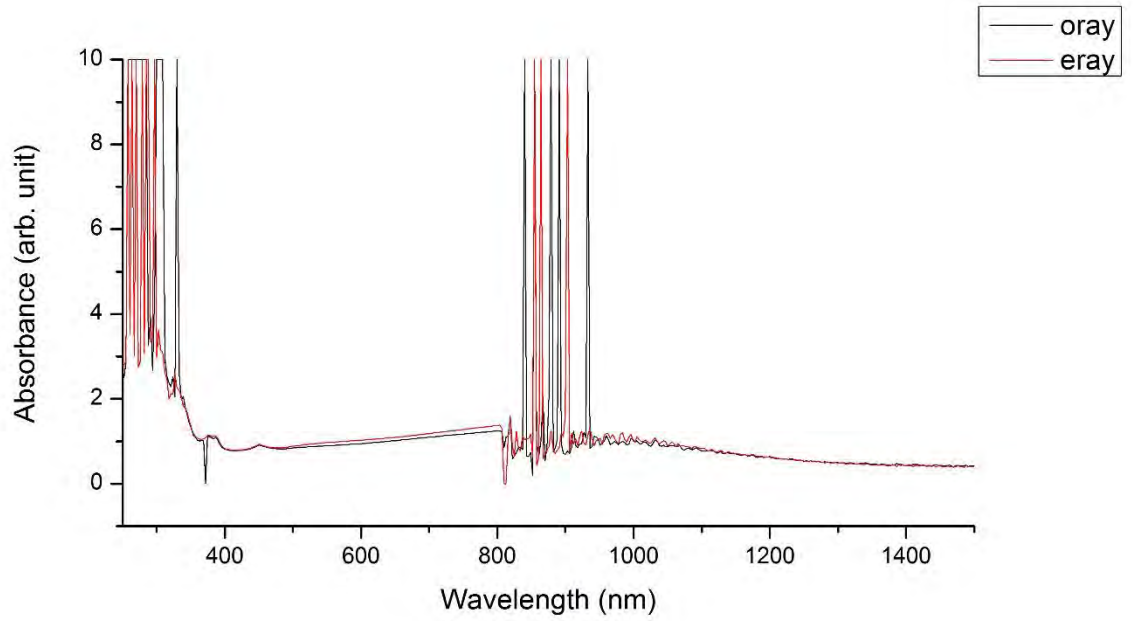
รูป ค.13 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_19)



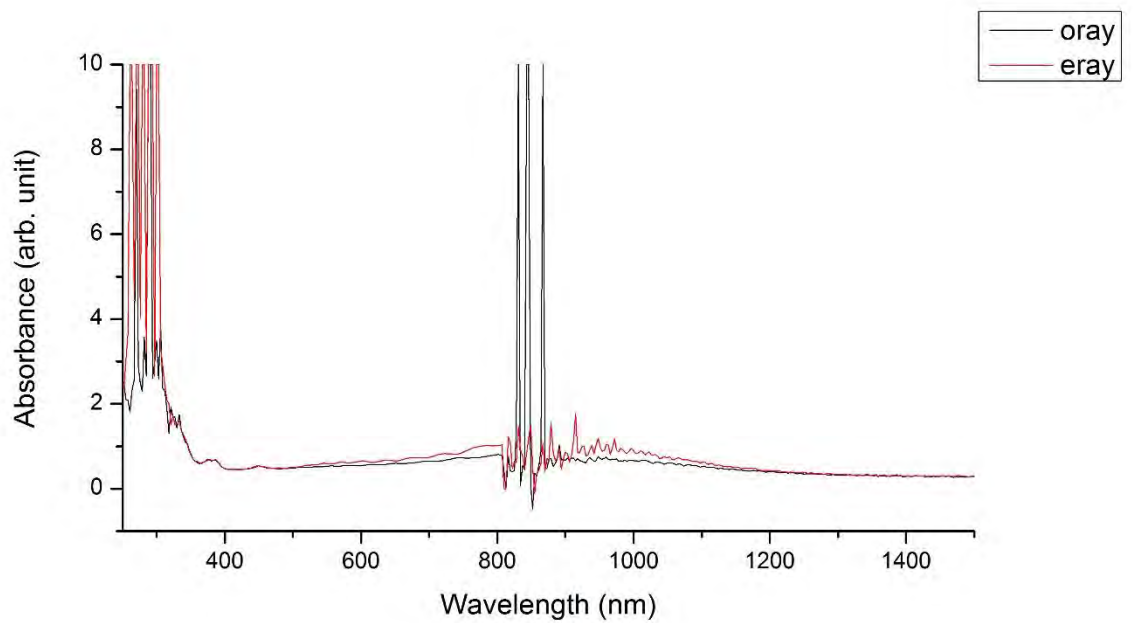
รูป ค.14 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B21)



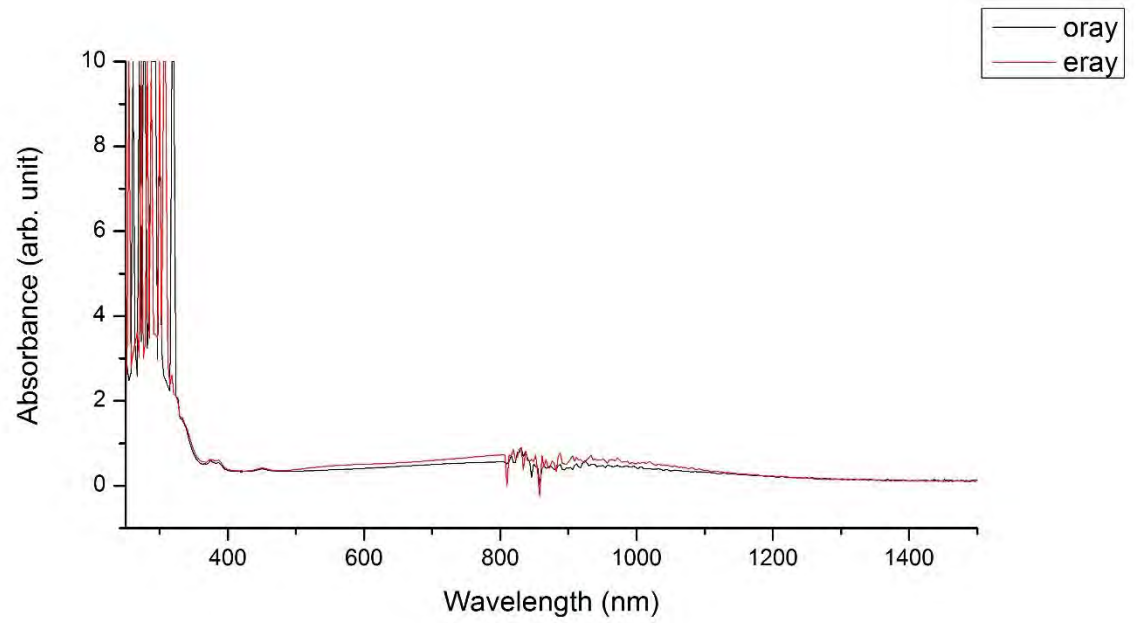
รูป ค.15 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุกู ประเทศรวันดา (Rwanda_22)



รูป ค.16 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ
ประเทศรวันดา (Rwanda_B25)

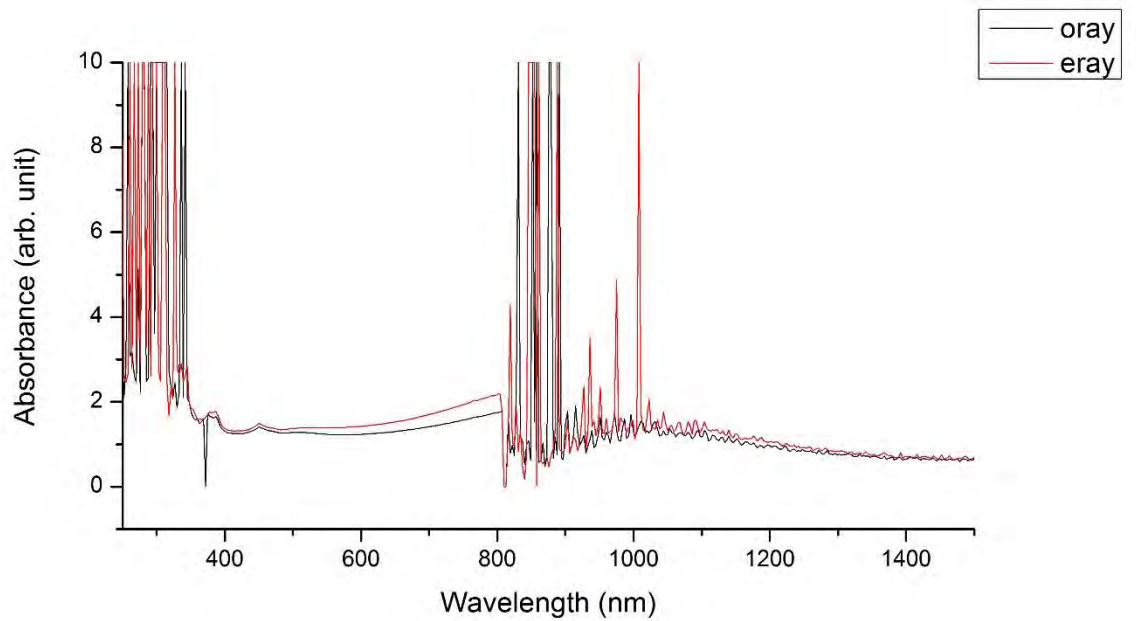


รูป ค.17 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของฟิล์มกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุญ
ประเทศรวันดา (Rwanda_29)

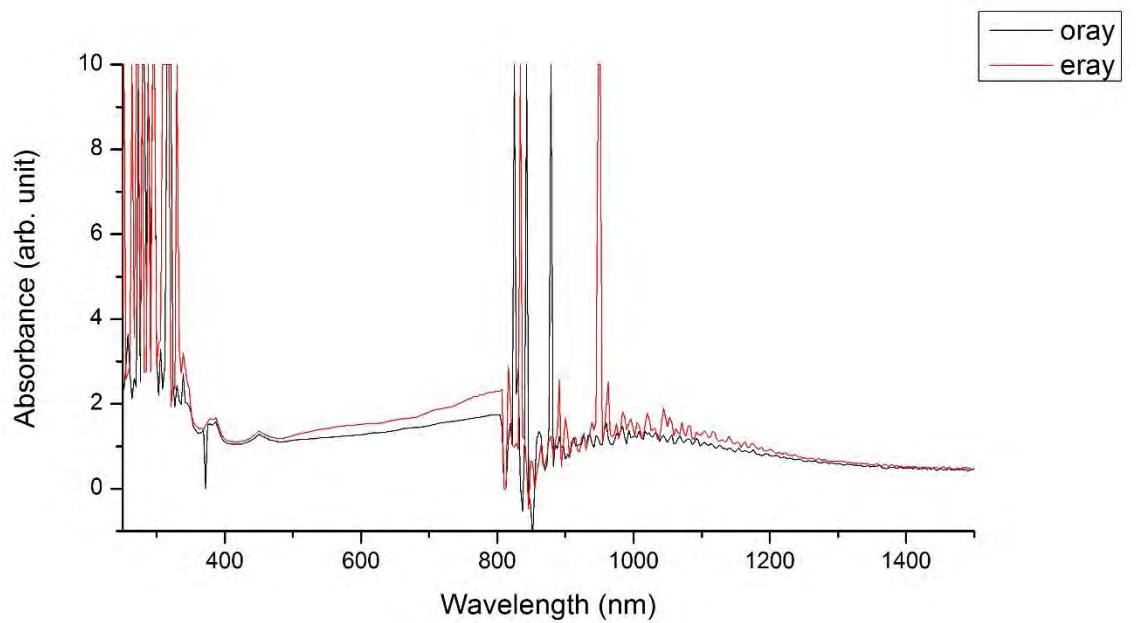


รูป ค.18 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอ่อน) จากแหล่งจางกุก ประเทศรวันดา (Rwanda_32)

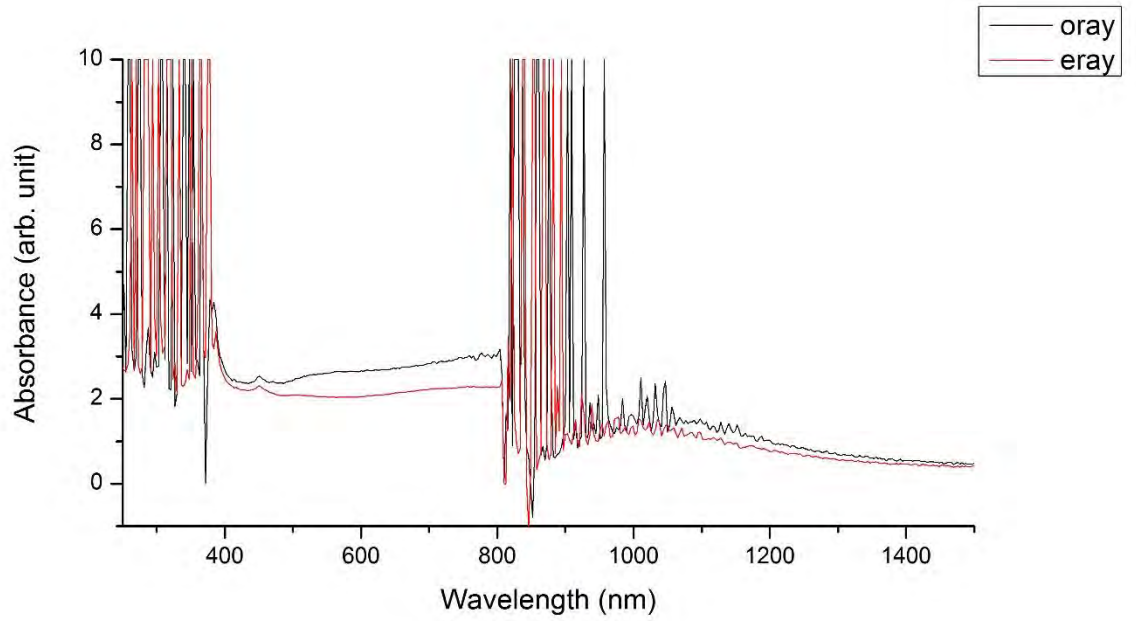
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินเข้มที่บแสง จำนวน 7 ตัวอย่าง



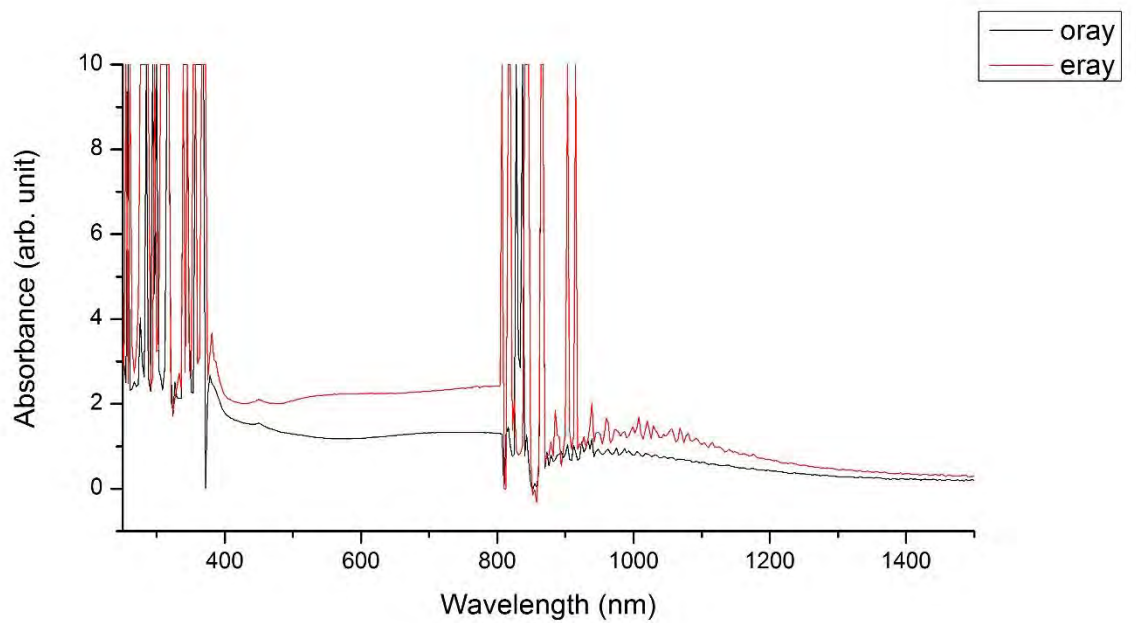
รูป ค.19 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B5)



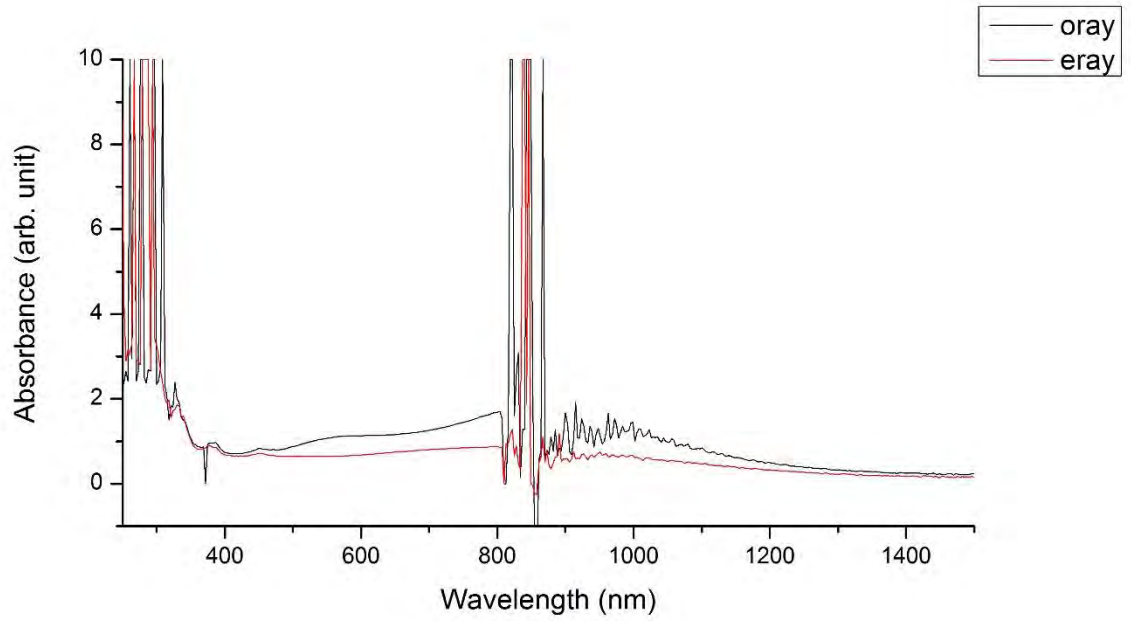
รูป ค.20 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B6)



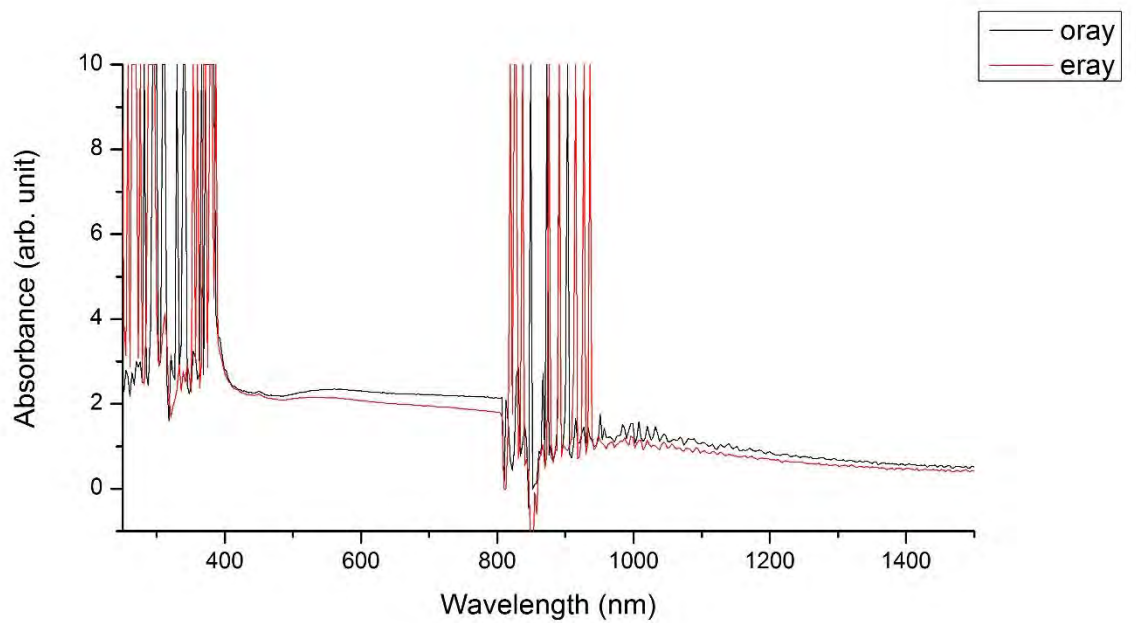
รูป ค.21 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B7)



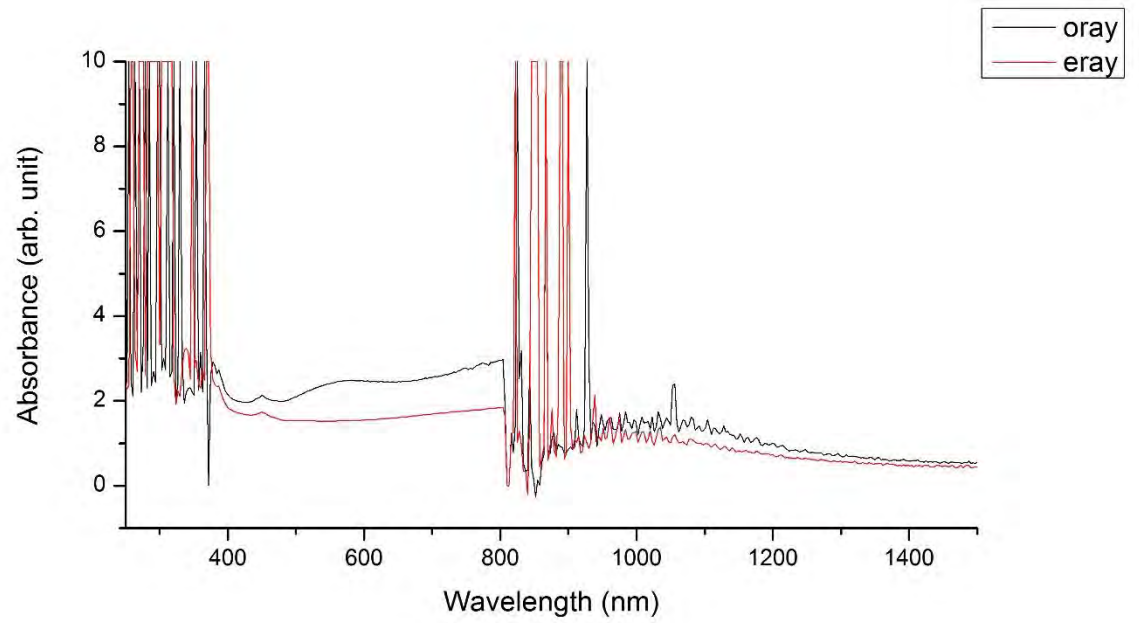
รูป ค.22 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกูญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B8)



รูป ค.23 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B10)

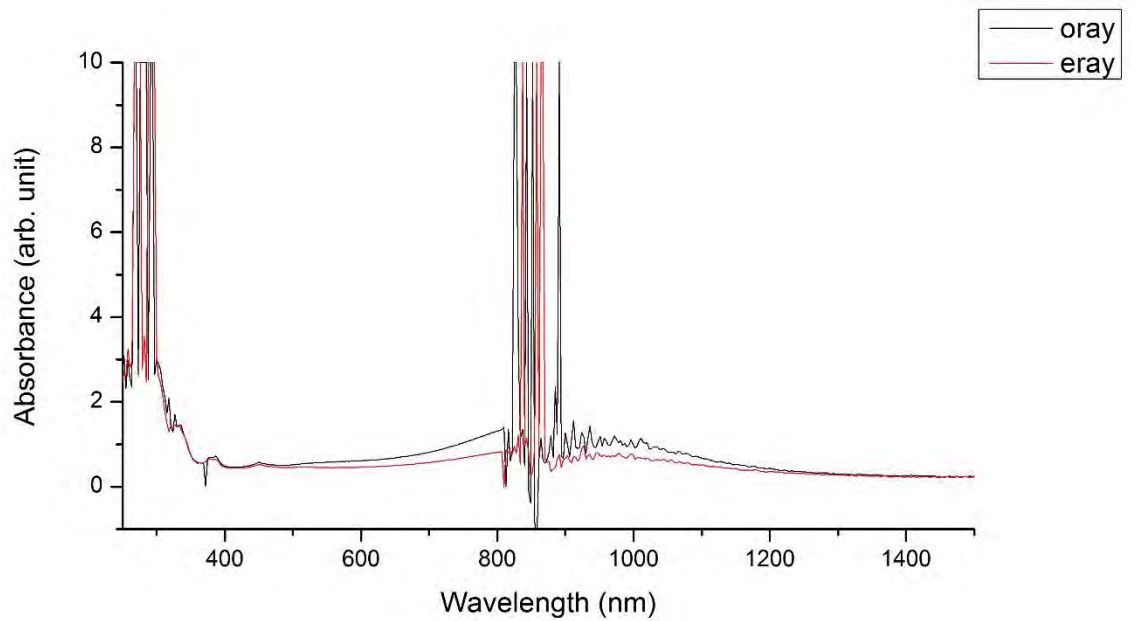


รูป ค.24 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บแสง) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B12)

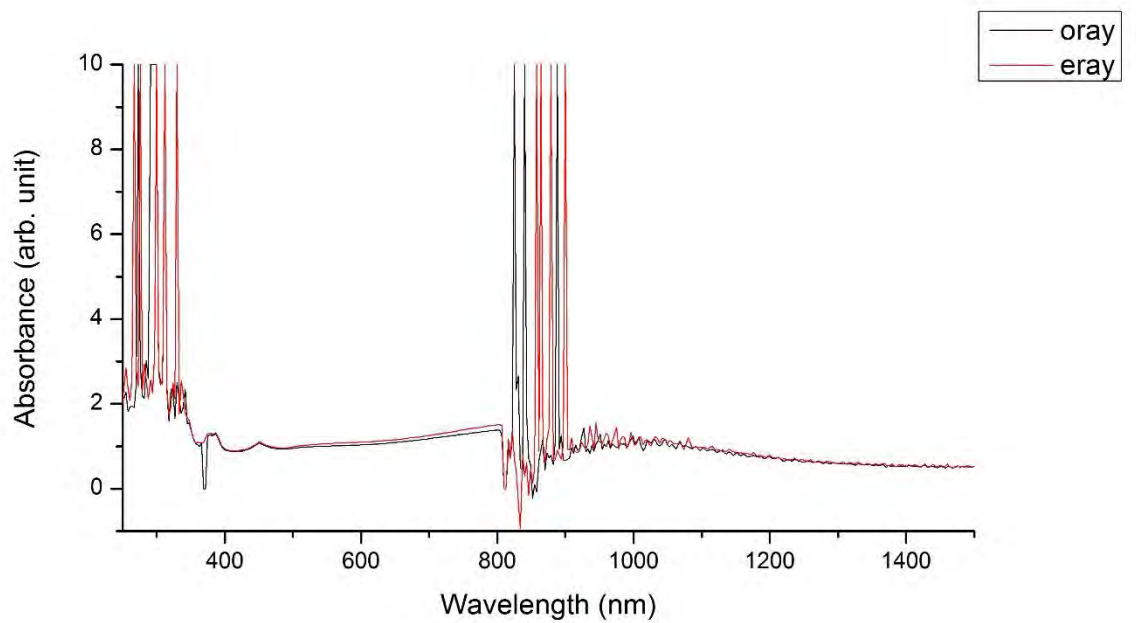


รูป ค.25 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของโพลีเมอร์คุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มที่บดแสง) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_13)

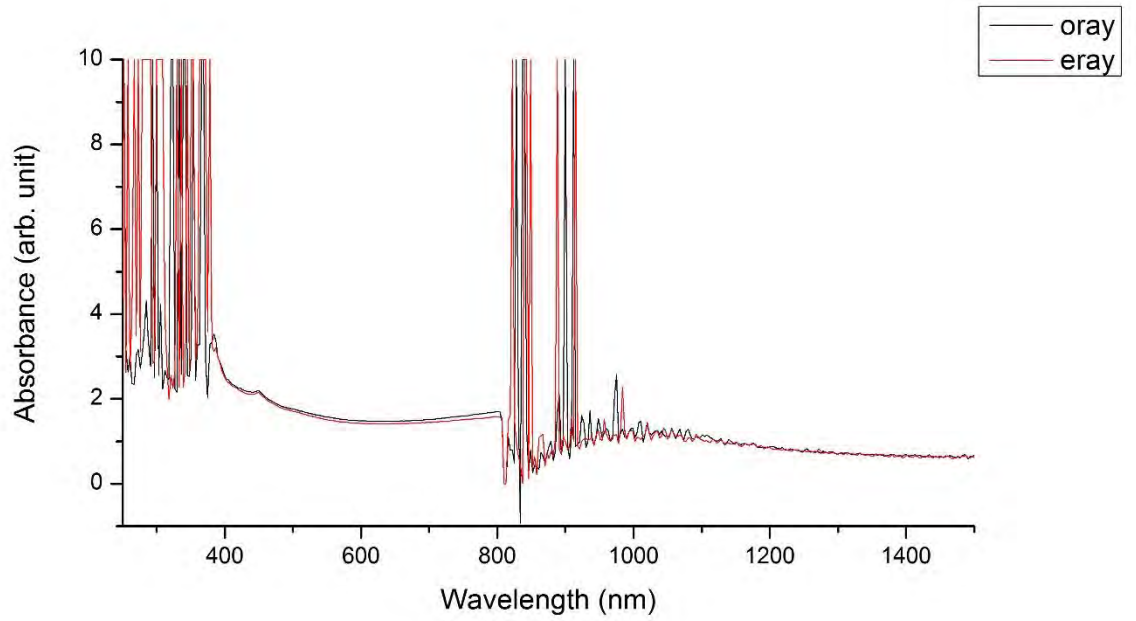
กลุ่มตัวอย่างสีน้ำเงินอมเขียว จำนวน 6 ตัวอย่าง



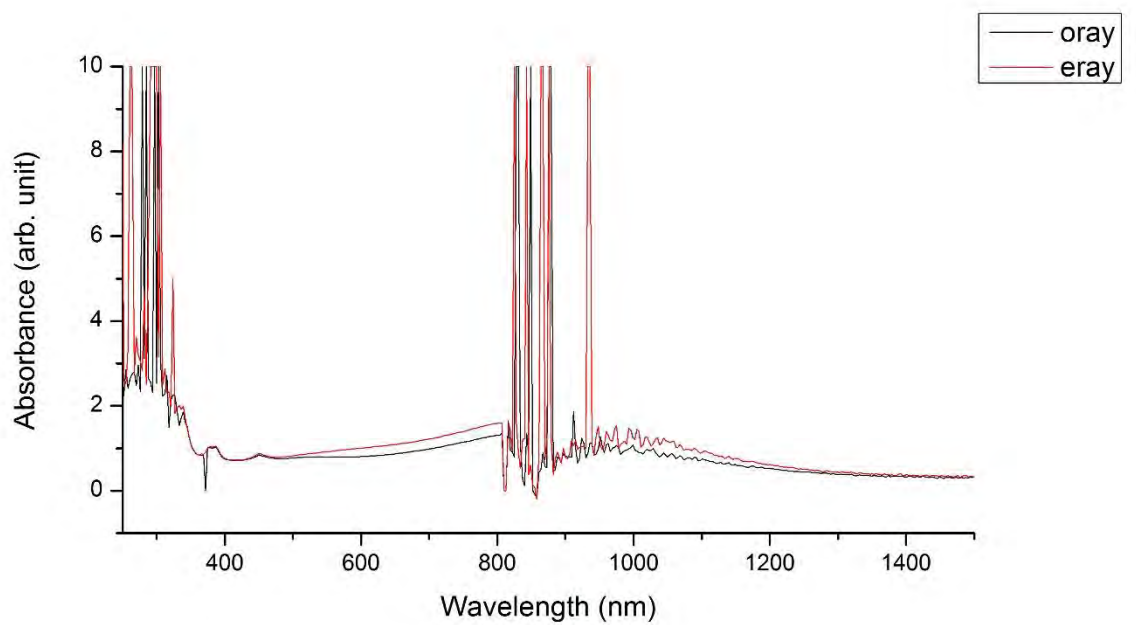
รูป ค.26 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_B1)



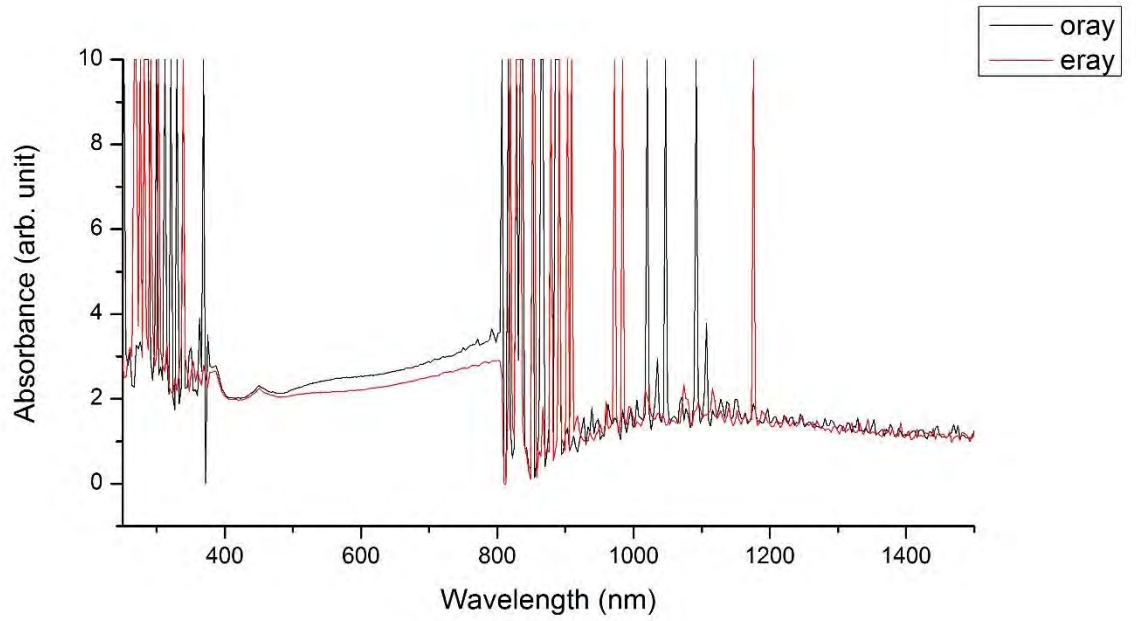
รูป ค.27 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลีนกลุ่มคุณภาพดี (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกุญ ประเทศรวันดา (Rwanda_2)



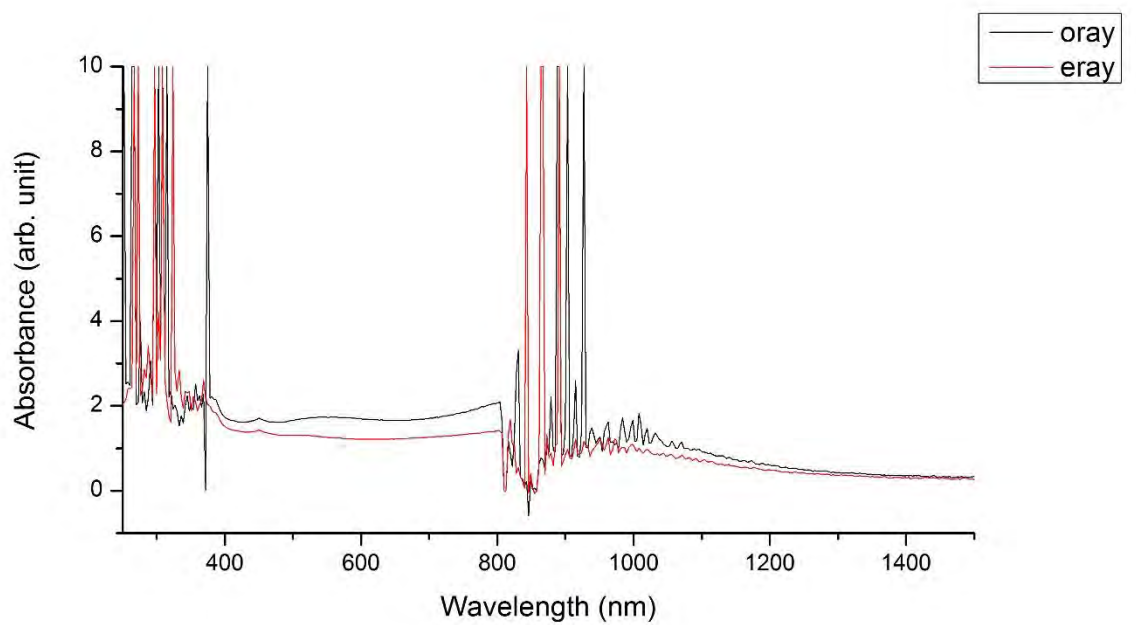
รูป ค.28 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B3)



รูป ค.29 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_4)



รูป ค.30 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_B11)



รูป ค.31 ตัวอย่าง UV-VIS-NIR ของไฟลิ่งกลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา (Rwanda_14)

ภาคผนวก ง

องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDXRF ของแชปไฟร์จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา

Group	Sample No.	A 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%)
Dark blue	Rwanda_B15	99.7209	0.0071	0.0041	0.0026	0.2402	0.0250
	Rwanda_B16	99.5969	0.0087	0.0014	0.0026	0.3628	0.0276
	Rwanda_B17	99.8196	0.0069	0.0000	0.0024	0.1396	0.0314
	Rwanda_B20	99.7105	0.0077	0.0046	0.0041	0.2426	0.0305
	Rwanda_B23	99.4247	0.0102	0.0022	0.0022	0.5336	0.0270
	Rwanda_B24	99.7031	0.0114	0.0049	0.0035	0.2464	0.0308
	Rwanda_B26	99.8048	0.0107	0.0045	0.0083	0.1422	0.0296
	Rwanda_B27	99.6191	0.0062	0.0030	0.0048	0.3442	0.0226
	Rwanda_B28	99.7055	0.0105	0.0073	0.0035	0.2454	0.0279
	Rwanda_B30	99.7125	0.0056	0.0028	0.0022	0.2348	0.0421
	Rwanda_B31	99.5779	0.0048	0.0031	0.0029	0.3874	0.0240
Light Blue	Rwanda_B18	99.7260	0.0023	0.0000	0.0034	0.2348	0.0334
	Rwanda_B19	99.6664	0.0040	0.0017	0.0025	0.2944	0.0309
	Rwanda_B21	99.6619	0.0055	0.0048	0.0010	0.2852	0.0415
	Rwanda_B22	99.6293	0.0087	0.0040	0.0048	0.3316	0.0216
	Rwanda_B25	99.6457	0.0104	0.0072	0.0021	0.3070	0.0276
	Rwanda_B29	99.6416	0.0077	0.0028	0.0028	0.2952	0.0499
	Rwanda_B32	99.6596	0.0103	0.0049	0.0013	0.2737	0.0503
Opaque dark blue	Rwanda_B1	99.5046	0.0064	0.0063	0.0048	0.4485	0.0293
	Rwanda_B2	99.6630	0.0083	0.0060	0.0049	0.2826	0.0352
	Rwanda_B3	99.6302	0.0254	0.0045	0.0047	0.2985	0.0367
	Rwanda_B4	99.5460	0.0105	0.0063	0.0056	0.3921	0.0395
	Rwanda_B11	99.6220	0.0051	0.0049	0.0065	0.3279	0.0336
	Rwanda_B14	99.5595	0.0227	0.0066	0.0032	0.3812	0.0267
Greenish blue	Rwanda_B5	99.5305	0.0090	0.0078	0.0038	0.4146	0.0343
	Rwanda_B6	99.6154	0.0061	0.0043	0.0040	0.3437	0.0266
	Rwanda_B7	99.6787	0.0226	0.0000	0.0043	0.2586	0.0359
	Rwanda_B8	99.6787	0.0089	0.0021	0.0027	0.2754	0.0322
	Rwanda_B10	99.4799	0.0223	0.0051	0.0032	0.4517	0.0378
	Rwanda_B12	99.6787	0.0226	0.0000	0.0043	0.2586	0.0359
	Rwanda_B13	99.4411	0.0203	0.0061	0.0072	0.4873	0.0379

ภาคผนวก จ

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องมือ EPMA ของพลอยแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง)

จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา จำนวน 6 ตัวอย่าง

Mineral phase analysis (wt%)	Low quality											
	Opaque dark blue											
	Rwanda_B5			Rwanda_B6			Rwanda_B7			Rwanda_B10		
	B5-1	B5-2	B5-3	B6-1	B6-2	B6-3	B7-1	B7-2	B7-3	B10-1	B10-2	B10-3
Al ₂ O ₃	98.93	98.54	98.96	99.66	99.57	99.85	99.19	99.34	99.30	98.771	99.182	98.663
MgO	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.015	0.002
TiO ₂	0.00	0.13	0.00	0.001	0.01	0.001	0.02	0.01	0.05	0.11	0.009	0.00
V ₂ O ₃	0.01	0.03	0.02	0.007	0.001	0.029	0.002	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.007	0.002	0.00	0.003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.008	0.018	0.00	0.00
FeO	0.40	0.58	0.43	0.405	0.529	0.477	0.46	0.55	0.59	0.47	0.51	0.32
K ₂ O	0.001	0.00	0.00	0.01	0.001	0.00	0.00	0.00	0.004	0.004	0.00	0.00
Ga ₂ O ₃	0.12	0.064	0.04	0.072	0.002	0.08	0.00	0.03	0.00	0.06	0.05	0.06
MnO	0.00	0.008	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.003	0.005	0.003	0.003
Total	99.50	99.37	99.45	100.15	100.11	100.50	99.69	99.92	99.97	99.43	99.76	99.05

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องมือ EPMA ของพลอยแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง)

จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา จำนวน 6 ตัวอย่าง (ต่อ)

Mineral phase analysis (wt%)	Low quality							
	Opaque dark blue							
	Rwanda_B12				Rwanda_B13			
	B12-zone1-1	B12-zone1-2	B12-zone2-1	B12-zone2-2	B13-1	B13-2	B13-3	
Al ₂ O ₃	98.51	98.82	98.76	98.72	98.32	98.75	98.71	
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TiO ₂	0.02	0.061	0.03	0.16	0.00	0.00	0.00	
V ₂ O ₃	0.005	0.005	0.008	0.004	0.00	0.00	0.008	
CaO	0.003	0.005	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.005	0.02	0.004	0.014	0.00	0.00	
FeO	0.25	0.29	0.42	0.31	0.44	0.45	0.44	
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005	
Ga ₂ O ₃	0.00	0.13	0.07	0.00	0.05	0.11	0.05	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.011	0.011	
Total	98.79	99.32	99.31	99.19	98.82	99.32	99.23	

หมายเหตุ เนื่องจากตัวอย่าง Rwanda_B8 มีรอยแตกมากและเกิดสีสนิมบริเวณขอบ จึงไม่นำมาตรวจวิเคราะห์

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องมือ EPMA ของพลอยแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางกู ประเทศรวันดา จำนวน 6 ตัวอย่าง

Mineral phase analysis (wt%)	Low quality											
	Greenish blue											
	Rwanda_B1			Rwanda_B2			Rwanda_B3			Rwanda_B4		
	B1-1	B1-2	B1-3	B2-1	B2-2	B2-3	B3-1	B3-2	B3-3	B4-1	B4-2	B4-3
Al ₂ O ₃	98.96	98.05	99.79	98.55	98.33	98.42	98.17	98.37	98.09	98.82	98.73	99.70
MgO	0.00	0.004	0.001	0	0	0.02	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003
TiO ₂	0.00	0.004	0.006	0.04	0.02	0.014	0.02	0.036	0.01	0.033	0.00	0.01
V ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.002	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.024	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.013	0.00	0.00	0.003	0.00	0.008	0.00
FeO	0.35	0.42	0.33	0.45	0.33	0.28	0.002	0.38	0.34	0.48	0.37	0.48
K ₂ O	0.00	0.002	0	0.00	0.002	0.00	0.00	0.006	0.00	0.00	0.00	0.00
Ga ₂ O ₃	0.01	0	0	0.031	0.04	0.015	0.00	0.05	0.03	0.10	0.11	0.031
MnO	0.01	0	0	0.00	0.00	0.019	0.01	0.01	0.00	0.05	0.01	0.02
Total	99.45	98.48	100.16	99.08	98.76	98.80	98.20	98.85	98.49	99.50	99.22	100.24

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยเครื่องมือ EPMA ของพลอยแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ (กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว)

จากแหล่งจางูกู ประเทศรวันดา จำนวน 6 ตัวอย่าง (ต่อ)

Mineral phase analysis (wt%)	Low quality						
	Greenish blue						
	Rwanda_B11			Rwanda_B14			
	B11-1	B11-2	B11-3	B14-zone1-1	B14-zone1-2	B14-zone2-1	B14-zone2-2
Al ₂ O ₃	98.47	98.61	98.82	98.43	98.74	98.48	98.66
MgO	0.00	0.00	0.007	0.00	0.00	0.00	0.005
TiO ₂	0.00	0.00	0.003	0.00	0.02	0.04	0.07
V ₂ O ₃	0.00	0.031	0.002	0.02	0.01	0.01	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.003	0.00	0.02
FeO	0.31	0.38	0.50	0.51	0.44	0.51	0.50
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004
Ga ₂ O ₃	0.00	0.04	0.08	0.02	0.02	0.00	0.05
MnO	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.00	0.00
Total	98.82	99.06	99.45	99.00	99.26	99.04	99.29

ภาคผนวก จ

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแชปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ

(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา

Element	B5_1	B5_2	B5_3	B6_1	B6_2	B6_3	B7_1	B7_2	B7_3
Li7	<0.56	<0.60	<0.62	<0.47	<0.50	<0.50	<0.58	<0.54	<0.53
Be9	7.52	4.42	<3.50	<2.56	<2.85	<2.59	<2.85	<3.28	<2.87
B11	28.5	26.63	28.48	9.92	13.77	22.36	16.31	16.53	19.21
Mg24	2.01	1.36	<1.03	<0.86	1.25	2.87	<1.11	2.83	3.08
Al27	523957.9	523957.8	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9
Si29	6505.7	6541.16	5285.04	4383.66	6602.62	4723.77	3304.45	3970.34	4869.88
Ca43	1196.45	1377.21	<1203.89	<883.92	<940.63	<966.83	<1008.42	<1051.27	<1015.85
Ti47	116.38	306.51	54.37	7.62	22.53	12.18	100.19	175.33	217.87
Ti49	173.59	437.67	69.51	<11.75	38.56	13.71	119.87	251.12	302.52
V51	5.36	5.08	3.05	1.82	1.6	2.62	2.16	2.73	2.74
Cr53	<8.98	<8.26	<9.29	<7.25	<7.53	<7.76	<8.26	<8.72	<8.82
Mn55	<2.21	<2.08	<2.35	<1.79	<1.90	<1.99	<2.04	<2.14	<2.13
Fe56	6252.58	6409.45	4518	3819.04	3676.16	3831.36	5052.84	4490.67	4837
Co59	<0.49	<0.47	<0.51	<0.40	<0.39	<0.44	<0.43	<0.48	<0.41
Ni60	<1.69	<1.50	<1.99	<1.40	<1.29	<1.56	<1.48	<1.62	<1.64
Cu65	<2.05	<1.82	<2.03	<1.60	<1.58	<1.81	<1.85	<1.87	<1.73
Zn66	<4.49	4.22	<4.59	<3.67	<3.59	<4.05	<4.35	<4.31	<4.54
Ga71	191.46	187.26	167.05	129.76	126.57	145.84	132.82	127.24	130.28
Ge72	<3.13	<3.05	<3.40	<2.62	<2.83	<2.98	<2.95	<3.11	<3.19
Rb85	<0.202	<0.212	<0.24	<0.179	<0.184	<0.169	<0.210	<0.211	<0.218
Sr88	<0.163	<0.151	<0.182	<0.152	<0.127	<0.150	<0.154	<0.152	<0.168
Y89	<0.182	<0.160	<0.196	<0.120	<0.164	<0.160	<0.172	<0.181	<0.173
Zr90	<0.34	0.35	<0.37	<0.25	<0.32	<0.31	<0.33	0.58	0.8
Nb93	79.54	102.46	<0.24	<0.157	<0.188	0.52	0.55	6.71	11.2

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ

(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B5_1	B5_2	B5_3	B6_1	B6_2	B6_3	B7_1	B7_2	B7_3
Mo95	<0.98	<0.98	<1.15	<0.88	<0.86	<0.97	<0.97	<1.08	<0.88
Sn118	2.85	3.39	<1.23	<0.94	<0.98	<1.01	<1.02	1.52	2.18
Ba137	<0.88	<0.83	<1.00	<0.78	<0.68	<0.99	<0.79	<0.92	<1.00
La139	<0.132	0.62	<0.142	<0.103	<0.101	<0.105	<0.104	<0.124	<0.122
Ce140	<0.100	1.55	<0.148	<0.088	<0.111	<0.11	<0.102	<0.107	<0.111
Pr141	<0.104	<0.107	<0.108	<0.081	<0.082	<0.089	<0.085	<0.087	<0.088
Nd146	<0.54	<0.57	<0.58	<0.45	<0.49	<0.48	<0.63	<0.62	<0.64
Sm147	<0.74	<0.66	<0.66	<0.54	<0.60	<0.66	<0.74	<0.67	<0.58
Eu153	<0.155	<0.173	<0.168	<0.115	<0.169	<0.144	<0.174	<0.192	<0.189
Gd157	<0.63	<0.63	<0.68	<0.62	<0.62	<0.60	<0.64	<0.69	<0.57
Tb159	<0.108	<0.097	<0.106	<0.082	<0.079	<0.080	<0.098	<0.101	<0.101
Dy163	<0.39	<0.37	<0.43	<0.32	<0.30	<0.34	<0.40	<0.40	<0.42
Ho165	<0.110	<0.104	<0.110	<0.090	<0.089	<0.090	<0.098	<0.079	<0.104
Er166	<0.29	<0.31	<0.42	<0.26	<0.29	<0.33	<0.27	<0.33	<0.31
Tm169	<0.080	<0.095	<0.092	<0.072	<0.080	<0.093	<0.088	<0.095	<0.096
Yb172	<0.37	<0.41	<0.46	0.32	<0.36	<0.39	<0.45	<0.38	<0.52
Lu175	<0.086	<0.080	<0.099	<0.085	<0.086	<0.094	<0.102	<0.094	<0.100
Hf178	<0.40	<0.36	<0.41	<0.33	<0.28	<0.36	0.35	<0.35	<0.42
Ta181	193.15	122.64	1.2	<0.102	0.47	5.28	4.03	57.51	90.99
W182	0.76	0.51	<0.55	<0.38	<0.39	<0.39	<0.55	<0.43	<0.49
Pb207	<0.66	<0.72	<0.86	<0.67	<0.63	<0.76	<0.75	<0.77	<0.76
Th232	0.163	5.19	<0.157	<0.104	<0.126	0.33	<0.117	<0.147	0.48
U238	<0.128	<0.094	<0.147	<0.081	<0.086	<0.099	0.093	<0.116	<0.102

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B8_1	B8_2	B8_3	B10_1	B10_2
Li7	<0.46	<0.49	<0.46	<0.59	<0.43
Be9	<2.58	<2.47	<2.87	<2.89	<2.30
B11	21.03	17.18	15.59	21.67	22.03
Mg24	1	<0.95	1.11	1.49	3.1
Al27	523957.9	523957.9	523957.8	523957.8	523957.8
Si29	4591.74	4882.32	4357.75	5073.91	3959.28
Ca43	<861.32	946.4	<935.51	1206.78	1070.3
Ti47	318.72	25.17	33.46	444.97	41.38
Ti49	449.24	24.88	54.34	610.57	47.79
V51	3.29	2.15	2.17	3.55	3
Cr53	<7.54	<7.98	<7.84	<9.57	<6.59
Mn55	<1.83	<1.94	<1.97	<2.39	<1.65
Fe56	3569.56	2918.29	2834.98	4790.25	3980.04
Co59	<0.40	<0.44	<0.45	<0.49	<0.38
Ni60	<1.41	<1.41	<1.77	<1.87	<1.23
Cu65	<1.54	<1.65	<1.72	<2.20	<1.43
Zn66	<3.54	<4.01	<3.86	<4.75	<3.16
Ga71	183.11	157.15	160.43	210.25	189.52
Ge72	<2.59	<3.02	<2.84	<3.59	<2.34
Rb85	<0.195	<0.214	<0.220	<0.263	<0.182
Sr88	<0.141	<0.158	<0.140	<0.167	<0.131
Y89	<0.164	<0.159	<0.135	<0.210	<0.145
Zr90	<0.29	<0.25	<0.32	<0.41	<0.30
Nb93	0.48	<0.174	<0.182	3	<0.157

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B8_1	B8_2	B8_3	B10_1	B10_2	B10_3
Mo95	<0.88	<0.89	<1.09	<1.12	<0.79	<1.20
Sn118	3.97	<0.98	1.46	3.19	<0.85	<1.35
Ba137	<0.75	<0.89	<0.92	<1.17	<0.73	<1.11
La139	<0.104	<0.116	<0.119	<0.128	<0.101	<0.166
Ce140	<0.095	<0.125	<0.123	<0.117	<0.095	<0.14
Pr141	<0.071	<0.083	<0.091	<0.100	<0.068	<0.107
Nd146	<0.43	<0.55	<0.57	<0.66	<0.41	<0.71
Sm147	<0.66	<0.69	<0.74	<0.76	<0.61	<0.75
Eu153	<0.147	<0.157	<0.131	<0.232	<0.129	<0.186
Gd157	<0.55	0.54	<0.62	<0.69	<0.53	<0.70
Tb159	<0.083	<0.086	<0.085	<0.105	<0.075	<0.136
Dy163	<0.35	<0.38	<0.40	<0.50	<0.35	<0.48
Ho165	<0.086	<0.077	<0.091	<0.123	<0.081	<0.103
Er166	<0.28	<0.36	<0.29	<0.41	<0.23	<0.40
Tm169	<0.079	<0.089	<0.103	<0.117	<0.080	<0.123
Yb172	<0.37	<0.46	<0.40	<0.40	<0.33	<0.45
Lu175	<0.088	<0.100	<0.097	<0.129	<0.089	<0.136
Hf178	<0.30	<0.35	<0.34	<0.33	<0.30	<0.42
Ta181	2.69	<0.098	<0.124	14.66	0.88	21.61
W182	<0.40	<0.44	<0.52	<0.61	<0.38	<0.60
Pb207	<0.66	<0.70	<0.65	<0.89	<0.54	<1.05
Th232	<0.115	<0.125	<0.114	<0.174	<0.107	<0.152
U238	<0.088	<0.095	<0.092	<0.141	<0.076	<0.139

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ

(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B12_1	B12_2	B12_3	B12_4	B13_1	B13_2	B13_3
Li7	<0.63	<0.37	<0.48	<0.67	<0.58	<0.50	<0.49
Be9	<2.77	14.92	<2.32	<3.21	<2.75	<2.69	<2.73
B11	12.45	12.93	11.93	<8.58	23.34	29.71	21.8
Mg24	2.16	10	2.2	2.06	0.83	<0.53	1.73
Al27	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9	523957.9
Si29	4545.35	3558.23	3465	2218.73	5502.83	4643.75	5850.09
Ca43	<1366.81	<819.05	<970.63	<1433.69	<1095.40	<953.02	<1001.28
Ti47	140.75	181.55	95.37	345.15	19.73	17.12	22
Ti49	215.76	282.23	129.83	518.67	25.7	23.56	32.04
V51	12.12	16.9	8.39	9.41	1.53	2.38	2.53
Cr53	21.82	11.43	39.05	36.93	<8.40	<7.47	<7.91
Mn55	<2.30	1.64	<1.68	<2.56	<2.04	<1.79	2.1
Fe56	3411.37	3912.56	2418.38	2863.02	4575.36	4965.48	5329.41
Co59	<0.50	<0.32	<0.39	<0.60	<0.44	<0.42	<0.39
Ni60	<1.81	<1.02	<1.20	<1.88	<1.32	<1.34	<1.38
Cu65	<2.25	<1.31	<1.60	<2.54	<1.78	<1.65	<1.80
Zn66	<5.26	4.06	<3.86	<5.19	<4.16	<3.65	<3.86
Ga71	194.48	179.44	135.63	187.1	165.61	171.45	177.03
Ge72	<3.30	<2.06	<2.41	<3.71	<2.90	<2.71	<2.69
Rb85	<0.250	<0.143	<0.180	<0.30	<0.244	<0.205	<0.200
Sr88	<0.170	<0.093	<0.114	<0.212	<0.152	<0.133	<0.128
Y89	<0.189	<0.118	<0.153	<0.225	<0.146	<0.146	<0.145
Zr90	<0.35	1.21	<0.236	<0.34	<0.25	<0.24	<0.28
Nb93	<0.179	411.43	<0.162	0.25	<0.166	<0.150	0.221

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ

(กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทึบแสง) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B12_1	B12_2	B12_3	B12_4	B13_1	B13_2	B13_3
Mo95	<1.20	<0.69	<0.90	<1.26	<0.85	<0.83	<0.85
Sn118	<1.17	1.32	<0.87	<1.34	<1.03	<0.94	<1.00
Ba137	<0.93	<0.49	<0.63	0.86	<0.88	<0.79	0.67
La139	<0.111	0.72	0.078	<0.141	<0.088	<0.093	<0.105
Ce140	<0.122	1.21	<0.091	<0.115	<0.087	<0.096	<0.093
Pr141	<0.095	0.139	<0.072	<0.124	<0.094	<0.074	<0.074
Nd146	<0.59	<0.31	<0.41	<0.62	<0.48	<0.46	<0.46
Sm147	<0.65	<0.36	<0.46	<0.58	<0.65	<0.51	<0.55
Eu153	<0.166	<0.098	<0.126	<0.217	<0.168	<0.134	<0.129
Gd157	<0.67	<0.39	<0.42	<0.73	<0.62	<0.52	<0.57
Tb159	<0.099	<0.064	<0.072	<0.106	<0.082	<0.073	<0.075
Dy163	<0.38	<0.222	<0.33	<0.45	<0.38	<0.31	<0.34
Ho165	<0.107	<0.073	<0.058	<0.127	<0.101	<0.089	<0.079
Er166	<0.34	<0.200	<0.239	<0.36	<0.28	<0.27	<0.30
Tm169	<0.093	<0.049	<0.056	<0.108	<0.080	<0.076	<0.097
Yb172	0.36	<0.23	<0.26	<0.56	<0.35	<0.38	<0.34
Lu175	<0.081	<0.060	<0.058	<0.086	<0.090	<0.086	<0.092
Hf178	<0.33	0.37	<0.29	<0.41	<0.33	<0.33	<0.32
Ta181	0.328	862.87	0.154	1.51	<0.115	<0.089	0.257
W182	<0.46	0.9	<0.37	<0.56	<0.51	<0.38	<0.45
Pb207	<0.81	<0.44	<0.61	<0.88	<0.72	<0.61	<0.59
Th232	<0.126	6.65	<0.091	<0.149	<0.118	<0.093	0.125
U238	<0.121	<0.075	<0.092	<0.145	<0.104	<0.084	<0.099

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา

Element	B1_1	B1_2	B1_3	B2_1	B2_2	B2_3	B3_1	B3_2	B3_3
Li7	<0.64	<0.69	<0.68	<0.66	0.38	<0.46	<0.49	<0.53	<0.50
Be9	<3.65	<3.04	<3.92	<3.02	<1.80	<2.63	<2.68	<3.00	<3.07
B11	10.17	7.84	<7.45	17.76	19.18	13.32	16.88	21.23	16.95
Mg24	<1.82	<1.23	<1.48	1.04	<0.66	<0.97	<0.77	<0.94	<0.98
Al27	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8
Si29	2427.22	6181.58	4254.93	5984.77	4255.66	5225.08	5295.61	6427.49	6440.71
Ca43	1459.4	1724.86	1261.36	<1085.32	<608.02	906.58	<891.81	<1012.19	<960.62
Ti47	19.94	14.33	<6.03	20.02	6.58	33.1	142.66	120.43	107.2
Ti49	30.72	18.67	11.26	24.94	<7.95	44.8	197.6	169.77	144.43
V51	1.07	1.02	1.37	2.08	1.91	2.02	2.81	2.53	2.73
Cr53	<8.72	<8.87	<9.64	<9.14	<5.13	<7.20	<7.69	<8.68	<7.87
Mn55	<2.29	<2.09	<2.41	<2.38	<1.33	<1.89	<1.97	<2.23	<2.07
Fe56	3488.86	2817.2	2495.88	3815.79	3025.01	2605.55	2809.35	2848.01	2713.82
Co59	<0.58	<0.51	<0.65	<0.53	<0.32	<0.39	<0.44	<0.54	<0.48
Ni60	<2.50	<2.16	<2.63	<2.01	<1.13	<1.54	<1.73	<1.87	<1.65
Cu65	<1.82	<1.93	<2.10	<2.03	<1.18	<1.78	<1.59	<1.97	<1.90
Zn66	9.61	<4.10	<3.96	<4.69	<2.64	<3.87	<4.14	<3.79	<4.38
Ga71	168.72	143.18	147.14	163.12	130.63	194.08	154.04	174.21	153.31
Ge72	<3.72	<3.48	<4.00	<3.53	<1.93	<2.73	<2.93	<3.19	<3.09
Rb85	<0.32	<0.30	<0.34	<0.25	<0.144	<0.224	<0.192	<0.252	<0.26
Sr88	<0.32	<0.208	<0.25	<0.180	<0.115	<0.120	<0.153	<0.161	<0.171
Y89	<0.195	<0.173	<0.26	<0.183	<0.114	<0.171	<0.178	<0.194	<0.185
Zr90	<0.45	<0.34	<0.44	<0.38	<0.24	<0.33	<0.29	<0.39	<0.37
Nb93	<0.234	<0.218	<0.26	<0.237	<0.123	<0.182	<0.218	<0.20	<0.226

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ

(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B1_1	B1_2	B1_3	B2_1	B2_2	B2_3	B3_1	B3_2	B3_3
Mo95	<1.19	<1.15	<1.37	<1.26	<0.72	<0.89	<0.90	<0.96	<1.05
Sn118	<1.30	<1.20	<1.39	1.18	0.99	<0.94	<0.98	<1.15	<1.11
Ba137	<1.57	<1.32	<1.56	<1.03	<0.64	<1.00	<0.86	<0.93	<0.92
La139	<0.145	<0.144	<0.183	<0.143	<0.076	<0.120	<0.129	<0.144	<0.122
Ce140	<0.158	<0.147	<0.175	<0.124	<0.069	<0.101	<0.100	<0.137	<0.109
Pr141	<0.134	<0.118	<0.132	<0.117	<0.061	<0.102	<0.084	<0.111	<0.093
Nd146	<0.70	<0.69	<0.68	<0.65	<0.41	<0.47	<0.54	<0.73	<0.54
Sm147	<0.83	<0.79	<0.95	<0.73	<0.43	<0.54	<0.70	<0.78	<0.84
Eu153	<0.237	0.229	<0.251	<0.183	<0.114	<0.151	<0.165	<0.215	<0.169
Gd157	<0.81	<0.84	<0.98	<0.73	<0.41	<0.61	<0.61	<0.67	<0.62
Tb159	<0.132	0.116	<0.155	<0.115	<0.064	<0.087	<0.074	<0.099	<0.077
Dy163	<0.67	<0.55	<0.62	<0.49	<0.28	<0.33	<0.35	<0.40	<0.42
Ho165	<0.120	<0.143	<0.129	<0.122	<0.073	<0.108	<0.092	<0.120	<0.108
Er166	<0.37	<0.39	<0.41	<0.35	<0.20	<0.27	<0.32	<0.33	<0.33
Tm169	<0.120	<0.130	<0.127	<0.115	<0.066	<0.089	<0.096	<0.089	<0.099
Yb172	<0.57	<0.62	<0.58	<0.55	0.32	<0.43	<0.38	<0.44	<0.39
Lu175	<0.141	<0.141	<0.174	<0.118	<0.071	<0.096	<0.106	<0.105	<0.112
Hf178	<0.50	<0.43	0.54	<0.48	<0.26	<0.39	<0.36	<0.35	<0.34
Ta181	<0.150	<0.140	<0.144	0.91	<0.084	0.84	0.97	0.59	0.42
W182	<0.60	<0.57	<0.68	<0.60	<0.35	<0.43	<0.46	<0.61	<0.55
Pb207	<1.02	<0.98	<0.95	<0.87	0.66	<0.72	<0.77	<0.90	<0.79
Th232	<0.178	<0.195	<0.194	<0.157	<0.098	<0.104	<0.148	<0.125	<0.113
U238	<0.144	<0.116	<0.120	<0.141	<0.070	<0.086	<0.097	<0.103	<0.126

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B4_1	B4_2	B4_3	B11_1	B11_2
Li7	<0.66	<0.71	<0.86	<0.68	<0.63
Be9	<2.95	<3.77	<3.65	<3.57	<3.13
B11	8.26	<7.15	<8.53	6.97	12.33
Mg24	1.41	<1.63	7.45	<1.22	0.91
Al27	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8
Si29	4769.63	1732.55	5726.07	4059.45	4963.94
Ca43	1344.89	<1148.13	<1242.95	<1000.98	1088.67
Ti47	32.17	27.14	39.6	15.09	15.93
Ti49	32.57	20.23	30.71	<10.39	16.64
V51	1.77	1.42	1.89	0.99	1.13
Cr53	<7.69	<9.18	<10.49	<8.76	<8.60
Mn55	<1.96	<2.26	<2.50	<2.14	3.72
Fe56	3360.15	3203.99	3456.51	2544.92	2600.91
Co59	<0.50	<0.58	<0.60	<0.61	<0.51
Ni60	<2.22	<2.12	<2.46	<2.07	<2.18
Cu65	<2.10	<2.31	<2.60	<2.16	<1.81
Zn66	3.95	<4.36	31.44	<4.00	<4.23
Ga71	171.66	157.24	177.07	145.56	126.94
Ge72	<3.41	<3.82	<4.04	<3.60	<3.26
Rb85	<0.25	<0.35	1.3	<0.31	0.42
Sr88	<0.202	<0.25	<0.242	<0.219	<0.175
Y89	<0.202	<0.192	<0.221	<0.189	<0.201
Zr90	<0.42	<0.43	<0.49	<0.41	<0.43
Nb93	<0.215	<0.28	<0.29	<0.242	<0.207

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B4_1	B4_2	B4_3	B11_1	B11_2
Mo95	<1.02	<1.29	<1.74	<1.30	<1.27
Sn118	<1.18	<1.33	<1.45	1.43	<1.21
Ba137	<1.08	<1.29	<1.26	<1.48	<1.19
La139	<0.150	<0.182	<0.199	<0.155	<0.133
Ce140	<0.133	<0.142	<0.161	<0.129	<0.137
Pr141	<0.125	<0.128	<0.135	<0.130	<0.119
Nd146	<0.62	<0.83	<0.80	1.12	<0.77
Sm147	<0.85	<0.92	<1.08	<0.82	<0.80
Eu153	<0.199	<0.216	<0.29	<0.219	<0.201
Gd157	<0.90	<0.97	<1.16	<0.89	<0.96
Tb159	<0.122	<0.122	<0.155	<0.122	<0.118
Dy163	<0.48	<0.63	<0.58	<0.59	<0.51
Ho165	<0.141	<0.127	<0.159	<0.132	<0.113
Er166	<0.37	<0.50	<0.48	<0.46	<0.40
Tm169	<0.134	<0.144	<0.150	<0.127	<0.127
Yb172	<0.59	<0.63	<0.61	<0.53	<0.47
Lu175	<0.115	<0.154	<0.146	<0.139	<0.143
Hf178	<0.43	<0.49	<0.56	<0.45	<0.47
Ta181	<0.162	<0.151	7.04	<0.130	0.205
W182	<0.60	<0.67	<0.81	<0.57	<0.53
Pb207	<0.72	<1.02	<1.09	<0.98	0.98
Th232	<0.163	<0.151	<0.165	<0.145	<0.145
U238	<0.120	<0.139	<0.144	0.133	<0.120

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B11_3	B14_1	B14_2	B14_3	B14_4
Li7	<0.62	<0.50	<0.49	<0.50	<0.50
Be9	6.68	<2.54	<2.60	<2.61	<2.74
B11	11.23	16.73	20.44	17.35	14.25
Mg24	<1.00	<0.96	<0.83	<0.94	0.84
Al27	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8	523957.8
Si29	5071.85	5939.46	5552.4	5848.88	6294.28
Ca43	1059.86	918.41	1350.55	<922.52	<895.92
Ti47	26.39	19.49	133.43	68.38	244.74
Ti49	29.54	21.33	170.35	102.53	316.92
V51	1.35	2.59	3.54	3.74	3.17
Cr53	<8.51	<7.28	<8.05	<7.56	<7.85
Mn55	<2.06	<1.89	<2.06	<2.08	5.17
Fe56	3360.36	3175.13	3716.71	3388.76	3301.86
Co59	<0.54	<0.42	<0.49	<0.46	<0.48
Ni60	<2.29	<1.48	<1.77	<1.75	<1.94
Cu65	<1.91	<1.76	<2.00	<1.87	<2.02
Zn66	<4.02	<3.73	<4.40	<3.83	<3.68
Ga71	147.26	120.9	137.99	134.09	137.59
Ge72	<3.24	<2.73	<3.01	<3.01	<2.97
Rb85	<0.31	<0.211	<0.215	<0.231	<0.230
Sr88	<0.193	<0.120	<0.154	<0.177	<0.155
Y89	<0.207	<0.146	<0.165	<0.18	0.156
Zr90	<0.41	<0.32	<0.37	<0.39	<0.37
Nb93	39.22	<0.194	<0.21	<0.210	0.44

องค์ประกอบทางเคมี (ppm) โดยเครื่อง LA-ICP-MS ของแซปไฟร์กลุ่มคุณภาพต่ำ
(กลุ่มสีน้ำเงินอมเขียว) ประเทศรวันดา (ต่อ)

Element	B11_3	B14_1	B14_2	B14_3	B14_4
Mo95	<1.20	<0.97	<1.07	<1.00	<0.93
Sn118	1.36	1.03	1.03	<0.99	<0.98
Ba137	1.08	<0.90	<0.99	<0.89	<0.95
La139	<0.122	<0.112	<0.140	<0.123	<0.125
Ce140	<0.162	<0.104	<0.113	<0.128	<0.100
Pr141	<0.129	<0.089	<0.084	<0.108	<0.091
Nd146	<0.62	<0.53	<0.66	<0.56	<0.58
Sm147	<0.95	<0.69	<0.66	<0.70	<0.75
Eu153	<0.203	<0.149	<0.151	<0.150	<0.180
Gd157	<0.83	<0.60	<0.75	<0.70	<0.67
Tb159	<0.126	<0.092	<0.088	<0.100	<0.103
Dy163	<0.51	<0.39	<0.39	<0.45	<0.39
Ho165	<0.116	<0.106	<0.114	<0.121	<0.111
Er166	<0.39	<0.28	<0.35	<0.31	<0.26
Tm169	<0.147	<0.094	<0.115	<0.109	<0.117
Yb172	<0.51	<0.35	<0.45	<0.48	<0.43
Lu175	<0.137	<0.083	<0.119	<0.123	<0.11
Hf178	<0.47	<0.38	<0.37	<0.37	<0.40
Ta181	163.75	<0.117	0.84	0.254	1.38
W182	<0.62	<0.48	<0.50	<0.53	<0.54
Pb207	<0.80	<0.69	<0.77	<0.74	<0.77
Th232	<0.172	<0.120	<0.135	<0.151	<0.138
U238	<0.129	<0.102	<0.110	<0.117	<0.103