

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การวิจัยด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเชิงลึกของวัสดุอัญมณี:
ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอรัันดัม

โดย

รศ.ดร. วิสุทธิ์	พิสุทธอาภรณ์	หัวหน้าโครงการ
ผศ.ดร. พรสวาท	วัฒน์กุล	ที่ปรึกษาโครงการ
น.ส. ชนิษา	สมบัติ	นักวิจัย และเลขานุการ
นาย ชาล	ศานติदानนท์	นักวิจัย
น.ส. นาร์วี	สุเสวี	นักวิจัย

ได้รับเงินสนับสนุนจาก

สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
สิงหาคม 2551

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การวิจัยด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเชิงลึกของวัสดุอัญมณี:
ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอร์ันดัม

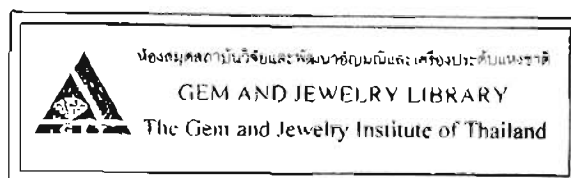
โดย

รศ. ดร. วิสุทธิ	พิสุทธอนนท์	หัวหน้าโครงการ
ผศ. ดร. พรสวาท	วัฒนกุล	ที่ปรึกษาโครงการ
น.ส. ชนียา	สมบูรณ์	นักวิจัย และเลขานุการ
นาย ชาญ	ศานติदानนท์	นักวิจัย
น.ส. นารี	สุเสวี	นักวิจัย

ได้รับเงินสนับสนุนจาก

สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

สิงหาคม 2551



สัญญาเลขที่ RM 21/2549

”โครงการวิจัยด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเชิงลึกของวัสดุอัญมณี:
ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอร์ันดัม”
สรุปรายงานฉบับสมบูรณ์ (เป็นรายงานครั้งที่ 5)

รายงานการวิจัยในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2549 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2550
ช่วงประเมินผลงาน แก๊ซ และ จัดพิมพ์ฉบับสมบูรณ์ ถึงวันที่ 31 สิงหาคม 2551
ชื่อหัวหน้าโครงการ : รศ ดร วิสุทธิ์ พิสุทธิอนันท์
หน่วยงาน : ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาสาเหตุของการเกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัม (แซปไฟร์สีเหลือง) ก่อนและหลังเผา

อุปสรรคที่พบในการดำเนินงาน

- ไม่พบอุปสรรคที่เป็นสาระสำคัญในการดำเนินงาน
 มี (โปรดระบุ)

ในช่วง 2 ปีที่ดำเนินการวิจัย ได้นำผลงานวิจัยบางส่วนไปเผยแพร่ดังนี้ (ดูบทความในภาคผนวก)

1. เสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการอัญมณีระดับนานาชาติ the 1st GIA Gemological Research Conference เมื่อเดือน สิงหาคม 2549 ที่เมือง San Diego ประเทศสหรัฐอเมริกา และตีพิมพ์บทความในวารสารวิชาการอัญมณีระดับนานาชาติ Gem & Gemology

Pisutha-Ammond, V., Häger, T., Wathanakul, P., Atichat, W., Nattachai, J., Win, T.T., Sutthirat, C., and Sriprasert, B., 2006. Role of beryllium in the coloration of Fe- and Cr-doped synthetic corundum. Gem & Gemology, 42(3), 85 (Abstract)

2. เสนอผลงานวิจัย ในการประชุมวิชาการอัญมณีระดับนานาชาติ “The 1st International Gem and Jewelry Conference (GIT2006)” เมื่อวันที่ 6 ธันวาคม 2549 ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ และตีพิมพ์บทความอย่างยาวใน proceedings ของการประชุม

Pisutha-Armond, V., Somboon, C., Atichat, W., Wathanakul, P., Sutthirat, C., Sriprasert, B., and Win, T.T., 2006., **Heating and irradiation experiments on tinted yellow sapphires containing different iron contents.** Proceedings of the 1st International Gem and Jewelry Conference (GIT 2006), Bangkok and Chanthaburi, 6-9 December 2006, p.42 (Extended Abstract)

3. ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานผลวิจัย ในวารสารวิชาการอัญมณีระดับนานาชาติ
Journal of Gemmology

Pisutha-Armond, V., Häger, T., Atichat, W., Wathanakul, P., 2006. **The role of Be, Mg, Fe and Ti in causing colour in corundum.** Journal of Gemmology, 30(3/4), 131-143


4. เสนอผลงานวิจัย ในการประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ AOGS2007 เมื่อวันที่ 31 สิงหาคม 2550 ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ และตีพิมพ์บทความอย่างยาวใน proceedings ของการประชุม

Pisutha-Armond, V., Somboon, C., Hansawek, R., Atichat, W., Wathanakul, P., Sutthirat, C., and Win, T., 2007. **Heat treatment of yellow 'basaltic' sapphires from Chanthaburi Province, Eastern Thailand.** AOGS2007, Bangkok, (Abstract)

5. เสนอผลงานวิจัยในการสัมมนาทางวิชาการระดับชาติ เรื่อง “เทคโนโลยีอัญมณีไทย ก้าวไกลอย่างยั่งยืน” เมื่อวันที่ 17 กันยายน 2550 และตีพิมพ์บทความทางวิชาการในเอกสารประกอบการสัมมนา

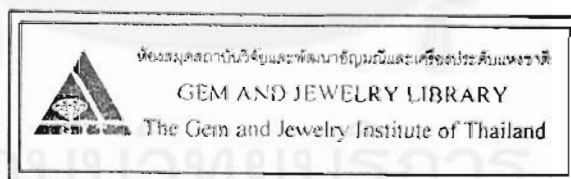
รศ. ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธอนันท์, ชนียา สมบุญ, Dr. T. Häger, วิลาวัณย์ อติชาติ, จิตริน ัญญาชชัย, รัก ธรรมชาติ, ผศ. ดร. พรสวาท วัฒนกุล, Ms Tin Tin Win, ผศ.ดร. จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, บุญทวี ศรี ประเสริฐ, ทนง สีลาวัฒนสุข, 2550. การเกิดสีเหลืองของพลอยบุษราคัมโดยกระบวนการเผา. เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีอัญมณีไทย ก้าวไกลอย่างยั่งยืน หน้า 85-97

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลงนาม 
(รศ. ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธอนันท์)
หัวหน้าโครงการฯ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวิจัยด้านเทคโนโลยีขั้นสูงเชิงลึกของวัสดุอัญมณี:
ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอร์รันดัม
(1 มกราคม 2549 – 31 ธันวาคม 2550)



โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ
(องค์การมหาชน)
รหัสโครงการ RM21/2549
สิงหาคม 2551

คำนำ

โครงการวิจัย ปฏิสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยกับการเกิดสีในพลอยคอร์ันดัม มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสาเหตุของการเกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัม (แซปไฟร์สีเหลือง) ก่อนและหลังเผา ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้ ประกอบด้วยผลงานวิจัยจำนวน 6 บท ในบทที่ 1 เป็นบทนำที่กล่าวถึงทฤษฎีของการเกิดสีที่สัมพันธ์กับธาตุร่องรอยในพลอยคอร์ันดัม โดยเน้นถึงสาเหตุของการเกิดสีเหลืองที่มีผู้ได้ศึกษาวิจัยไว้แล้ว ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย และขั้นตอนการวิจัย ในบทที่ 2 เป็นการศึกษาพลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือที่เรียกว่า “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร” จากศรีลังกา จำนวน 5 ตัวอย่าง ในบทที่ 3 เป็นการศึกษาพลอยบุษราคัม ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่เรียกว่า “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” จากแหล่งพลอยบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จำนวน 5 ตัวอย่าง และพลอยบุษราคัม จาก แหล่งพลอยบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี อีก 1 ตัวอย่าง ในบทที่ 4 เป็นการศึกษาพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแอมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์) จากแหล่งพลอยบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จำนวน 7 ตัวอย่าง ในบทที่ 5 เป็นการศึกษาพลอยแซปไฟร์ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อนที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน จากแหล่งพลอยอิลาကာ ประเทศมาดากัสการ์ จำนวน 12 ตัวอย่าง ในบทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ รายงานฉบับสมบูรณ์นี้ได้ทำการแก้ไขเพิ่มเติมตามข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในท้ายที่สุด

รศ. ดร. วิสุทธิ์ พิสุทธิอานนท์
หัวหน้าโครงการ
สิงหาคม 2551

บทสรุปผู้บริหาร

ในบทที่ 1 ได้กล่าวถึงทฤษฎีของการเกิดสีเหลืองที่เสถียรในพลอยบุษราคัมที่มีผู้ได้เคยศึกษามาก่อนว่ามี 2 สาเหตุหลัก สาเหตุแรก คือ สีเหลืองเกิดจากจุดบกพร่อง (defect centres) ในโครงสร้างผลึก Al_2O_3 ทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนบางช่วงคลื่นแล้วปรากฏเป็นสีเหลืองออกมาให้เห็น หรือที่รู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า “ศูนย์กลางสี (color centres)” สาเหตุที่สอง คือ สีเหลืองเกิดจากการย้ายตำแหน่งพลังงานของ Fe^{3+} (spin forbidden transitions of Fe^{3+}) แล้วทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนปรากฏเป็นสีเหลืองออกมาให้เห็นเช่นกัน ในที่นี้จะขอเรียกง่าย ๆ ว่า “สีเหลืองเกิดจาก Fe^{3+} ”

ในบทที่ 2 เป็นการศึกษาเรื่องการเกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือที่เรียกว่า “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร” ได้แก่ พลอยบุษราคัมเมापกติ จากศรีลังกา จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยนำมาเผาถนอบสีครั้งที่ 1 ในสภาวะการเผาแบบขาดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}C$ เป็นเวลา 5 ชั่วโมงแล้ว ปรากฏว่าสีของตัวอย่างทั้งหมดเปลี่ยนจากสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลเป็นใสไม่มีสี หลังจากนั้นได้ทำการเผาเพิ่มสีครั้งที่ 2 ในสภาวะการเผาแบบออกซิเจนพอเพียง ที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมงแล้ว พบว่าสีกลับมาเป็นเหลืองทองเหมือนเดิม และเมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสีดังกล่าว กับรูปแบบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นยูวีถึงช่วงคลื่นตามองเห็น ทราบว่าสีเหลืองดังกล่าว มีสาเหตุมาจากจุดความบกพร่อง (defect centers) ในโครงสร้าง Al_2O_3 หรืออาจเรียกว่าศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centres) นั่นเอง ซึ่งเกิดได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนพอเพียงเท่านั้น แสดงว่าออกซิเจนก็มีส่วนทำให้เกิดศูนย์กลางสีดังกล่าว ส่วนผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุร่องรอยหลังเผาด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ยืนยันว่ามีปริมาณธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบอยู่ค่อนข้างต่ำ ($Fe < 500 \text{ ppm}$) พบอีกว่าพลอยส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio มากกว่า 2:1 ทำให้ทราบว่าศูนย์กลางสีที่เกิดขึ้นนั้น เพราะ มีธาตุแมกนีเซียมที่เหลือนมากเกินไป (หลังจากที่ไปจับกับ Ti เป็น $MgTiO_3$ clusters ที่ไม่มีสีแล้ว) ร่วมกับธาตุเหล็ก ทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร หรือที่ได้มีการเรียกขานกันอีกชื่อหนึ่งว่า “ศูนย์กลางสีที่ตรึงโดยแมกนีเซียม (Mg-trapped hole colour centres)” สีเหลืองดังกล่าวสามารถกำจัดได้ด้วยการเผาในสภาวะขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง

ในบทที่ 3 เป็นการศึกษาการเกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัม ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่เรียกว่า “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” ได้แก่ พลอยบุษราคัมสดสีเหลืองอ่อนจากอำเภอบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จำนวน 5 ตัวอย่าง และพลอยแซปไฟร์สดไร้สี จาก อำเภอบ่อพลอย จังหวัดจันทบุรี อีก 1 ตัวอย่าง โดยนำพลอยดังกล่าว มาเผาที่อุณหภูมิ $1,600 - 1,650^{\circ}C$ ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง เป็นเวลา 6 - 10 ชั่วโมง พบว่าสามารถเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนถึงไม่มีสีเป็นสี

ใสหรือขาวขุ่นได้ด้วยการเผาในสภาวะขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง (สีเหลืองแม่โขง) หลังเผาอย่างเด่นชัด และเมื่อตรวจสอบการ

หมายเลขหนังสือ	บ00000301
ทะเบียน	15/10/2551
ปก	TS 756 .n27 2551
ห้องสมุด	
ศูนย์วิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ	

เปลี่ยนแปลงของสีดังกล่าว กับสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นยูวีถึงช่วงคลื่นตามองเห็น ทำให้ทราบว่า ในส่วนของสีเหลืองน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นจากการเผาดังกล่าว มีสาเหตุมาจากความบกพร่องในโครงสร้าง Al_2O_3 หรือ เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรเช่นเดียวกัน ส่วนผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุร่องรอยหลังเผา ยืนยันว่ามีปริมาณธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ($\text{Fe} > 1,000 \text{ amp}$) และ พบว่าพลอยส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio ประมาณ 2:1 แสดงว่ามีธาตุแมกนีเซียมเหลือมากพอที่ทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้ ดังนั้นพลอยเผาสีเหลืองทอง คือผลรวมของสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} ซึ่งมีปริมาณสูงในตัวของมันเองอยู่แล้วส่วนหนึ่ง ผสมกับสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรที่เพิ่มขึ้นหลังเผาอีกส่วนหนึ่ง แต่ทั้งนี้จะต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง

ในบทที่ 4 เป็นการศึกษาการเกิดสีเหลืองในพลอยแซฟไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์) ได้แก่ พลอยสดสีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง จากอำเภอบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จำนวน 7 ตัวอย่าง โดยนำพลอยดังกล่าว มาเผาถึง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ $1,600^\circ\text{C}$ เป็นเวลารวมกันถึง 44 ชั่วโมง ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง พบว่าไม่สามารถเผาให้เปลี่ยนสีได้ ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุร่องรอยหลังเผา ยืนยันว่ามีปริมาณธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ($\text{Fe} > 1,000 \text{ amp}$) เช่นเดียวกัน และพบอีกว่าพลอยทั้งหมดมี Mg:Ti ratio ประมาณหรือน้อยกว่า 1:1 ทำให้ทราบว่าพลอยดังกล่าวไม่มีธาตุแมกนีเซียมเหลือพอที่จะไปทำให้เกิดศูนย์กลางสีที่เสถียรได้ แต่ส่วนใหญ่มีธาตุไทเทเนียมเหลือมากพอที่จะไปทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียว (Cyan) อันเนื่องมาจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ Inter-Valence Charge Transfer (IVCT) transitions และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ดังนั้นสีเหลืองอ่อนที่พบในพลอยกลุ่มนี้เกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลัก ซึ่งเมื่อรวมกับสีน้ำเงินเขียว ทำให้พลอยดังกล่าวปรากฏเป็นสีเขียว

ในบทที่ 5 เป็นการศึกษาการเกิดสีเหลืองในพลอยแซฟไฟร์ที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน ได้แก่ พลอยแซฟไฟร์ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จากแหล่งพลอย อิลากาภา ประเทศมาดากัสการ์ จำนวน 12 ตัวอย่าง โดยนำพลอยดังกล่าว มาเผาถึง 3 ครั้ง ที่อุณหภูมิ $1,600^\circ\text{C}$ เป็นเวลารวมกันถึง 44 ชั่วโมง ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง พบว่าตัวอย่างพลอยไร้สีที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($\text{Fe} < 500 \text{ amp}$) สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลได้โดยง่าย และสีเหลืองทองดังกล่าวเกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียรเช่นเดียวกัน พบอีกว่าส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio มากกว่า 2:1 ทำให้ทราบว่าปริมาณของธาตุแมกนีเซียมเหลือมากพอ ที่ไปทำหน้าที่ตรึงศูนย์กลางสีให้เสถียรได้ (Mg-trapped hole colour centres) สำหรับตัวอย่างพลอยไร้สีถึงสีเหลืองอ่อนที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลาง ($\text{Fe} \sim 500-1,000 \text{ amp}$) ถึงสูง ($\text{Fe} > 1000 \text{ amp}$) พบว่าสีแทบไม่เปลี่ยนหลังเผา ในพลอยกลุ่มนี้ พบว่าส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 2:1 แสดงว่ามีปริมาณธาตุ Mg เหลือไม่มากพอที่จะไปทำหน้าที่ตรึงศูนย์กลางสีให้เสถียรได้ ดังนั้นสีเหลืองอ่อนถึงอ่อนมากในพลอยกลุ่มนี้เกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลัก เช่นเดียวกัน

ในบทที่ 6 เป็นบทสรุป ว่าพลอยแซปไฟร์ที่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้ดัดนั้น ควรต้องมี Mg:Ti ratio มากกว่าประมาณ 2:1 ในกรณีที่พลอยมี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่าง 2:1 และ 1:1 นั้น อาจมีพลอยบางเม็ดโดยเฉพาะเม็ดที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($Fe < 500 \text{ amp}$) ที่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้บ้าง สำหรับพลอยที่มี Mg:Ti ratio ประมาณ 1:1 นั้น ไม่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้เลย พลอยดังกล่าวจะไม่มีสีถ้ามีปริมาณธาตุเหล็กต่ำกว่าประมาณ 1500 amp แต่จะมีสีเหลืองอ่อนที่เข้มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีปริมาณธาตุเหล็กมากกว่า 1500 amp สำหรับพลอยที่มี Mg:Ti ratio น้อยกว่า 1:1 จะมีสีน้ำเงินเขียว (Cyan) เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ซึ่งถ้าพลอยดังกล่าวมีปริมาณธาตุเหล็กสูงจะปรากฏเป็นสีเหลืองแกมเขียว ถึงสีเขียวแกมเหลือง



คำขอบคุณ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (สวอ) องค์การมหาชน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ท่านผู้อำนวยการฯคนปัจจุบัน คุณวิลาวัลย์ อติชาติ และท่านอดีตผู้อำนวยการฯ ศาสตราจารย์ คักดา ศิริพันธ์ ที่ได้เห็นความสำคัญของงานวิจัย และส่งเสริมสนับสนุนการวิจัยนี้อย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณ คุณรัก หรรษาเวก จากส่วนส่งเสริมและสนับสนุนทางวิชาการ สำนักทรัพยากรแร่ กรมทรัพยากรธรณี และคุณ เมธี จิงสงวนสิทธิ์ กรรมการผู้จัดการ บริษัทเวิลด์แซปไฟร์จำกัด ที่ได้ให้ยืมตัวอย่างพลอยบางส่วนมาทำการวิจัย ขอขอบคุณ ผู้ประกอบการทำเหมืองพลอย ที่ อ. บางกะจะ จ. จันทบุรี ที่ได้มอบตัวอย่างพลอยก้อนบางส่วนมาทำการวิจัย ขอขอบคุณ Ms Tin Tin Win และ Ms Suzy Elhlou จาก GEMOC Key centre, Macquarie University, Australia ที่ได้ช่วยวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รศ. ดร. วิสutti พิสุทธิอนันท์
หัวหน้าโครงการ
สิงหาคม 2551

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 เกริ่นนำ	1
1.2 การเกิดสีกับธาตุร่องรอย	2
1.3 การเกิดสีเหลืองกับธาตุร่องรอย	3
1.4 บทบาทของธาตุแมกนีเซียมและเหล็กกับการเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร	7
1.5 ที่มา ปัญหาที่ทำการวิจัย: การเกิดสีของพลอยบุษราคัมเผาเก่า	8
1.6 ขั้นตอนการวิจัย	9
บทที่ 2 พลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร)	10
2.1 บทนำ	10
2.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน	10
2.3 ผลการทดลองเผา	12
2.4 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	14
2.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง LA-ICP-MS	19
2.6 อภิปรายผล	30
บทที่ 3 พลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์)	35
3.1 บทนำ	35
3.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน	35
3.3 ผลการทดลองเผา	37
3.4 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	39
3.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง LA-ICP-MS	48
3.6 อภิปรายผล	60

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ฟลอยแซปไฟรส์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์)	65
4.1 บทนำ	65
4.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน	65
4.3 การทดลองเผา	67
4.4 ผลของการทดลองเผา	67
4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	70
4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่อง LA-ICP-MS	78
4.7 อภิปรายผล	91
บทที่ 5 ฟลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน	95
5.1 บทนำ	95
5.2 สมบัติพื้นฐาน	95
5.3 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS กับ EDXRF	97
5.4 การทดลองเผา	99
5.5 ผลการทดลองเผา	99
5.6 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR	104
5.7 ผลวิเคราะห์เครื่องมือ LA-ICP-MS อย่างละเอียด	117
5.8 อภิปรายผล	145
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	147
6.1 บทสรุป	147
6.2 ข้อเสนอแนะ	149
6.3 เอกสารอ้างอิง (References)	152

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ก. The role of Be, Mg, Fe and Ti in causing colour in corundum

สารบัญ (ต่อ)

ภาคผนวก

- ภาคผนวก ข. Heating and Irradiation Experiments on tinted yellow sapphires containing different iron contents.
- ภาคผนวก ค. Role of beryllium in the coloration of Fe- and Cr-doped synthetic corundum.
- ภาคผนวก ง. Heat treatment of yellow 'basaltic' sapphires from Chanthaburi Province, Eastern Thailand.
- ภาคผนวก จ. การเกิดสีเหลืองของพลอยบุษราคัมโดยกระบวนการเผา



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงพลอยบุษราคัมสด จากเขาพลอยแหวน จ. จันทบุรี ที่มีสีเหลืองอ่อน	4
รูปที่ 1.2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ของพลอยบุษราคัมสด จาก เขาพลอยแหวน จ.จันทบุรี	4
รูปที่ 1.3 แสดงพลอยบุษราคัมเผาด้วยวิธีปรกติ จากประเทศศรีลังกา ขนาด 0.48 ct	6
รูปที่ 1.4 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยบุษราคัมเผาปรกติจากศรีลังกา	6
รูปที่ 1.5 แสดงพลอยคอร์นดัมสังเคราะห์ด้วยวิธีเวอร์นอยล์ (Verneuil or flame-fusion) ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียว ปรากฏออกมาเป็นสีม่วงอมน้ำตาล (a, รูปซ้าย) และใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมและเหล็ก ปรากฏออกมาเป็นสีเหลือง	7
รูปที่ 1.6 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยคอร์นดัม สังเคราะห์ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมและเหล็ก กับของพลอยบุษราคัม เผาปรกติจากศรีลังกา	8
รูปที่ 2.1 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC1) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สี หลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็น สีเหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)	12
รูปที่ 2.2 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC2) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สี หลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสี เหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)	12
รูปที่ 2.3 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC3) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สี หลังเผา ครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสี เหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)	13
รูปที่ 2.4 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC4) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สี หลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสี เหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)	13
รูปที่ 2.5 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC5) มีสีเหลือง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สี หลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสี เหลืองทอง เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)	13
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC1 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่ อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	14

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.7 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC1 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมหลังการทดลอง ออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.6	15
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC2 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่ อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	15
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC2 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัม หลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.8	16
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC3 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่ อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	16
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC3 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัม 17 หลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.10	
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC4 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	17
รูปที่ 2.13 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC4 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัม 18 หลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.12	
รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC5 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	18
รูปที่ 2.15 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC5 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัม หลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.14	19
รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอย บุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	21

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC1 ในรูปที่ 2.16 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 85-120 \text{ amp}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti = 36-64 \text{ amp}$)	21
รูปที่ 2.18 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	23
รูปที่ 2.19 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC2 ในรูปที่ 2.18 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 90-310 \text{ amp}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากเกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 17-23 \text{ amp}$) ยกเว้นจุดที่ 3 ซึ่งมีน้อยกว่าเล็กน้อย ($Mg-Ti \sim -5 \text{ amp}$)	23
รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกาตัวอย่าง PC3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	25
รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC3 ในรูปที่ 2.20 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 185-245 \text{ amp}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียม มากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 27-66 \text{ amp}$)	25
รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอย บุษราคัมศรีลังกาตัวอย่าง PC4 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	27
รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC4 ในรูปที่ 2.22 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 90-115 \text{ amp}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 18-30 \text{ amp}$)	27
รูปที่ 2.24 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกาตัวอย่าง PC5 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	29
รูปที่ 2.25 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC5 ในรูปที่ 2.24 จากผลวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 30-350 \text{ amp}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากเกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 35-54 \text{ amp}$) ยกเว้นจุดที่ 5 ที่มีมากกว่าเพียงเล็กน้อย ($Mg-Ti \sim 4 \text{ amp}$)	29

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยในระบบ Al-Mg-Fe-Ti จากรูปเหล็ยมสี่ด้านถ้าตัดขนานกับด้านฐานจะได้รูปสามเหลี่ยมที่เป็นเสมือนตัวแทนปริมาณธาตุในคอร์รันดัมในระดับ ppm รูปสามเหลี่ยมทางด้านซ้าย (A) แทนแซปไฟร์เผาที่อุณหภูมิ 1850°C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง ส่วนรูปทางขวา (B) แทนแซปไฟร์เผาที่อุณหภูมิ 1750°C ในสภาวะขาดออกซิเจน	32
รูปที่ 2.27 แสดงข้อมูลผลวิเคราะห์ในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยบุษราคัมศรีลังกา (PC1-5) ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร	33
รูปที่ 2.28 แสดงข้อมูลผลวิเคราะห์ ใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยบุษราคัมศรีลังกา (ตัวอย่าง PC1-5 จากการศึกษาในครั้งนี้ และตัวอย่าง YSR1H ที่เผาแล้วของ คุณ รัก ธรรมชาติ) ที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำหรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร	34
รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบสีพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH1 ที่ตัดแบ่งเป็นสองชิ้น ชิ้นเล็กทางซ้าย คือพลอยก่อนเผาสีเหลืองอ่อนเก็บไว้สำหรับการเปรียบเทียบส่วนชิ้นใหญ่ทางขวา คือพลอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศปรกติ ปรากฏเป็นสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง)	37
รูปที่ 3.2 พลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH2 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้ายแสดงสีก่อนเผาและก่อนเจียรระโน) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,600°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศปรกติ (รูปขวาหลังจากเจียรระโน)	38
รูปที่ 3.3 พลอยบุษราคัมบางกะจะสด ตัวอย่าง YCH3 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์	38
รูปที่ 3.4 พลอยบุษราคัมบางกะจะสดที่มีแถบสีเขียวน้ำเงิน ตัวอย่าง YGCH1 มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา) โปรดสังเกตแถบสีเขียวที่สีจางลงเล็กน้อยหลังเผา	38

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 พลอยบุษราคัมบางกระจะสดที่มีแถบสีน้ำเงินเขียว ตัวอย่าง YGCH2 มีแถบสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแมงโง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศ ออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา)	39
รูปที่ 3.6 พลอยแซปไฟร์สดจากกาญจนบุรี ตัวอย่าง YKB2 ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาล ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา)	39
รูปที่ 3.7 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกระจะชิ้นใหญ่ในรูปที่ 3.1 (YCH1) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมก่อนเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร สเปกตรัมหลังเผา แสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และ ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรของ Fe^{3+}	40
รูปที่ 3.8 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผา ออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.7 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการ ยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่ปีกที่ประมาณ 460 นาโนเมตร เส้นที่ไม่เรียบบริเวณ 450 นาโนเมตร น่าจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนจากการวัด	41
รูปที่ 3.9 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกระจะในรูปที่ 3.2 (YCH2) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม(สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมทั้งก่อนและ หลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และสเปกตรัม หลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี	41
รูปที่ 3.10 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัด ก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.9 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือยังคง แสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวีถึงแม้ว่าการวัดสเปกตรัมของพลอยเม็ดนี้ จะมีความคลาดเคลื่อนสูง(สาเหตุอาจเกิดจากการวางตัวอย่างการวัดก่อนและหลังเผาที่ไม่ใช่ ที่ตำแหน่งเดียวกันหรือสภาวะการวัดที่ต่างกัน) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความผิดปกติได้ จากปีกที่เป็นลบ (negative peak) ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร (ถ้าเป็นปีกจริงควรจะเป็น ปีกที่เป็นบวกมากกว่า เพราะทำการเผาพลอยในสภาวะออกซิเจนพอเพียง ดังนั้น Fe^{2+} ที่อาจ จะมียูในพลอยก่อนเผาน่าจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Fe^{3+} หลังเผามากขึ้น ทำให้ เมื่อหักลบ ปีกการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร น่าจะเพิ่มขึ้นหลังเผา)	42

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.11 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.3 (YCH3) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และ วัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผา แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรและสเปกตรัมหลังเผาแสดง การยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี	42
รูปที่ 3.12 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH3) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผา ออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.11 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการ ยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่พีกเล็กน้อยที่ประมาณ 460 นาโนเมตร โปรดสังเกตว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย	43
รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.4 (YGCH1) ที่วัดตรงส่วนสีเหลืองก่อนเผา (สีน้ำเงินเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีดำเส้นบน) สเปกตรัม ก่อนเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร สเปกตรัมหลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวีและ ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรของ Fe^{3+}	43
รูปที่ 3.14 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัด ก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.13 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือ แสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี โปรดสังเกตว่าไม่ปรากฏพีก ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย	44
รูปที่ 3.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.4 (YGCH1) ที่วัดตรงแถบสีเขียวก่อนเผา (สีน้ำเงินเส้นบน) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีดำเส้นล่าง) สเปกตรัม ก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการ ดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ และ $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ charge transfers ที่มี จุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ สเปกตรัมหลังเผาแสดง การดูดกลืน ลดลงเล็กน้อยที่เกิดจาก charge transfers ดังกล่าว	44
รูปที่ 3.16 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดหลังเผา ออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังก่อนในรูปที่ 3.15 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดง การดูดที่ที่เกิดจาก $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ และ $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ charge transfers โปรดสังเกต	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยบุษราคัมบางกระจะในรูปที่ 3.5 (YGCH2) ที่วัดก่อนเผา (เส้นสีดำ) และ วัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผาแสดง การดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีขนาดเล็ก จึงไม่สามารถวัดแถบสีเหลืองแยกจากแถบสีเขียวได้ สเปกตรัมที่ได้จึงเป็นส่วนผสม ของทั้งสองสี และตำแหน่งที่วัดสเปกตรัมก่อนและหลังเผาอาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อย	45
รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผา ออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.17 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการ ดูดที่เกิดจาก $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ charge transfers	46
รูปที่ 3.19 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง พลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีในรูปที่ 3.6 (YKB2) ที่วัดก่อนเผา (เส้นสีดำ) และ วัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผา แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377นาโนเมตรเล็กน้อย เพราะปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างนี้มีน้อยกว่าของตัวอย่างพลอยบางกระจะ	46
รูปที่ 3.20 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YKB2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผา ออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.19 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดง การยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี	47
รูปที่ 3.21 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 6 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมบางกระจะ ตัวอย่าง YCH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	48
รูปที่ 3.22 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH1 ในรูปที่ 3.21 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~2700- 2900 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti = ~7-9 amp)	48
รูปที่ 3.23 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมบางกระจะ ตัวอย่าง YCH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	50
รูปที่ 3.24 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH2 ในรูปที่ 3.23 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~3,100- 3,300 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 8-9 amp)	50

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.25 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมบางกระจะ ตัวอย่าง YCH3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	52
รูปที่ 3.26 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH3 ในรูปที่ 3.25 พบว่ามีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~3,600 - 3,800 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 9-10 amp)	52
รูปที่ 3.27 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 8 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมบางกระจะ ตัวอย่าง YGCH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-5 จากซ้ายอยู่ในส่วนสีเหลือง จุดที่ 6-8 อยู่ในแถบสีเขียว	54
รูปที่ 3.28 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YGCH1 ในรูปที่ 3.27 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~3,200 - 3,500 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 1-5 ในส่วน สีเหลือง (Mg-Ti ~ 6-7 amp) แต่ปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 6-8 ในส่วนสีเขียว (Mg-Ti = -6 ถึง -17 amp)	54
รูปที่ 3.29 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 7 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมบางกระจะ ตัวอย่าง YGCH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-2 จากซ้ายอยู่ในส่วนสีเขียว จุดที่ 3-7 อยู่ในแถบสีเหลือง	56
รูปที่ 3.30 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YGCH2 ในรูปที่ 3.29 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~ 3,000- 3,400 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 1-2 ในส่วนสีเขียว (Mg-Ti ~ -16 ถึง -10 amp) แต่ปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม	56
รูปที่ 3.31 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอย บุษราคัมกาญจนบุรีตัวอย่าง YKB2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	58
รูปที่ 3.32 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YKB2 ในรูปที่ 3.31 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กสูงปานกลาง (~ 900-1,000 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 4- 10 amp)	58

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.33 แสดงผลข้อมูลในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยบุษราคัมบางกระจะ ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์	62
รูปที่ 3.34 แสดงผลใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยบุษราคัมบางกระจะ (ตัวอย่าง YCH1-3, YGCH1-2) และพลอยบุษราคัมกาญจนบุรี (ตัวอย่าง YKB2) ที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลางถึงสูง หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์	63
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH1 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	67
รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH2 ที่มีสีเหลืองแกมเขียวก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	67
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH3 ที่มีสีเขียวแกมเหลืองก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	67
รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH4 ที่มีสีเหลืองอ่อนและแถบเขียวบริเวณขอบก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง	68
รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH5 ที่มีสีเหลืองแกมเขียวก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	68

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH6 ที่สีเขียวแกมเหลืองก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	68
รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH7 ที่สีเหลืองอ่อนและแถบเขียวบริเวณขอบก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา)	69
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH1 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองอ่อนที่ปราศจากสีน้ำเงิน ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers	70
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH1 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.8 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	70
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH2 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองแกมเขียวและแถบสีน้ำเงิน ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตร	71
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH2 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.10 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	71
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH3 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลือง และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตร	72

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH ₃ ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.12 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	72
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH ₄ ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองอ่อนและแถบสีน้ำเงินบริเวณขอบ ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers เพราะวัดสเปกตรัมบริเวณกลางเม็ด	73
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH ₄ ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.14 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	73
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH ₅ ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเขียวแกมเหลืองที่มีแถบสีน้ำเงินอ่อน ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตร	74
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่างCH ₅ ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.16 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	74
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH ₆ ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe ³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัดเนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเขียวแกมเหลืองที่มีแถบสีน้ำเงินที่เด่นชัด ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืน อันเนื่องมาจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตร	75
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH ₆ ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.18 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	75

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH7 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศ ออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัดเนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองอ่อน แกมและแถบสีน้ำเงินบริเวณขอบ ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก $Fe^{2+} - Ti^{4+}$ และ $Fe^{2+} - Fe^{3+}$ charge transfers เพราะวัดสเปกตรัมบริเวณกลางเม็ด	76
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH7 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบ ออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.20 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ	76
รูปที่ 4.22 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านหน้าพลอยจากซ้าย ไปขวาของตัวอย่าง CH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	77
รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH1 ในรูปที่ 4.22 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,880 - 2,000$ amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเกือบเท่ากับ หรือมากกว่าธาตุไทเทเนียมเพียงเล็กน้อย ($Mg-Ti < \sim 6$ amp) ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์	77
รูปที่ 4.24 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขัดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	79
รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH2 ในรูปที่ 4.24 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 2,800 - 3,300$ amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุ ไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim -12$ ถึง -26 amp)	79
รูปที่ 4.26 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขัดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	81
รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH3 ในรูปที่ 4.26 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,100 - 1,400$ amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุ ไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim -1$ ถึง -18 amps)	81
รูปที่ 4.28 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขัดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH4 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	83

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH4 ในรูปที่ 4.28 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~ 2,900 – 3,400 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่เพียงเล็กน้อย (<~4 amp) ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์	83
รูปที่ 4.30 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH5 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	85
รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH5 ในรูปที่ 4.30 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~ 5,000 – 7,000 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ -11 ถึง -70 amp) โดยเฉพาะตรงจุดที่ 1 และ 2 ซึ่งอยู่ในแถบสีน้ำเงินพบว่า มีธาตุไทเทเนียมมากกว่าธาตุแมกนีเซียมอยู่มาก	85
รูปที่ 4.32 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH6 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	87
รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH6 ในรูปที่ 4.32 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~ 1,400 – 2,000 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 2 ถึง -42 amps)	87
รูปที่ 4.34 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมัน จากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH7 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	89
รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH7 ในรูปที่ 4.33 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~ 2,600 – 3,000 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ -1 ถึง -8 amps)	89
รูปที่ 4.36 แสดงผลข้อมูลในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง (CH1-7) จากแหล่งบางกระจะ จังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กสูง จึงพบว่าข้อมูลไปกระจุกตัวอยู่ที่ยอดของธาตุเหล็ก	92

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.37 แสดงข้อมูลใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยแซปไฟร์สีเหลือง แกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง (CH1-7) จากแหล่งบางกระจะ จังหวัดจันทบุรี จะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะตกอยู่บริเวณใกล้เคียงหรือต่ำกว่าเส้น Mg:Ti ratio = 1:1	93
รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd7 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองเล็กน้อยที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 51.6 amp และ หนา 1.67-2.36 มม	99
รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd6 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผา ที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองทองที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้ มี Fe เฉลี่ย 139.2 amp และ หนาประมาณ 2.38 มม	99
รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd1 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผา ที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองทองบางจุดที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 474.3 amp และ หนา 2.19-2.76 มม	100
รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd5 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาล บริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบ ไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 768.4 amp และ หนา 1.38-2.38 มม	100
รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd9 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาล บริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่า แทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 805.3 amp และ หนา 1.69-1.85 มม	100
รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd2 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาล บริเวณขอบเกิดจาก คราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่า แทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,137.8 amp และ หนา 2.27-2.44 มม	101

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd12 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาล บริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,154.3 amp และ หนา 1.52-1.66 มม	101
รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd4 ที่มีสีเหลืองอ่อนมากก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,555.3 amp และ หนา 2.12-2.65 มม	101
รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd10 ที่มีสีเหลืองอ่อนมากก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,802.2 amp และ หนา 1.59-1.81 มม	102
รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd3 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,946.9 amp และ หนา 2.28-2.89 มม	102
รูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd8 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวาและเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 2,064.6 amp และ หนา 1.68-1.73 มม	102
รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd11 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 2,883.5 amp และ หนา 1.40-1.46 มม	103

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd7 ที่ทำการวัดก่อนการทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ)	104
รูปที่ 5.14 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd7 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทาง UV (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.13)	104
รูปที่ 5.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd6 ที่ทำการวัด ก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ)	105
รูปที่ 5.16 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd6 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางUV และไหลที่ประมาณ 460 nm (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.15)	105
รูปที่ 5.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd1 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm เริ่มปรากฏให้เห็นบ้างเล็กน้อย	106
รูปที่ 5.18 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd1 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นเล็กน้อยไปทาง UV (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.17)	106
รูปที่ 5.19 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd5 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นเล็กน้อย	107
รูปที่ 5.20 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd5 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.19	107
รูปที่ 5.21 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd9 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺	108

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.22 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd9 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.21	108
รูปที่ 5.23 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd2 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน	109
รูปที่ 5.24 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd2 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.23	109
รูปที่ 5.25 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd12 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน	110
รูปที่ 5.26 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบ ของตัวอย่าง Ymd12 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.25	110
รูปที่ 5.27 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd4 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจนมากขึ้น	111
รูปที่ 5.28 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd4 ที่ค่อนข้างราบเรียบ (ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.27)	111
รูปที่ 5.29 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd10 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจนมากขึ้น	112
รูปที่ 5.30 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd10 ที่ได้จากหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.29	112

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.31 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd3 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650oC เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน	113
รูปที่ 5.32 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd3 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.31	113
รูปที่ 5.33 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd8 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน	114
รูปที่ 5.34 แสดงสเปกตรัมของตัวอย่าง Ymd8 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.33 negative peak ที่ 450 nm น่าจะเกิดจาก error ของการวัด	114
รูปที่ 5.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd11 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) หลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe ³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน	115
รูปที่ 5.36 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd11 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.35	115
รูปที่ 5.37 แสดงกราฟแท่งค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ เหล็ก แมกนีเซียม และไทเทเนียม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จำนวน 5 จุดบนพลอย แชนไพร์แต่ละตัวอย่าง(ดูรายละเอียดตำแหน่งและผลวิเคราะห์ในรูป 52-75 ตารางที่ 4-13) รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่างจากแหล่งพลอย อิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ โดยเรียงลำดับจากตัวอย่างที่มีปริมาณธาตุเหล็กน้อยไปมากตามลำดับ	117
รูปที่ 5.38 แสดงส่วนขยายของรูปที่ 5.37	117

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.39 แสดงผลวิเคราะห์ของตัวอย่างทั้งหมดใน Model ของ Häger (1992, 2001) จะเห็นว่า ตัวอย่าง Ymd6 และ Ymd7 ของกลุ่มที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ มีสีเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผาที่เกิดจากศูนย์กลางสี่ที่เสถียร (ตกอยู่ในพื้นที่สีเหลืองของ Model ทางขวา) ในขณะที่ตัวอย่างอื่น ๆ โดยเฉพาะตัวอย่าง Ymd 8 และ Ymd11 ของกลุ่มที่สองที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงมาก จะ plot อยู่ใกล้ปลายยอดของเหล็กในรูปสามเหลี่ยม สีเหลืองอ่อนของสองตัวอย่างหลังนี้ เกิดจาก Fe^{3+} spin forbidden transition	118
รูปที่ 5.40 แสดง Cross plot ระหว่าง ปริมาณธาตุแมกนีเซียมและไทเทเนียม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จำนวน 5 จุดบนพลอย แชนไพร์แต่ละตัวอย่าง ทั้งหมด 12 ตัวอย่างจากแหล่งอิลากากา ประเทศ มาดากัสการ์ พบว่าผลวิเคราะห์เกือบทุกจุดมี Mg:Ti มากกว่า 1:1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่าง Ymd6 และ Ymd7 ซึ่งเป็นพลอยที่มีปริมาณค่าเหล็กต่ำสุดและเผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล มี Mg:Ti มากกว่าประมาณ 2:1 ส่วนตัวอย่างอื่น ๆ ที่มี Mg:Ti อยู่ระหว่าง 1:1 และ 2:1 เผาแล้วไม่ได้สีเหลืองที่เด่นชัด แสดงว่าพลอยที่เผาแล้วได้สีเหลืองที่เกิดศูนย์กลางสี่ที่เสถียร น่าจะต้องมี Mg:Ti ratio มากกว่าประมาณ 2:1 จึงได้ผลดี	119
รูปที่ 5.41 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd7 เผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล แสดง ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	120
รูปที่ 5.42 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการ วิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd7 ในรูปที่ 5.41 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ต่ำมาก (เฉลี่ย 51.6 amp) และ $Mg>Ti$ มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (เฉลี่ย 30.4 amp)	120
รูปที่ 5.43 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd6 เผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล แสดง ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ตัวอย่างนี้มีความหนามากกว่า Ymd7 จึงปรากฏเหมือนสีเข้มกว่า Ymd7	122
รูปที่ 5.44 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการ วิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd6 ในรูปที่ 5.43 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ต่ำ (เฉลี่ย 193.2 amp) และ $Mg>Ti$ มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (เฉลี่ย 23.0 amp)	122
รูปที่ 5.45 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd1 เผาแล้ว แสดงตำแหน่งที่ทำการ วิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-3 อยู่บน ส่วนที่เกิดสีเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผา จุดที่ 4-5 อยู่บนส่วนที่ไร้สีหลังเผา	124

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.46 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd1 ในรูปที่ 5.6 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างต่ำ (เฉลี่ย 474.3 amp) และ Mg>Ti มากตรงจุดที่ 1-3 น้อยลงตรงจุดที่ 4 และเกือบเท่ากันตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 10.3 amp)	124
รูปที่ 5.47 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd5 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	126
รูปที่ 5.48 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd5 ในรูปที่ 5.47 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 768.4 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 12.9 amp)	126
รูปที่ 5.49 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd9 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS	128
รูปที่ 5.50 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd9 ในรูปที่ 5.49 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 805.3 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 12.1 amp)	128
รูปที่ 5.51 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd2 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS	130
รูปที่ 5.52 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd2 ในรูปที่ 5.51 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 1137.8 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 16.5 amp)	130
รูปที่ 5.53 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd12 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	132
รูปที่ 5.54 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd12 ในรูปที่ 5.53 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 1154.3 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 16.0 amp)	132
รูปที่ 5.55 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd4 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	134
รูปที่ 5.56 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd4 ในรูปที่ 5.55 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูง (เฉลี่ย 1555.3 amp) และ Mg>Ti ที่จุด 1-4 และเกือบเท่ากันตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 7.9 amp)	134

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.57 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd10 เเผแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่ง ที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	136
รูปที่ 5.58 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd10 ในรูปที่ 5.57 สังเกตปริมาณ ธาตุเหล็กที่สูง (เฉลี่ย 1802.2 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 9.0 amp)	136
รูปที่ 5.59 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd3 เเผแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่ง ที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS	138
รูปที่ 5.60 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการ วิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd3 ในรูปที่ 5.59 สังเกตปริมาณ ธาตุเหล็กที่สูงมาก (เฉลี่ย 1946.9 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 6.6 amp)	138
รูปที่ 5.61 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd8 เเผแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่ง ที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	140
รูปที่ 5.62 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการ วิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd8 ในรูปที่ 5.61 สังเกตปริมาณธาตุเหล็ก ที่สูงมาก (เฉลี่ย 2064.6 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 10.9 amp)	140
รูปที่ 5.63 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd11 เเผแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่ง ที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS	142
รูปที่ 5.64 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการ วิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd11 ในรูปที่ 5.63 สังเกตปริมาณธาตุเหล็ก ที่สูงมาก (เฉลี่ย 2883.5 amp) และ Mg>Ti ตรงจุดที่ 1-3 น้อยลง ตรงจุดที่ 4 และเกือบเท่ากับตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 10.2 amp)	142
รูปที่ 6.1 แสดงพลอยบุษราคัมตัวอย่างที่ 1 ที่ส่งมาตรวจที่ห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบอัญมณี ปรากฏว่ามีสีเหลืองทอง และ สเปกตรัมการดูดกลืน คลื่นแสงช่วง UV-Vis ของตัวอย่างพลอยดังกล่าว แสดงการดูดกลืนของ Fe ³⁺ transition ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการดูดกลืนที่ทำให้เกิด สีน้ำเงินจาก Fe ²⁺ - Ti ⁴⁺ และ Fe ²⁺ - Fe ³⁺ charge transfers เป็นลักษณะ การดูดกลืนของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิด บะซอลต์	148

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.2 เมื่อนำสเปกตรัมของพลอยที่ส่งมาตรวจดังกล่าวมาซ้อนทับ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพลอยบุษราคัมบางกะจะ 2 ตัวอย่างที่วัดก่อนเผา (ตัวอย่าง YCH1 เส้นสีน้ำเงิน และตัวอย่าง YCH3 เส้นสีแดง ในบทที่ 2) พบว่าพลอยที่ส่งมาตรวจมีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี ทำให้ทราบว่าพลอยดังกล่าวได้ผ่านการเผา	149
รูปที่ 6.3 แสดงพลอยบุษราคัมตัวอย่าง 2 ที่ส่งมาตรวจที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี ปรากฏว่ามีสีเหลืองทอง และสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางคลื่นสั้น และมีไหล่ที่ประมาณ 460 นาโนเมตร ที่เด่นชัดมาก เป็นลักษณะการดูดกลืนของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปรที่น่าเป็นพลอยที่ผ่านการเผามาแล้ว	150



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาปรกติ จำนวน 5 เม็ด	11
ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาปรกติ จำนวน 5 เม็ด ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF	11
ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC1 ด้วย วิธี LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	22
ตารางที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC2 วิธี LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 1 ถึง 2 เกือบทุกจุดที่วิเคราะห์	24
ตารางที่ 2.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC3 ด้วย วิธี LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	25
ตารางที่ 2.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC4 ด้วย วิธี LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	28
ตารางที่ 2.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC5 ด้วย วิธี LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	30
ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยบุษราคัม จำนวน 4 เม็ด จากแหล่ง บางกะจะ จังหวัดจันทบุรี	36
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยบุษราคัมสด จำนวน 4 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF	36
ตารางที่ 3.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH1 ด้วย วิธี LA-ICP-MS	49
ตารางที่ 3.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH2 ด้วย วิธี LA-ICP-MS	51
ตารางที่ 3.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH3 ด้วย วิธี LA-ICP-MS	53
ตารางที่ 3.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YGCH1 ด้วยวิธี LA-ICP-MS	55
ตารางที่ 3.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YGCH2 ด้วยวิธี LA-ICP-MS	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 3.8 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YKB2 ด้วยวิธี LA-ICP-MS	59
ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง สดจำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี	65
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF	66
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH1 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	78
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH2 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรีด้วย วิธี LA-ICP-MS	80
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH3 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	82
ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH4 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	84
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH5 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	86
ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH6 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	88
ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH7 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS	90
ตารางที่ 5.1 แสดง สมบัติพื้นฐาน ของพลอยแซปไฟร์ ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์	94
ตารางที่ 5.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (%) ของพลอยแซปไฟร์ ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอย อิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ที่ทำการวิเคราะห์ในเบื้องต้นด้วยเครื่อง EDXRF	96
ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของธาตุเหล็กด้วยเครื่อง LA-ICP-MS และ EDXRF	97
ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd7 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โปรตสังเกตุ Mg/Ti มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	121

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 5.5 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd6 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	123
ตารางที่ 5.6 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd1 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์ โดยที่จุดที่ 1-3 มีค่าใกล้เคียง 2 ส่วนจุดที่ 4 และ 5 มีค่าใกล้เคียง 1	125
ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd5 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	127
ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd9 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	129
ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd2 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	131
ตารางที่ 5.10 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd12 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	133
ตารางที่ 5.11 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd4 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	135
ตารางที่ 5.12 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd10 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	137
ตารางที่ 5.13 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd3 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	139
ตารางที่ 5.14 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd8 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์	141

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ 5.15 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd11 ด้วยเครื่อง LA-ICP-MS โปรตสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

หน้า

143



บทที่ 1

บทนำ

1.1 เกริ่นนำ

ประเทศไทยได้ชื่อว่า เป็นประเทศผู้นำในด้านพลอยสี เป็นศูนย์กลางการค้าพลอยสีเกือบทุกชนิด และเป็นผู้ส่งออกหลักของพลอยทับทิม และแซฟไฟร์ของโลก สาเหตุที่ ประเทศไทยยังสามารถดำรงความเป็นผู้นำ ในด้านพลอยสีดังกล่าวได้ ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน แม้ว่าแทบจะไม่มีวัตถุดิบ ที่ผลิตได้เองในประเทศแล้วก็ตาม เพราะเรามีจุดแข็งอยู่หลายประการ เช่น มีความกล้าหาญและเชี่ยวชาญ ในการไปแสวงหาพลอยดิบ หรือพลอยก้อน ที่มีคุณภาพ จากแหล่งต่าง ๆ ทั่วโลก มีความสามารถ ในการคัดเลือกพลอยดิบ ที่นำมาปรับปรุงคุณภาพ ให้สวยงามขึ้นได้ด้วยกรรมวิธีต่างกันได้อย่างถูกต้อง และมีความทุ่มทุนสูงในเชิงพาณิชย์ มีฝีมือในการเจียรไนที่ยอดเยี่ยม มีความสามารถในการออกแบบและผลิตเครื่องประดับที่สามารถแข่งขันได้ในตลาดโลก ทำให้อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย สามารถนำรายได้เข้าสู่ประเทศ ได้มากกว่าแสนล้านบาทต่อปีในปัจจุบัน และนอกจากนี้สินค้าอัญมณีและเครื่องประดับยังเป็นสินค้าส่งออกเป็นลำดับต้น ๆ ที่สำคัญของประเทศไทยอีกด้วย

การปรับปรุงคุณภาพ พลอยคอร์ันดัม หรือพลอยเนื้อแข็ง ด้วยกรรมวิธีการเผา โดยนักเผาพลอยมืออาชีพของไทย มีการดำเนินมานานกว่า 40 ปีแล้ว (รัก ธรรมชาติ, 2548) และได้รับการพัฒนาขึ้นมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน พลอยคอร์ันดัม ที่สามารถปรับปรุงคุณภาพ ด้วยความร้อนได้ ส่วนใหญ่ มักเป็นพลอยคอร์ันดัมจำพวกทับทิม (ruby) ไพลิน (blue sapphire) บุษราคัม (yellow sapphire) และพลอยคอร์ันดัมสีชมพู (pink sapphire) เป็นต้น ถึงแม้ผู้ประกอบการเผาพลอยไทย จะมีความรู้เกี่ยวกับสาเหตุของการเกิดสีไม่ลึกซึ้งมากนัก แต่อาศัยการลองผิดลองถูก ความเป็นคนช่างสังเกต ความอดทน และความเพียรพยายามอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งประสบการณ์ที่สั่งสมกันมานาน ก็สามารถพัฒนาวิธีการดูและคัดเลือกพลอยก้อนสด หรือพลอยก้อนดิบ ด้วยกรรมวิธีง่าย ๆ แต่ได้ผลในทางปฏิบัติสูง ก่อนที่จะนำไปเผาในเตา ที่ควบคุมสภาวะการเผาต่าง ๆ กันที่เหมาะสมสำหรับพลอยแต่ละชนิดแต่ละแหล่ง หรือพูดอย่างภาษาคนในวงการเผาพลอยว่า ‘อ่านพลอยออก’ ว่ามีเชื้อหรือหม่าที่เผาขึ้นหรือไม่ขึ้น และเชื้อหรือหม่าประเภทไหน ควรจะเผาด้วยเตาประเภทใด มีการพัฒนาเตาเผาชนิดต่าง ๆ เช่น เริ่มจากเตาถ่านไม้โก่งกวาง เตาถ่านโคก เตาน้ำมัน เตาแก๊ซหุงต้ม เตาไฟฟ้า ขึ้นมาใช้เองด้วยวัสดุที่หาได้ในประเทศ ซึ่งนอกจากมีต้นทุนที่ถูกกว่าแต่ใช้งานได้ไม่แพ้เตาที่สั่งซื้อมาจากต่างประเทศแล้ว เมื่อเวลาเกิดชำรุดเสียหาย ก็สามารถซ่อมแซมได้ด้วยตัวเองอย่างรวดเร็ว ตลอดจนคิดค้นและพัฒนาเทคนิควิธีการเผา ที่เป็นความลับเฉพาะตัวของนักเผาพลอยแต่ละราย เช่น พลอยชนิดไหน จะต้องเผายกให้เย็นเร็ว หรือหม่าประเภทไหนจะต้องเผาอบหลาย ๆ วัน เป็นต้น จนสามารถเผาพลอยจากแหล่งต่าง ๆ ออกมาได้สวยงามด้วยต้นทุนที่ถูก และเป็นที่ยอมรับในตลาดพลอยทั่วโลก นับว่าเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสม (appropriate technology) เป็นภูมิปัญญาไทยที่น่ายกย่องนับถืออย่าง

ยี่ง (คูรายละเอียดเพิ่มเติมใน สามเมือง แก้วแหวน, 2548; รัชชัย สมใจนึก, 2548; เมธี จิงสงวนสิทธิ์, 2548, 2550; อนุภาพ ชินอุดมพงศ์, 2548; พิศพงษ์ (อนุภาพ) ชินอุดมพงศ์, 2550; ชัย สาธุกิจชัย, 2548, 2550; ประจักษ์ อังคะหิรัญ, 2548, 2550)

นอกจากการปรับปรุงคุณภาพพลอยโดยนักเผาพลอยมืออาชีพของไทยแล้ว ในระยะสิบกว่าปีที่ผ่านมา ยังมีนักวิชาการไทยหลายท่านได้พัฒนาเตาเผาพลอย (พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ, 2548, ยรรยง อารีย์พงศา, 2550) และทำการทดลองเผาพลอย โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ มาช่วยในการตรวจวัดหรือวิเคราะห์มากขึ้น (Pisutha-Amond et al. 2004, 2006a,b; วิสุทธิ์ พัสุทธอนันท์ และคณะ 2548, 2550; รัก ธรรมชาติ, 2548; กฤตยา ปัทมาลัย และ รัก ธรรมชาติ, 2548, 2550; อีรพงศ์ ธนสุทธิพิทักษ์ และคณะ, 2548; สุรชาติพิศ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ, 2548; พงศ์ทิพย์ วิโนทัย และ พิเชษฐ ลิ่มสุวรรณ, 2548; ทนง ลีลาวัฒน์สุข และคณะ, 2550) ทำให้เราเข้าใจสาเหตุของการเกิดสีหลังเผาของพลอยแต่ละชนิด แต่ละแหล่งได้ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม ก็ต้องยอมรับว่า สำหรับการเผาพลอยในเชิงพาณิชย์แล้ว การใช้เทคโนโลยีชาวบ้าน น่าจะคุ้มทุนมากกว่า แต่การพัฒนาเทคโนโลยีชาวบ้านต่อไป โดยไม่อาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเหลือ คงจะต้องมาดึงทางตันเข้าสักวันหนึ่งอย่างแน่นอน ดังนั้นจึงควรที่จะมีการพัฒนาแบบควบคู่กันไปโดยนำความรู้และการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีเข้าช่วยต่อยอดการเผา ก็น่าจะเป็นแนวทางที่ดีอย่างยิ่ง

อีกประการหนึ่ง ควรที่จะต้องทำความเข้าใจว่า พลอยที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคและกระบวนการใหม่ ๆ ที่แตกต่างจากเดิม ควรขายหรือทำตลาดในรูปแบบสินค้าตัวใหม่ เป็นตราสินค้าของพลอยปรับปรุงคุณภาพชนิดใหม่ และจำเป็นที่จะต้องตรวจแยกพลอยดังกล่าว ออกจากพลอยที่ปรับปรุงคุณภาพแบบเก่าให้ได้ มิฉะนั้นถ้าขายปนกับพลอยปรับปรุงคุณภาพแบบเก่า โดยที่ไม่แจ้งให้ทราบเสียตั้งแต่แรก และแยกออกได้ยาก สักวันหนึ่งก็จะเกิดปัญหาเหมือนกับพลอยเผาอุดแก้วใบอดีต หรือพลอยเผาเบสิลเลียมเมื่อไม่นานมานี้ การซื้อขายพลอยประเภทนั้น ๆ ก็อาจจะเกิดการชะงักงันไปชั่วขณะ เพราะขาดความความเชื่อมั่นในพลอยดังกล่าวในขณะที่นั้นใบตลาดพลอย จนกว่าทุกอย่างจะชัดเจนชัด และตรวจแยกออกจากกันได้ ดังนั้นจึงเป็นความรับผิดชอบของผู้ประกอบการที่จะต้องร่วมมือกับห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี ในการที่จะต้องศึกษาหาวิธีตรวจแยกและหาสาเหตุของการเกิดสีตลอดจนแจ้งให้ทุกคนในวงจการค้าจนถึงผู้บริโภคทราบว่า เป็นสินค้าตัวใหม่โดยไม่จำเป็นต้องบอกกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งเป็นความลับและลิขสิทธิ์เฉพาะของผู้เผา ด้วยสาเหตุนี้ การเข้าใจทฤษฎีหรือสาเหตุของการเกิดสีของพลอยคอร์ันดัมได้อย่างลึกซึ้งจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง

1.2 การเกิดสีกับธาตุร่องรอย

ในการที่จะเข้าใจบทบาทของธาตุร่องรอย ที่เป็นสาเหตุของการเกิดสีในโครงสร้างของพลอยคอร์ันดัมทั้งก่อนและหลังเผา เราต้องเข้าใจความรู้เบื้องต้นของการเกิดสีในพลอยคอร์ันดัมเสียก่อน สาเหตุ

ของการเกิดสีในพลอยทับทิมและไพลินทั้งก่อนและหลังเผา มีผู้ศึกษาไว้ค่อนข้างมาก จึงขอล้างเพียงย่อ ๆ ดังต่อไปนี้ (สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน Hughes, 1997; Nassau, 1994; Themelis, 1992; วิสุทธิ์ พิสุทธอนันท์ และคณะ 2548)

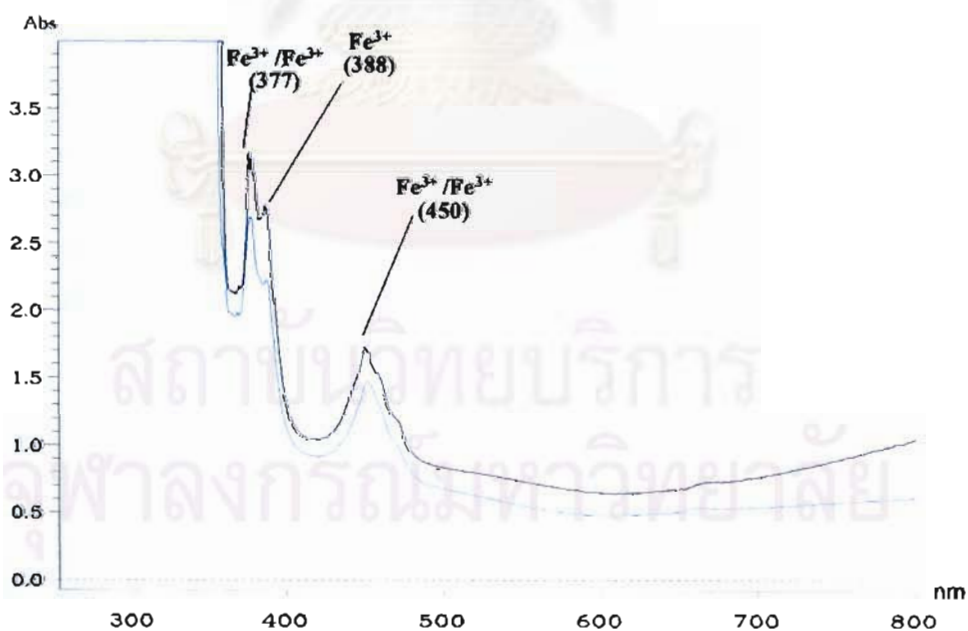
พลอยคอร์ันดัมบริสุทธิ์ ที่ไม่มีธาตุร่องรอยแทนที่ในโครงสร้าง Al_2O_3 เลย จะใสไม่มีสีหรือสีขาว ไม่ว่าจะเผาอย่างไร ก็ไม่เกิดสี ดังที่รู้จักกันว่าเป็นพลอยที่ไม่มีหม่าหรือเชื้อสี สำหรับพลอยทับทิมและแซปไฟร์สีชมพูนั้น ต้องมีธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ที่เป็นธาตุมลทิน หรือเชื้อสีในโครงสร้าง จึงทำให้เกิดสีแดงหรือชมพู ธาตุโครเมียมทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนช่วงคลื่นบางช่วง ที่ตามองเห็น หรือในแถบสีรุ้ง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็คือเกิดสีแดงนั่นเอง การเผาด้วยวิธีปรกติที่ไม่มีการเติมสารเคมีใด ๆ ลงไปในแก้วเผาพลอย ไม่สามารถเพิ่มหรือถอยสีแดงหรือชมพูได้ แต่การเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์สีชมพูส่วนใหญ่ ก็เพื่อต้องการถอยสีอื่นที่เจือปน เช่น สีม่วง น้ำเงิน ทำให้พลอยเผามีสีแดงหรือชมพูสดขึ้น และขจัดมลทินอื่น ๆ ทำให้พลอยใส

1.3 การเกิดสีเหลืองกับธาตุร่องรอย

จากความรู้ในปัจจุบัน พบว่ามีทฤษฎีของการเกิดสีเหลือง ในพลอยบุษราคัม ได้ 2 สาเหตุหลัก สาเหตุแรกคือ สีเหลืองเกิดจากการย้ายตำแหน่งพลังงานของ Fe^{3+} (spin forbidden transitions of Fe^{3+}) แล้วทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนปรากฏเป็นสีเหลืองออกมาให้เห็น ซึ่งเป็นสีเหลืองที่เสถียร ในที่นี้จะขอเรียกง่าย ๆ ว่า “สีเหลืองเกิดจาก Fe^{3+} ” (Lehman and Harder, 1970; Krebs and Maisch, 1971; Ferguson and Fielding, 1971, 1972; Nikolskaya et al., 1987; Nassau and Valente, 1987) สีเหลืองเด่นชัดที่เกิดจาก Fe^{3+} ต้องมีปริมาณธาตุเหล็ก ประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างพลอยบุษราคัมที่สีเหลืองเกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลัก ได้แก่ พลอยบุษราคัมสดที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์ เช่น ที่พบในประเทศไทย (รูปที่ 1.1) ลาว กัมพูชา ออสเตรเลีย และทางตอนเหนือของประเทศมาดากัสการ์ หรือที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร เช่น พลอยบุษราคัมจากแหล่ง Umba, Tanzania (Lomthong, 2004) ซึ่งสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยจากแหล่งดังกล่าว ปรกติจะแสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่ตำแหน่ง 450, 388 และ 377 นาโนเมตร ที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่เด่นชัด (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.1 แสดงพลอยบุษราคัมสด จากเขาพลอยแหวน จ. จันทบุรี ที่มีสีเหลืองอ่อน (ถ่ายภาพโดย ชนินยา สมบุญ)



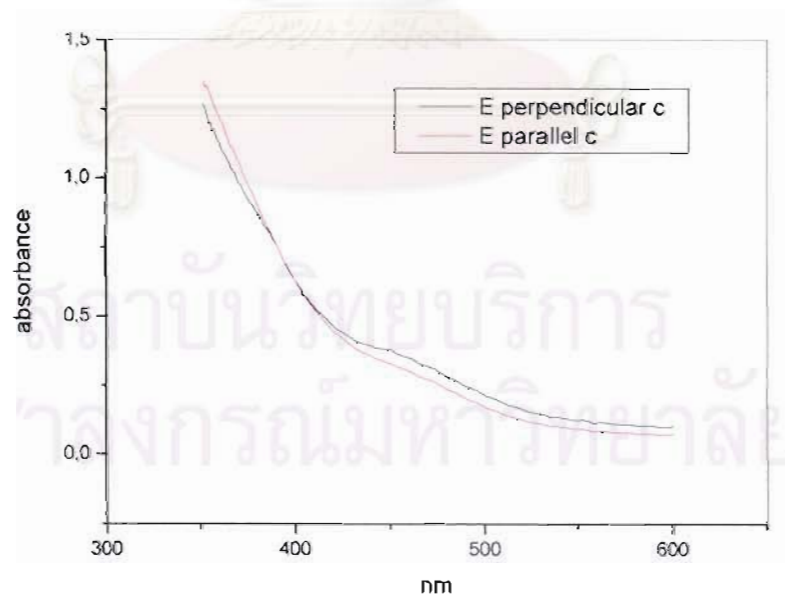
รูปที่ 2 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ของพลอยบุษราคัมสด จากเขาพลอยแหวน จ. จันทบุรี (เส้นสีดำ คือ o-ray และ เส้นน้ำเงินคือ e-ray) สีเหลืองเกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลัก

สาเหตุของการเกิดสีเหลือง ที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เกิดจากความบกพร่อง (defect centers) ในโครงสร้างผลึก Al_2O_3 ทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนบางช่วงคลื่น แล้วปรากฏเป็นสีเหลืองออกมาให้เห็น หรือที่รู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า “ศูนย์กลางสี (color centres)” ซึ่งในที่นี้อาจเรียกว่า ‘ศูนย์กลางสีเหลือง’ (yellow color centers) ตัวอย่างพลอยบุษราคัมที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลือง ได้แก่ พลอยบุษราคัมสดหรือเผา จากประเทศศรีลังกา ซึ่งมักมีปริมาณเหล็กค่อนข้างต่ำ และมีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร (รูปที่ 1.3) สเปกตรัมของพลอยจากแหล่งดังกล่าว ปรกติแสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางคลื่นรังสียูวีหรือคลื่นสั้น และแสดงลักษณะไหล่พิคที่ประมาณ 460 นาโนเมตร (รูปที่ 1.4) ดังนั้นสาเหตุของการเกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัมทั้งสองสาเหตุ สามารถแยกจากกันได้ โดยการตรวจวัดความแตกต่างกันของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis

สีเหลืองที่เกิดจากศูนย์กลางสี สามารถแบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 แบบ โดยแบบแรก เป็นสีเหลืองที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่ไม่เสถียร (unstable colour centres) หรือในที่นี้เรียก ‘ศูนย์กลางสีเหลืองที่ไม่เสถียร’ (unstable yellow colour centres) ก็ได้ เป็นสีเหลืองเกิดขึ้นได้จากการเอาพลอยธรรมชาติไร้สีไปอาบรังสี (irradiation) (Lehmann and Harder, 1970; Nassau and Valente, 1987) สีเหลืองดังกล่าว เมื่อถูกแสงสว่างและความร้อนจากหลอดไฟ 100 แสงเทียน จะซีดจางไป (เป็นวิธีการหนึ่ง ที่ใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการฯ ที่เรียกว่า fade test) แบบที่สอง เป็นสีเหลืองที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียร (stable colour centres) หรือในที่นี้เรียก ‘ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร’ (stable yellow colour centers) ก็ได้ เกิดขึ้นได้ในพลอยธรรมชาติบางแหล่ง เช่น พลอยบุษราคัมสดจากประเทศศรีลังกา หรือจากเอาพลอยธรรมชาติบางแหล่ง เช่น จากประเทศศรีลังกา มาเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (oxidizing condition) ที่อุณหภูมิสูง (Schmetzer et al. 1983; Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993) สีเหลืองที่เกิดจากศูนย์กลางสีทั้ง 2 แบบ พบว่า มีสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis เหมือนกัน แต่ความแตกต่างของพลอยบุษราคัมที่เกิดจากศูนย์กลางสีทั้งสองแบบดังกล่าว สามารถตรวจแยกได้ด้วยวิธี fade test ที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 1.3 แสดงพลอยบุษราคัมเผาด้วยวิธีปรกติ จากประเทศศรีลังกา ขนาด 0.48 ct ที่มีสีเหลืองเข้ม (ถ่ายภาพ โดย ชนินยา สมบุญ)

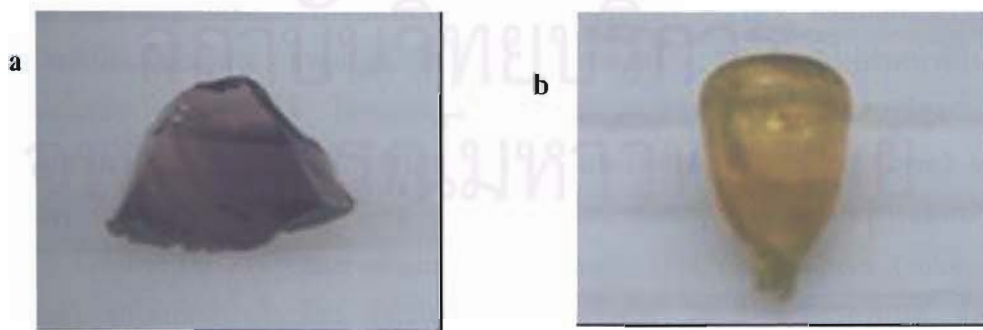


รูปที่ 1.4 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยบุษราคัมเผาปรกติจากศรีลังกา (เส้นสีดำคือ o-ray และเส้นสีแดงคือ e-ray) สีเหลืองเกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียร

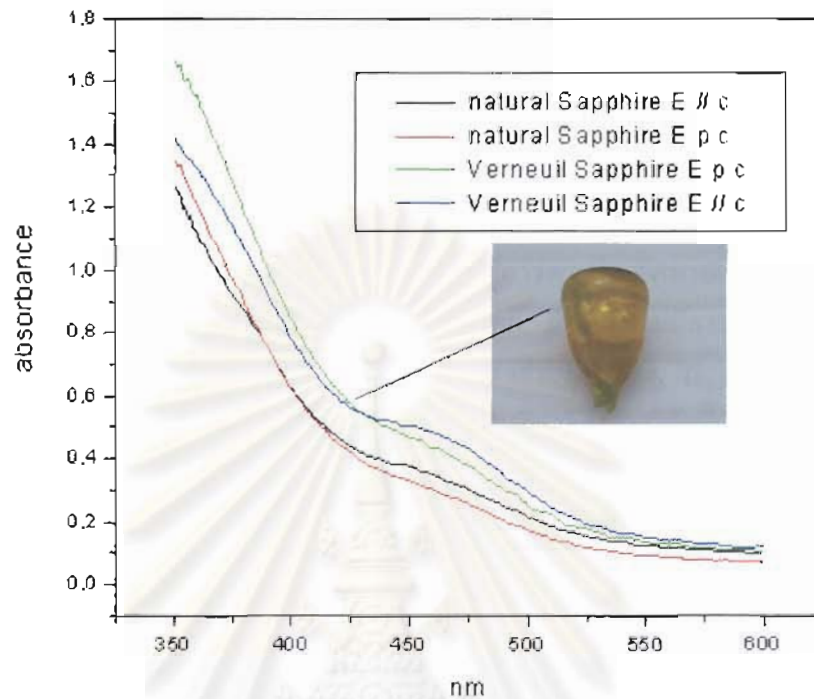
1.4 บทบาทของธาตุแมกนีเซียมและเหล็กกับการเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร

ปรกติพลอยคอร์ันดัมธรรมชาตินั้นมีธาตุร่องรอยหลากหลายชนิด เช่น แมกนีเซียม โทเทเนียม เหล็ก โครเมียม เป็นต้น ที่ทำให้เกิดสี หรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดสี ดังนั้นการศึกษาพลอยคอร์ันดัมธรรมชาติ เพื่อที่จะทำความเข้าใจถึงบทบาทของธาตุต่างๆเหล่านั้นกับการเกิดสี โดยเฉพาะการเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรนั้นเป็นไปได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นเพื่อที่เข้าใจบทบาทของธาตุแต่ละตัวต่อการเกิดสี จึงจำเป็นที่จะต้องสังเคราะห์พลอยคอร์ันดัมขึ้นมาเอง โดยเติมธาตุที่ละตัวลงไป

Kvapil, et al. (1973), Wang et al. (1983) และ Häger (1996, 2001) ได้ทำการทดลองสังเคราะห์พลอยคอร์ันดัม โดยใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียว พบว่าได้พลอยสีม่วงแกมน้ำตาล (รูปที่ 1.5a) ไม่ใช่สีเหลือง แสดงว่าธาตุแมกนีเซียมเพียงตัวเดียวไม่ทำให้เกิดสีเหลืองจะต้องมีธาตุอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง ต่อมา Häger (1996, 2001) ได้ทำการสังเคราะห์พลอยคอร์ันดัม โดยการเติมธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็กจำนวนเล็กน้อย (ธาตุละประมาณ 50 ppm) พบว่าพลอยคอร์ันดัมสังเคราะห์ดังกล่าว มีสีเหลือง (รูปที่ 1.5b) เมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis พบว่าสเปกตรัมของพลอยสังเคราะห์ใส่ธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็ก มีลักษณะการดูดกลืนคลื่นแสง คล้ายกับสเปกตรัมของพลอยบุษราคัมจากประเทศศรีลังกา (รูปที่ 1.6) ซึ่งแตกต่างจากสเปกตรัมการดูดกลืนของพลอยคอร์ันดัมสังเคราะห์ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัดเจน (ดูใน Häger, 1996, 2001; Pisutha-Amund et al. 2004, 2006b) ทำให้ Häger (1996, 2001) เชื่อว่า แมกนีเซียม ร่วมกับธาตุเหล็กจำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ก็สามารถเป็นตัวการที่ทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้ (stable yellow colour centers) หรือ ที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า ‘ศูนย์กลางสีที่ตรึงโดยแมกนีเซียม’ (Mg-trapped hole colour centers) นอกจากนี้ Häger (1996, 2001) ยังแสดงให้เห็นอีกว่า ในการที่จะเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้นั้น พลอยที่เผาออกมาจะต้องมีทั้งธาตุ แมกนีเซียมและเหล็กอยู่ด้วยแล้ว จะต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย



รูปที่ 1.5 แสดงพลอยคอร์ันดัมสังเคราะห์ด้วยวิธีเวอร์เนอิลล์ (Verneuil or flame-fusion) ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียว ปรากฏออกมาเป็นสีม่วงอมน้ำตาล (a, รูปซ้าย) และใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมและเหล็ก ปรากฏออกมาเป็นสีเหลือง (b, รูปขวา) ถ่ายภาพโดย T. Häger



รูปที่ 1.6 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยคอร์ันดัมสังเคราะห์ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมและเหล็ก (เส้นสีน้ำเงิน c-ray และสีเขียว o-ray) กับของพลอยบุษราคัมเผาปรกติจากศรีลังกา (เส้นสีดำ c-ray และเส้นสีแดงคือ o-ray)

สำหรับพลอยคอร์ันดัมธรรมชาติ ซึ่งมีธาตุร่องรอยหลากหลายชนิดนั้น Häger (1996, 2001) ได้อธิบายถึงบทบาทของแมกนีเซียมและธาตุเหล็ก ที่จะทำหน้าที่ให้เกิดศูนย์กลางสีเหลือง ที่เสถียรได้นั้น จำเป็นต้องมีปริมาณอะตอมของธาตุแมกนีเซียม มากกว่าของธาตุไทเทเนียมที่เข้าไปแทนที่ในโครงสร้างพลอย โดยธาตุแมกนีเซียมจะไปจับกับธาตุไทเทเนียมในรูปของ $MgTiO_3$ ที่ไม่มีสีก่อน จนกระทั่งไม่เหลือธาตุไทเทเนียมที่เป็นอิสระ ธาตุแมกนีเซียมที่เหลือกับธาตุเหล็ก จึงสามารถไปทำหน้าที่ให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรในพลอยนั้นได้ โดยจะต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าปริมาณอะตอมของธาตุแมกนีเซียม น้อยกว่าของธาตุไทเทเนียมจะได้พลอยสีน้ำเงินเขียว (cyan) แทน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าเผาในสภาวะขาดออกซิเจน เพราะ ธาตุไทเทเนียมที่เหลือ จะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุกับธาตุเหล็ก (Fe^{2+}) ที่เรียกว่า Fe^{2+}/Ti^{4+} intervalence charge transfer (IVCT) transitions (colour active $FeTiO_3$ clusters) ทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียว (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน วิสุทธิ พิสุทธอนันท์ และคณะ 2548, Townsend, 1968; Ferguson and Fielding, 1972; Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993)

1.5 ที่มา ปัญหาที่ทำการวิจัย: การเกิดสีของพลอยบุษราคัมเผาเก่า

เราพบว่าสาเหตุของการเกิดสี ของพลอยบุษราคัมเผา โดยกระบวนการปรกติ หรือเผาเก่า ซึ่งได้มีกันทำกันมานานแล้วนั้น ถึงแม้ว่าได้มีการศึกษามาก่อนข้างมาก แต่ยังมีบางส่วนยังไม่กระจ่างเท่าที่ควร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พลอยที่มีปริมาณเหล็กสูง เช่น พลอยบุษราคัมของไทย ว่าสีเหลืองที่ได้จากการเผาปรกตินั้น เกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลักเพียงอย่างเดียว หรือเป็นผลรวมที่เกิดจาก Fe^{3+} ร่วมกับ ศูนย์กลางสีเหลือง ทั้งนี้เพราะ ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยยังไม่มีการควบคุมทิศทางการวางตัวอย่าง เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยก่อนและหลังเผาอย่างตีพอ อีกทั้งยังไม่มีการวิเคราะห์ธาตุร่องรอยที่สำคัญที่เป็นสาเหตุของการเกิดสี หรือมีส่วนทำให้เกิดสีในพลอย เช่น Be, Mg, Ti, Cr, V, Fe อย่างครบถ้วน เพื่อประกอบการอธิบายการเกิดสี ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการวิจัยนี้

1.6 ขั้นตอนการวิจัย

ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติที่ได้จัดหามา ในกรณีที่เป็นพลอยที่ยังไม่ได้เจียรระโน ได้ทำการตัดและขัดมันตั้งฉากและขนานกับแกนแสง ทำการชั่งน้ำหนัก ศึกษาสมบัติพื้นฐาน เช่น ค่าดัชนีหักเห (RI) ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) สี การเรืองแสงภายใต้รังสียูวี (SWUV และ LWUV) ตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นด้วยเครื่องมือ OXFORD Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) Spectrophotometer, Model ED2000 ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

หลังจากนั้นได้ดำเนินการเผาพลอยด้วยเตาไฟฟ้า Linn Electric Furnace, Model HT1800 Plus VAC Bottom Loader ที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศในห้องเผาได้ ที่ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตรวจสอบความเสถียรของสีพลอยหลังเผาด้วยความร้อนและแสงสว่างจากหลอดไฟ 100 แรงเทียน เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง (Fade Test) ในแต่ละขั้นตอนของการทดลอง ได้ทำการบันทึกภาพพลอย และวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ด้วยเครื่องมือ HITACHI UV-Vis-NIR Spectrophotometer, Model U-4001 ของพลอยแต่ละตัวอย่างทั้งก่อนและหลังเผาที่ตำแหน่งเดียวกันและในสภาวะการวัดเดียวกัน

ทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุร่องรอยที่สำคัญอย่างละเอียดอีกครั้ง ได้แก่ Be, Mg, Ti, Cr, V, Fe, Na, Mn และ Ga ด้วยเครื่องมือ Laser Ablation Inductively-coupled-Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) ที่มหาวิทยาลัยแมคควอรี เมืองซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย

บทที่ 2

พลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร)

2.1 บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีในวงการนักเผาพลอยมีอาชีพของไทยว่า พลอยบุษราคัมสดที่มีสีเหลืองอ่อนหรือมีจุดสีเหลืองจากครีส์ลิ่งกา สามารถนำมาเผาให้เป็นสีเหลืองทองได้โดยง่ายด้วยวิธีเผาปรกติ หรือเผาแบบดั้งเดิม โดยไม่ทราบสาเหตุว่า ที่เป็นอย่างนั้น เพราะอะไร? ดังนั้นเพื่อเป็นการปูพื้นฐาน และทำความเข้าใจกระบวนการเกิดสีเหลืองโดยการเผาในพลอยที่เผาได้ค่อนข้างง่ายก่อน อีกทั้งยังเป็นการเก็บข้อมูลเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบกับพลอยกลุ่มอื่นต่อไป ในบทนี้จึงขอนำเสนอรายงานการวิจัยตัวอย่างพลอยบุษราคัมที่เผาแล้วจากครีส์ลิ่งกา โดยจะทำการทดลองเผากลับไปกลับมาสองครั้ง ครั้งแรกเป็นการเผาดอยสีในสภาวะขาดออกซิเจนก่อน แล้วจึงทำการเผาเพิ่มสีอีกครั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนพอเพียง เพื่อทดสอบว่าสามารถเปลี่ยนสีได้ง่ายจริงหรือไม่? อย่างไร? รวมทั้งทำการการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยการควบคุมทิศทางการวางตัวอย่าง เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยทั้งก่อนและหลังเผา ทำการตรวจวิเคราะห์ธาตุร่องรอยในพลอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS เพื่อใช้อธิบายสีที่เปลี่ยนไป ว่ามีสาเหตุมาจากอะไร?






2.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน

พลอยที่นำมาศึกษาในกลุ่มนี้ คือ พลอยบุษราคัมจากครีส์ลิ่งกาที่เผาแล้วด้วยวิธีปรกติหรือเผาเก่าจำนวน 5 เม็ด จากแหล่งที่เชื่อถือได้ (สามารถตรวจพิสูจน์ได้ด้วยปริมาณธาตุเบริลเลียมที่ต่ำกว่าค่าที่เครื่องมือ LA-ICP-MS ตรวจวัดได้ในตารางที่ 2.3-2.7) ซึ่งเป็นพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือที่รู้จักกันว่าเป็น “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร”

สมบัติพื้นฐานของพลอยทั้ง 5 เม็ดนี้ แสดงในตารางที่ 2.1 และผลวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องมือ EDXRF แสดงในตารางที่ 2.2 ปรากฏว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณ Fe_2O_3 ที่ค่อนข้างต่ำ (~ 0.1 wt%) เป็นที่น่าสังเกตว่า พลอยบุษราคัมเผาเก่า นั้น แทบจะหาไม่ได้ในตลาดพลอยในปัจจุบัน ทั้งนี้เพราะพลอยบุษราคัมเผาที่ค้าขายกันอยู่ในตลาดนั้นเกือบทั้งหมด เป็นพลอยบุษราคัมที่เผากับสารเบริลเลียมแทบทั้งสิ้น

ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยบุษราคัมศรีลังกาเฉापรกติ จำนวน 5 เม็ด

(RI = refractive indices, SG = specific gravity, SWUV = short wave ultraviolet,
LWUV = long wave ultraviolet)

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		Picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
PC1 (Sri Lanka)	0.486	1.761	1.769	Yellow	3.950	inert	inert	
PC2 (Sri Lanka)	0.723	1.761	1.769	Yellow	3.940	Moderate orange	Weak orange	
PC3 (Sri Lanka)	0.773	1.760	1.769	Yellow	3.964	inert	inert	
PC4 (Sri Lanka)	0.491	1.760	1.768	Yellow	4.025	Weak orange	Very weak orange	
PC5 (Sri Lanka)	0.744	1.760	1.769	Yellow	3.951	inert	inert	

ตารางที่ 2.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยบุษราคัมศรีลังกาเฉापรกติ
จำนวน 5 เม็ด ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF

Sample no.	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
PC1	99.7664	0.0076	0.1052	0.1132	0.0000	0.0075
PC2	99.8296	0.0000	0.0968	0.0611	0.0066	0.0058
PC3	99.7930	0.0128	0.1360	0.0431	0.0000	0.0152
PC4	99.7511	0.0000	0.0868	0.1398	0.0166	0.0056
PC5	99.7962	0.0026	0.1661	0.0135	0.0016	0.0200

2.2 ผลของการทดลองเผา

พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้วจำนวน 5 เม็ด ได้นำมาทำการเผาอีกครั้งในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (ไนโตรเจนบริสุทธิ์) ที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าสีของพลอยเปลี่ยนจากสีเหลืองทองก่อนทดลองไปเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่ง และพลอยไร้สีดังกล่าวเมื่อนำมาเผาอีกครั้งในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ออกซิเจนบริสุทธิ์) ที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าสีของพลอยเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิมหลังเผาครั้งที่สอง และพบว่าเป็นสีเหลืองที่เสถียรหลังทำ fade test ดังรายละเอียดใน รูปที่ 2.1-2.5



รูปที่ 2.1 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC1) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)



รูปที่ 2.2 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC2) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่ง ในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)



รูปที่ 2.3 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC3) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่งในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)



รูปที่ 2.4 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC4) มีสีเหลืองทอง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่งในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิม เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)



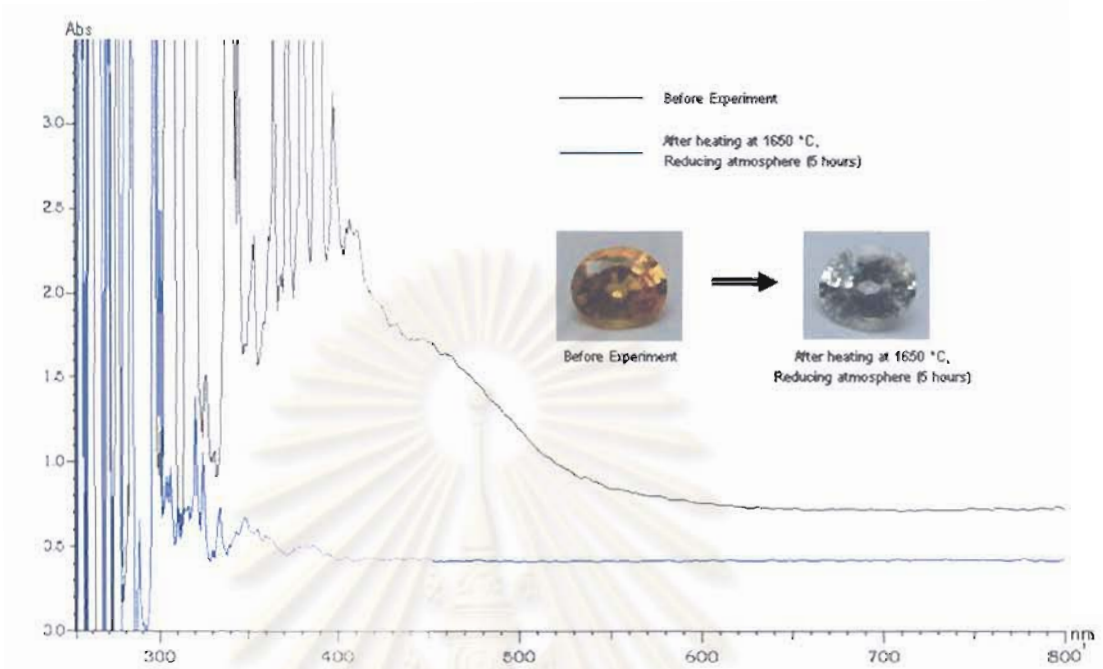
รูปที่ 2.5 พลอยบุษราคัมศรีลังกาเผาแล้ว (PC5) มีสีเหลือง (ซ้าย) เปลี่ยนเป็นไร้สีหลังเผาครั้งที่หนึ่งในบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (กลาง) และเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทอง เมื่อเผาครั้งที่สองในบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ขวา)

2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis

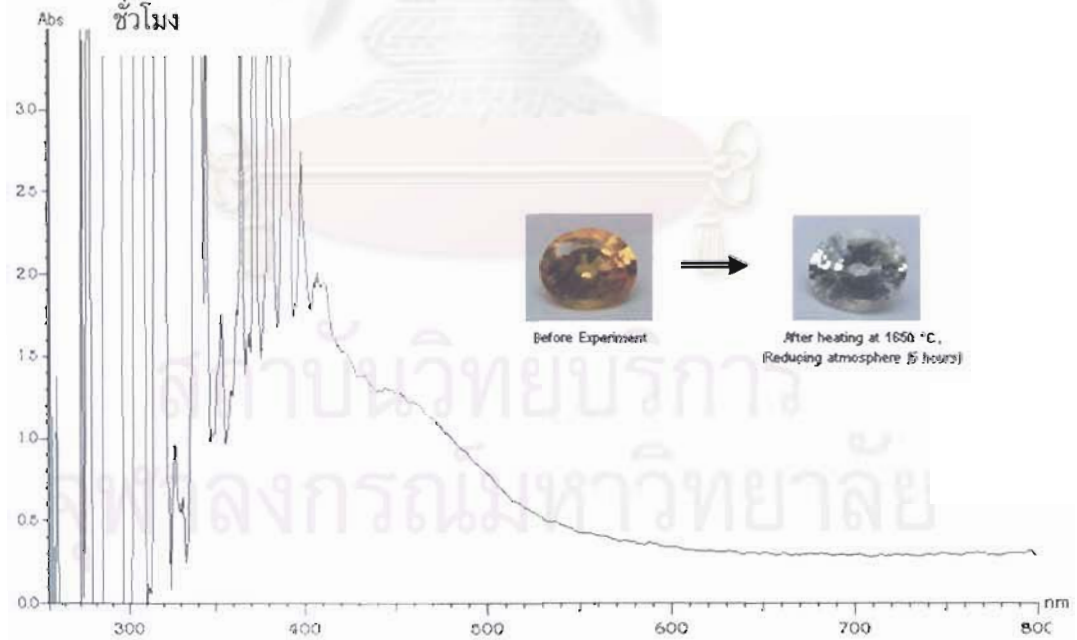
ในการที่จะตรวจสอบให้แน่ชัด และทราบถึงสาเหตุของสีที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงหลังเผา มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยแซปไฟร์ดังกล่าว ทั้งก่อนและหลังการทดลอง ที่ตำแหน่งเดียวกันและภายใต้สภาวะเดียวกัน

รายละเอียดของสเปกตรัม (o-rays) ทั้งก่อนและหลังการทดลองของพลอยบุษราคัมศรีลังกาแต่ละเม็ด ทั้ง 5 ตัวอย่าง ได้นำมาจัดวางในรูปเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ และสเปกตรัมที่เหลือที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนและหลังการทดลองหักลบกัน ได้จัดแสดงไว้ในอีกรูปถัดไป (รูปที่ 2.6 ถึง 2.15)

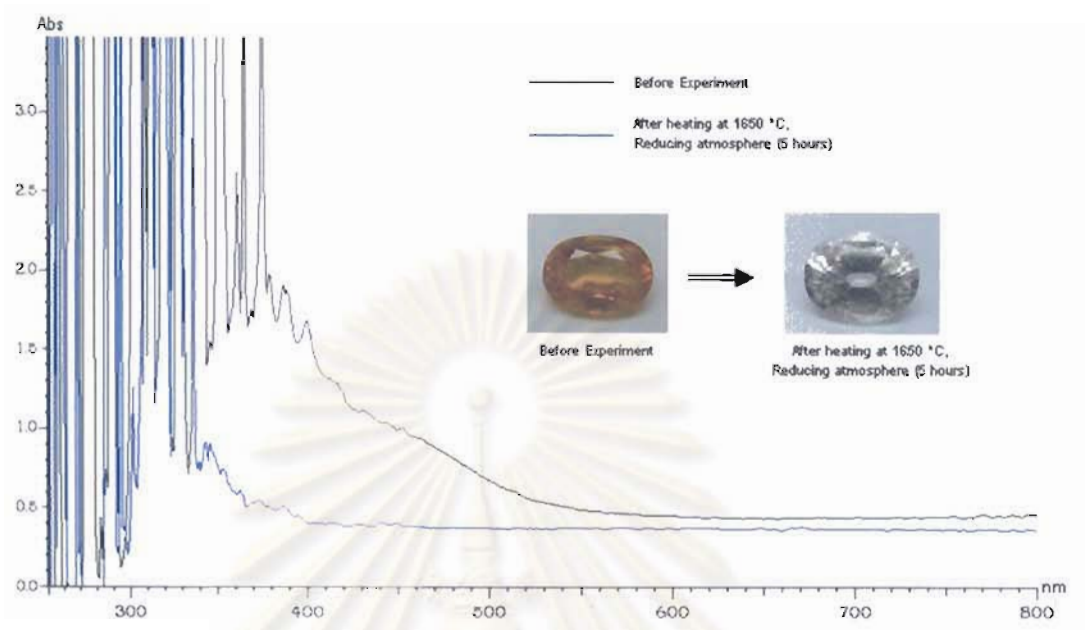
สรุปผลโดยรวมจากการทดลอง พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยทั้ง 5 ตัวอย่าง มีลักษณะที่คล้ายกัน คือสเปกตรัมก่อนทดลองแสดงการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางคลื่นสั้น และมีไหล่ที่ประมาณ 460 นาโนเมตร พบว่าสเปกตรัมของพลอยหลังเผาในสภาวะขาดออกซิเจนทั้ง 5 เม็ดไม่มีการดูดกลืนเลย โดยมีลักษณะราบเรียบที่สอดคล้องกับความไร้สีของพลอย ดังนั้นเมื่อทำการหักลบสเปกตรัมหลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลอง สเปกตรัมที่เหลือแสดงลักษณะเหมือนเดิม



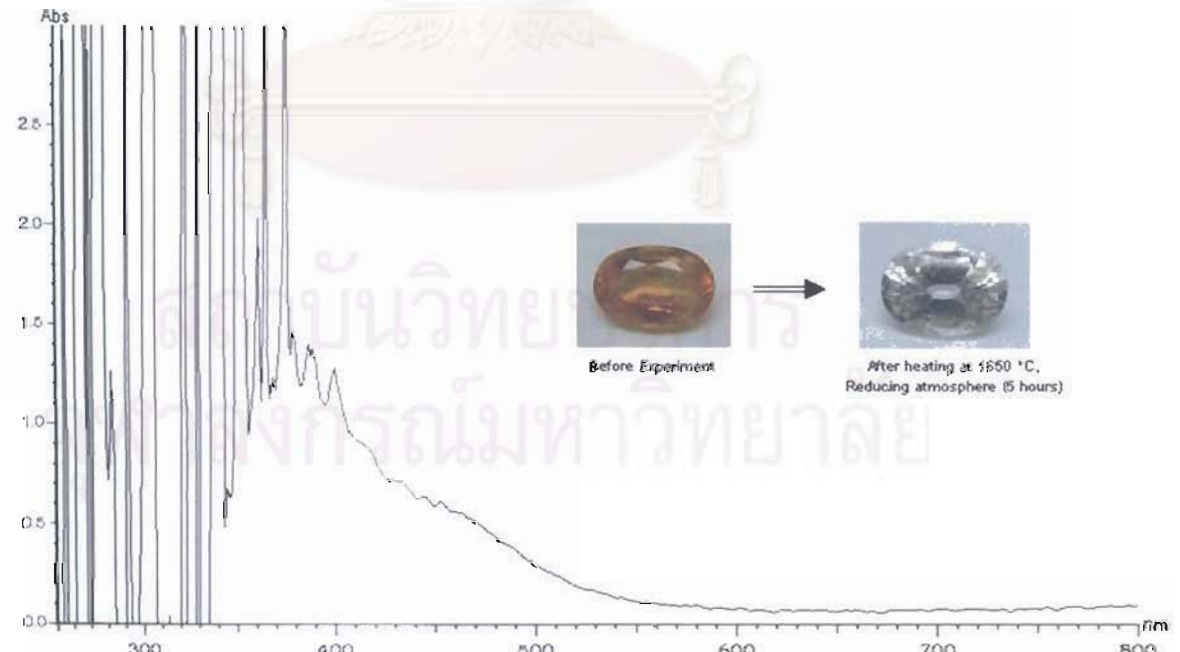
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC1 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



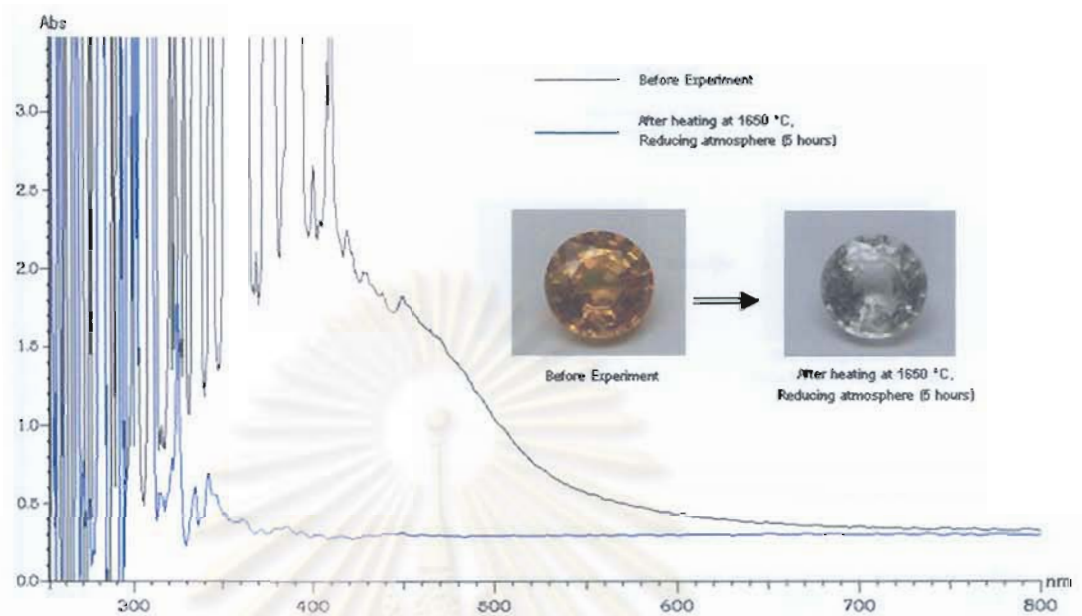
รูปที่ 2.7 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC1 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมหลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.6



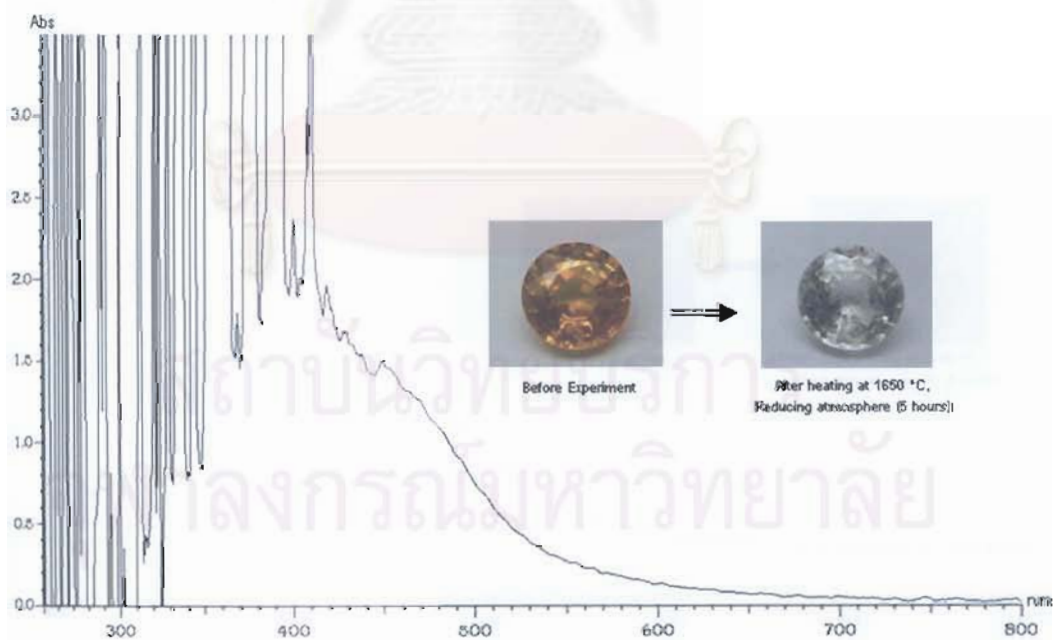
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC2 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



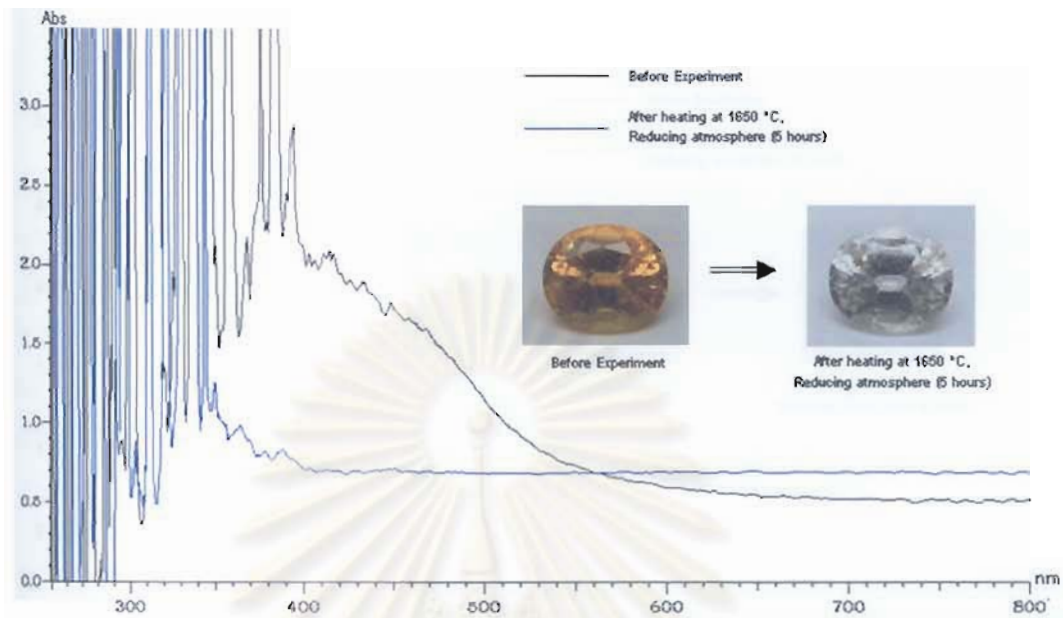
รูปที่ 2.9 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC2 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมหลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.8



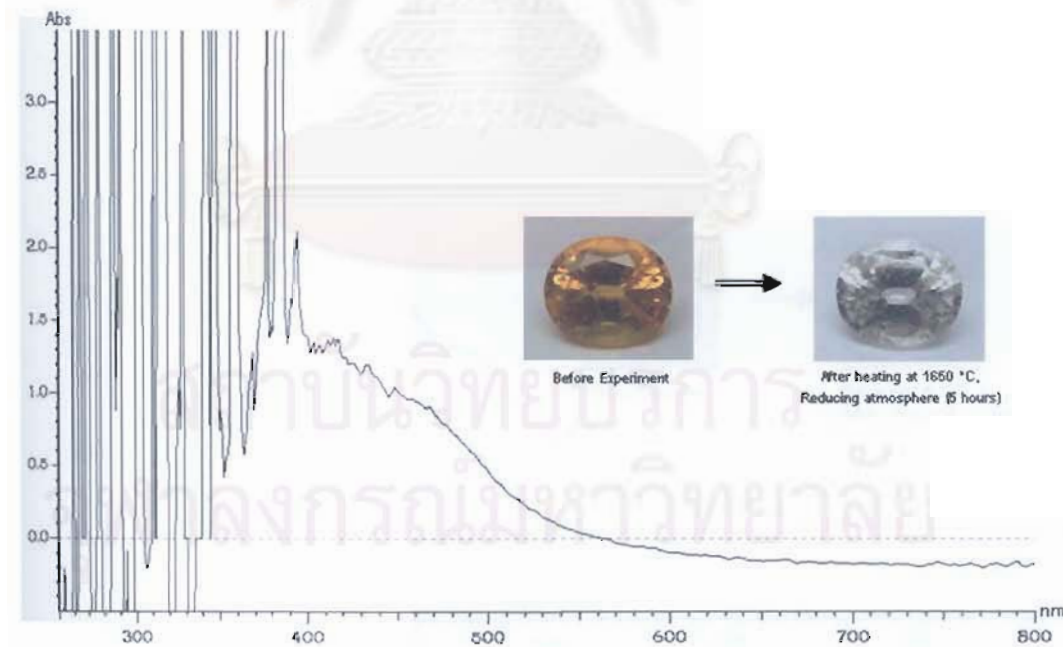
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC3 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



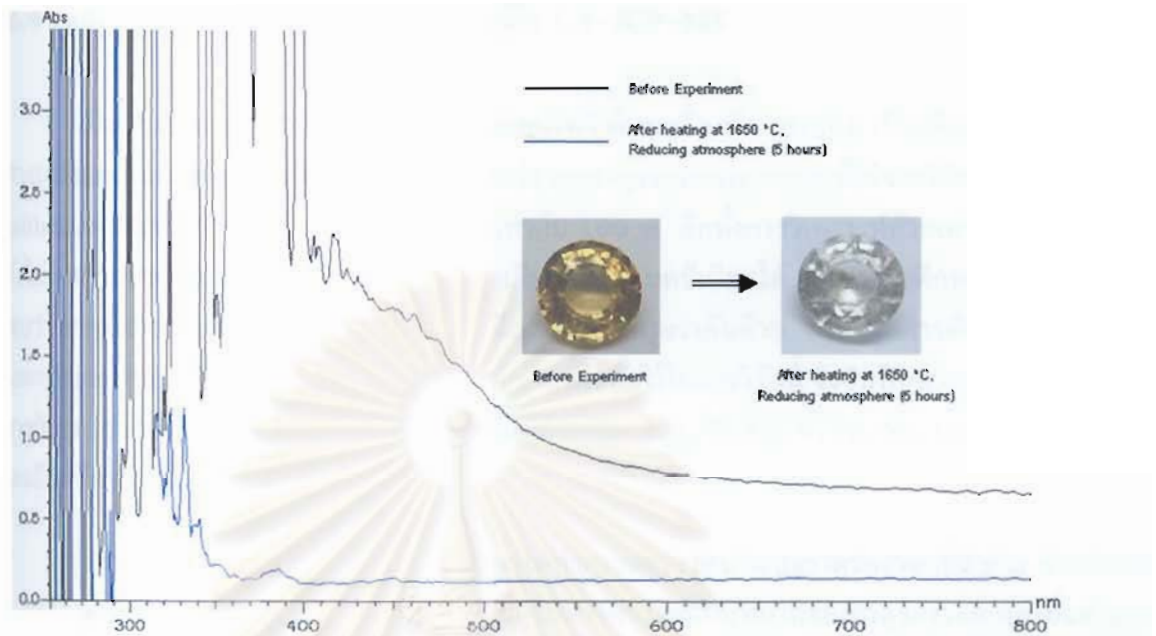
รูปที่ 2.11 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC3 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมหลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.10



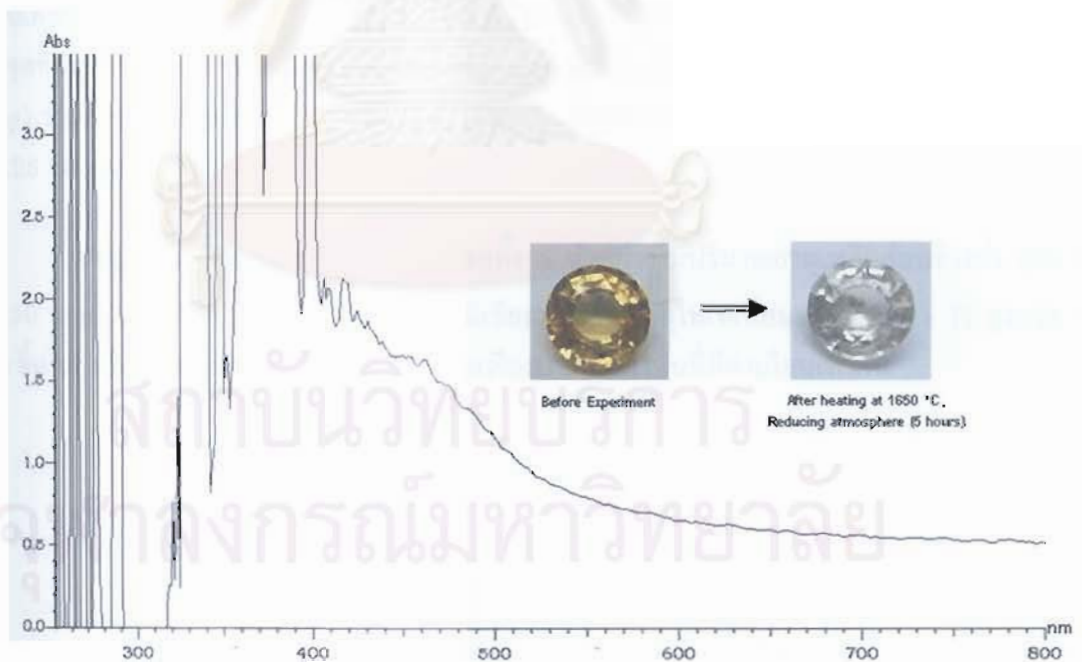
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC4 ที่ทำการวัดก่อนและหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC4 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมหลังการทดลองออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.14 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง PC5 ที่ทำการวัดก่อน และหลังทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 2.15 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง PC5 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมหลังการทดลองออกจาก สเปกตรัมก่อนการทดลองในรูปที่ 2.14

2.4 ผลวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

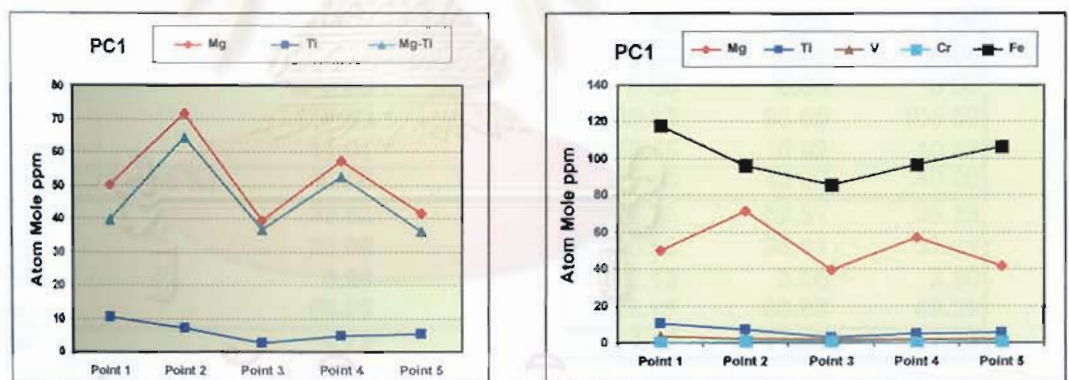
เนื่องจากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ ด้วยเครื่องมือ EDXRF เป็นเพียงองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างดังกล่าวเพียงคร่าว ๆ ที่เรียกว่า semi-quantitative result ที่ได้จากวิธีการ standard less calibration และทำการปรับเทียบให้ธาตุทั้งหมดเท่ากับ 100 % อีกทั้งการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF ยังไม่สามารถหาปริมาณธาตุที่เบามาก เช่น เบริลเลียม และ แมกนีเซียมได้ ซึ่งจากการศึกษาในระยะหลัง ๆ พบว่า ธาตุทั้งสองมีบทบาทในการทำให้เกิดสีเหลืองในพลอยบุษราคัมด้วย ดังนั้นในการที่จะทำความเข้าใจและอธิบายการเกิดสีเหลืองจากการเผาตามสมมุติฐานที่ได้ตั้งไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุร่องรอยที่สำคัญได้แก่ Be, Mg, Ti, Cr, V, Fe, Na, Mn and Ca อย่างละเอียดอีกครั้ง ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

พลอยบุษราคัมศรีลังกาทั้ง 5 ตัวอย่าง ได้ทำการตรวจวัดปริมาณธาตุร่องรอยที่สำคัญ ตัวอย่างละ 5 จุดบนหน้าพลอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ในการตรวจสอบบทบาทของธาตุร่องรอยเหล่านั้นต่อการเกิดสี จำเป็นต้องทำการคำนวณปริมาณธาตุ cations ทั้งหมด จาก ppm โดยน้ำหนักธาตุ เป็น atom mole ppm (amp) เพราะการทำปฏิกิริยาหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างธาตุต่าง ๆ นั้นเกิดขึ้นโดยจำนวนอะตอม ไม่ใช่โดยน้ำหนัก ทั้งนี้สามารถทำได้โดยการปรับเทียบ จำนวน cations ทั้งหมดให้เท่ากับ 40 atom mole % ที่เทียบเท่ากับจำนวนออกซิเจน 60 atom mole % ในโครงสร้างของ Al_2O_3 100 atom mole % รายละเอียดของจุดที่ทำวิเคราะห์ ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่เป็น ppm โดยน้ำหนัก และ ค่าที่คำนวณเป็น atom mole ppm (amp) รวมทั้งการแสดงผลในรูปของกราฟต่าง ๆ และผลที่ได้ของพลอยแต่ละเม็ด ได้จัดแสดงในรูปที่ 2.16 - 2.25 และตารางที่ 2.3 - 2.7

จากรูปและตารางดังกล่าว พบว่าพลอยทั้ง 5 ตัวอย่าง มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ (Fe ~30 - 350 amp) และปรากฏว่ามีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมมาก (Mg > Ti สูงกว่า ~20 amp ขึ้นไป) เกือบทุกจุดที่ทำวิเคราะห์ยกเว้นเพียงบางจุดเท่านั้นที่มีค่าเกือบเท่ากัน



รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดจากซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 2.17 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC1 ในรูปที่ 2.16 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 85-120$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti = 36-64$ ppm)

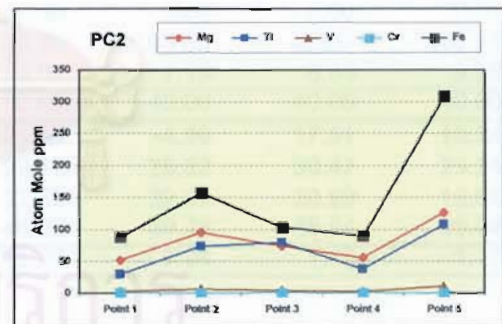
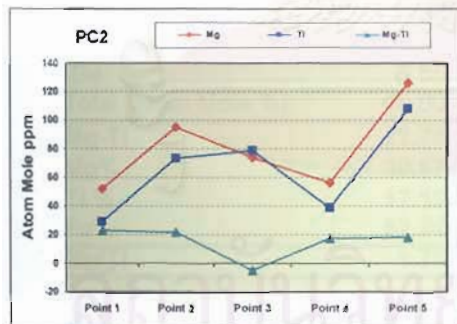
ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC1 ด้วยวิธี LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

PC1	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.221	<0.171	<0.169	<0.112	0.092
Na	3.45	10.67	1.96	<0.85	0.77
Mg	59.73	85.44	47.04	68.41	49.62
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	24.58	16.87	6.40	11.41	12.65
V	7.58	5.26	3.69	4.71	5.91
Cr	<0.91	0.90	0.74	0.52	0.91
Mn	<0.207	<0.154	<0.176	0.10	<0.074
Fe	322.89	263.72	234.05	264.83	291.81
Ga	37.66	40.52	35.73	37.37	37.19
Total %	52.97	52.97	52.96	52.96	52.96
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21
Na	3.06	9.46	1.74	0.00	0.68
Mg	50.09	71.65	39.45	57.37	41.61
Al	399804.52	399801.18	399858.45	399828.07	399832.02
Ti	10.46	7.18	2.72	4.86	5.38
V	3.03	2.10	1.48	1.88	2.36
Cr	0.00	0.35	0.29	0.20	0.36
Mn	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
Fe	117.83	96.24	85.42	96.65	106.50
Ga	11.01	11.85	10.45	10.92	10.87
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	39.63	64.47	36.73	52.51	36.23
Mg%	28.08	40.93	30.92	36.11	27.11
Ti %	5.86	4.10	2.13	3.06	3.50
Fe%	66.06	54.97	66.95	60.83	69.29
Mg/Ti	4.79	9.98	14.49	11.82	7.73

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 2.18 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดจากซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 2.19 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC2 ในรูปที่ 2.18 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 90-310$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากเกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 17-23$ ppm) ยกเว้นจุดที่ 3 ซึ่งมีน้อยกว่าเล็กน้อย ($Mg-Ti \sim -5$ ppm) ซึ่งดูเหมือนจะอยู่ตรงบริเวณจุดสีน้ำเงินจาง ๆ

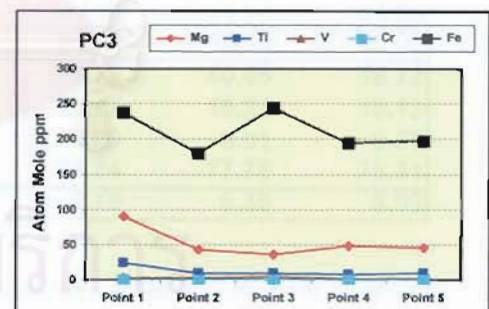
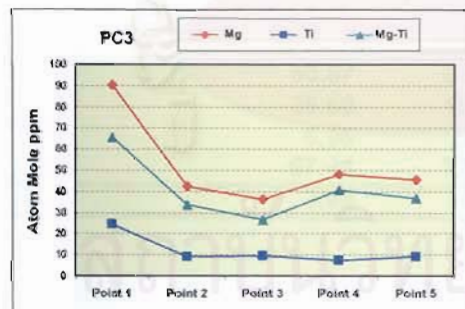
ตารางที่ 2.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC2 ด้วยวิธี LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 1 ถึง 2 เกือบทุกจุดที่วิเคราะห์

PC2	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.118	<0.138	3.06	<0.134	0.193
Na	<0.89	1.1	<1.12	<0.97	<1.09
Mg	62.09	113.52	88.26	67.06	150.56
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	68.82	173.06	185.46	91.01	253.81
V	7.93	17.22	9.49	8.29	28.23
Cr	<0.44	<0.49	<0.54	0.48	<0.54
Mn	<0.103	<0.121	<0.133	<0.114	<0.128
Fe	243.81	433.39	284.58	245.44	847.01
Ga	22.40	27.43	24.61	23.35	33.48
Total %	52.97	53.00	52.98	52.97	53.06
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	6.92	0.00	0.44
Na	0.00	0.97	0.00	0.00	0.00
Mg	52.07	95.16	74.00	56.23	126.14
Al	399819.95	399657.26	399725.37	399805.14	399435.66
Ti	29.28	73.61	78.90	38.72	107.89
V	3.17	6.89	3.80	3.32	11.28
Cr	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	88.98	158.10	103.83	89.57	308.81
Ga	6.55	8.02	7.19	6.83	9.78
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	22.78	21.55	-4.90	17.51	18.24
Mg%	30.57	29.11	28.82	30.47	23.24
Ti %	17.19	22.52	29.93	20.99	19.86
Fe%	52.24	48.37	39.38	48.54	56.84
Mg/Ti	1.78	1.29	0.94	1.45	1.17

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดจากซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 2.21 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC3 ในรูปที่ 2.20 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ (Fe ~185-245 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มาตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 27-66 amp)

ตารางที่ 2.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC3 ด้วยวิธี LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

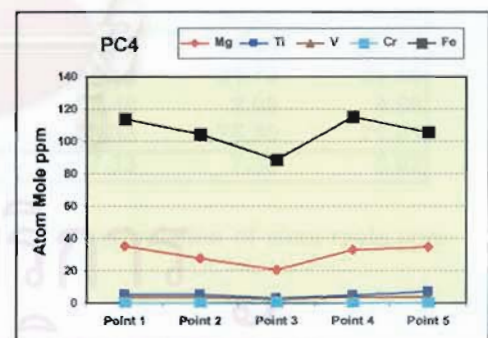
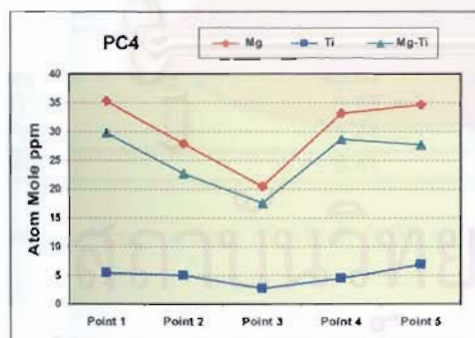
PC3	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.100	<0.130	<0.122	<0.151	<0.099
Na	<0.82	<1.03	<0.94	<1.09	<0.80
Mg	107.88	50.83	43.31	57.47	54.53
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	57.74	21.15	22.54	17.72	21.15
V	7.21	5.37	9.21	4.56	4.35
Cr	0.42	<0.50	<0.46	<0.55	0.47
Mn	<0.097	<0.125	<0.112	<0.131	<0.099
Fe	653.02	492.58	672.47	534.63	541.57
Ga	82.99	72.04	79.02	75.07	72.06
Total %	53.01	52.98	53.00	52.99	52.99
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	90.42	42.62	36.31	48.18	45.72
Al	399619.53	399745.45	399682.00	399725.45	399724.71
Ti	24.56	9.00	9.59	7.54	9.00
V	2.88	2.15	3.68	1.82	1.74
Cr	0.16	0.00	0.00	0.00	0.18
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	238.19	179.73	245.33	195.06	197.59
Ga	24.25	21.06	23.09	21.94	21.06
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	65.87	33.62	26.72	40.65	36.72
Mg%	25.60	18.42	12.47	19.21	18.12
Ti %	6.95	3.89	3.29	3.01	3.57
Fe%	67.44	77.69	84.24	77.78	78.31
Mg/Ti	3.68	4.74	3.79	6.39	5.08

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.22 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดจากซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอย บุชราคัมศรี ลังกา ตัวอย่าง PC4 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 2.23 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC4 ในรูปที่ 2.22 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ (Fe ~90-115 ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 18-30 ppm)

ตารางที่ 2.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพอลอยบุษราคัมตรีสังกา ตัวอย่าง PC4 ด้วยวิธี LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

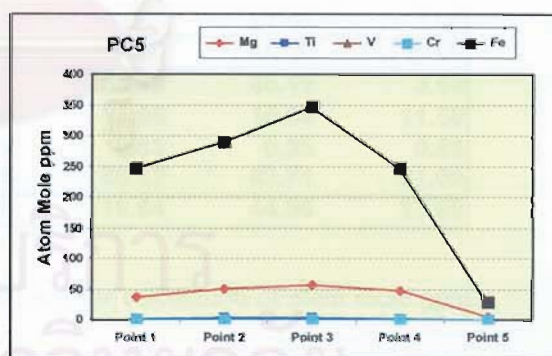
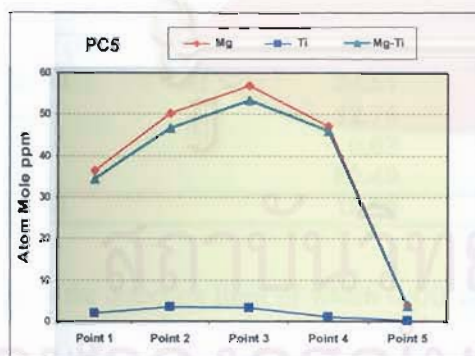
PC4	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	0.206	<0.123	<0.157	<0.126	0.134
Na	9.47	<0.85	<1.03	<0.84	<0.95
Mg	42.07	33.24	24.37	39.60	41.35
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	12.93	11.89	6.55	10.69	16.24
V	9.38	8.35	6.50	9.45	9.01
Cr	<0.43	0.72	1.02	0.57	0.58
Mn	<0.104	<0.102	<0.121	<0.099	<0.112
Fe	311.96	287.49	244.16	315.38	289.54
Ga	30.18	28.80	26.15	30.66	30.01
Total %	52.97	52.96	52.96	52.97	52.96
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.47	0.00	0.00	0.00	0.30
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	35.28	27.88	20.44	33.21	34.68
Al	399832.32	399850.10	399877.01	399834.17	399839.83
Ti	5.50	5.06	2.79	4.55	6.91
V	3.75	3.34	2.60	3.78	3.61
Cr	0.00	0.28	0.40	0.22	0.23
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	113.85	104.92	89.12	115.10	105.67
Ga	8.82	8.42	7.65	8.96	8.77
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	29.78	22.82	17.65	28.66	27.77
Mg%	22.82	20.22	18.19	21.73	23.55
Ti %	3.55	3.67	2.48	2.98	4.68
Fe%	73.41	76.11	79.33	75.30	71.61
Mg/Ti	6.41	5.51	7.33	7.30	5.02

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.24 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดจากซ้ายไปขวา บนด้านหน้าของพลอยบุษราคัมศรี ลิงกา ตัวอย่าง PC5 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 2.25 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง PC5 ในรูปที่ 2.24 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ (Fe ~30-350 amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากเกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 35-54 amp) ยกเว้นจุดที่ 5 ที่มีมากกว่าเพียงเล็กน้อย (Mg-Ti ~ 4 amp)

ตารางที่ 2.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมศรีลังกา ตัวอย่าง PC5 ด้วยวิธี LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti ratio มีค่ามากกว่า 2 ทกจุดที่วิเคราะห์

PC5	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	0.131	<0.144	<0.27	<0.154	0.017
Na	<0.70	<0.93	<1.61	<1.10	<0.087
Mg	43.46	60.01	67.84	56.35	4.65
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	4.51	8.45	7.94	2.47	0.52
V	1.13	1.50	1.66	1.04	0.16
Cr	<0.34	0.48	<0.80	<0.53	0.06
Mn	<0.083	0.14	<0.186	<0.129	<0.0101
Fe	678.05	796.16	952.39	680.06	81.65
Ga	93.47	98.71	114.79	94.20	10.48
Total %	53.01	53.02	53.04	53.01	52.93
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.30	0.00	0.00	0.00	0.30
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	36.43	50.30	56.85	47.24	3.90
Al	399686.06	399626.25	399558.24	399675.68	399962.46
Ti	1.92	3.59	3.38	1.05	0.22
V	0.45	0.60	0.66	0.42	0.06
Cr	0.16	0.00	0.00	0.00	0.18
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	247.37	290.41	347.34	248.09	29.81
Ga	27.32	28.84	33.54	27.53	3.06
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	34.51	46.71	53.48	46.19	3.68
Mg%	12.75	14.61	13.95	15.94	11.50
Ti %	0.67	1.04	0.83	0.35	0.65
Fe%	86.49	84.35	85.22	83.71	87.09
Mg/Ti	18.99	14.00	16.84	44.96	17.59

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

2.5 อภิปรายผล

จากการนำพลอยบุษราคัมเผาแบบดั้งเดิมทั้ง 5 ตัวอย่างจากศรีลังกา (คือพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือที่เรียกว่า พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร) มาเผาครั้งที่หนึ่งที่อุณหภูมิ 1,650 °C ในสภาวะบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน (ไนโตรเจนบริสุทธิ์) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าสีพลอยทั้ง 5 เม็ดเปลี่ยนจากเดิมที่มีสีเหลืองทองก่อนการทดลองไปเป็นไม่มีสีหลังการเผาครั้งที่หนึ่ง และพลอยไร้สีดังกล่าวเมื่อนำมาเผาครั้งที่สองในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง (ออกซิเจนบริสุทธิ์) ที่อุณหภูมิ 1650°C

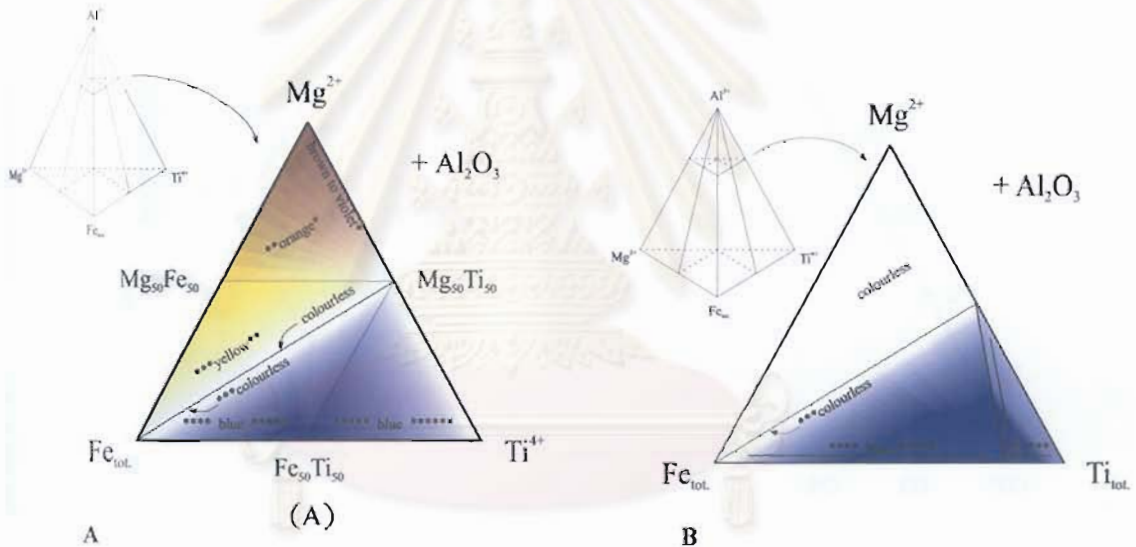
เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าสีของพลอยเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเหลืองทองเหมือนเดิมหลังเผาครั้งที่สอง และพบว่าป็นสีเหลืองที่เสถียรหลังทำ fade test จากผลของการเผากลับไปกลับมาทั้งสองครั้งนี้แสดงว่า สีเหลืองทองที่เสถียรของพลอยบุษราคัมศรีลังกาที่ได้จากการเผาแบบดั้งเดิมนั้น เกิดขึ้นได้ต้องเผาในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูงเท่านั้น แสดงว่าออกซิเจนก็มีส่วนทำให้เกิดศูนย์กลางสีดังกล่าว ซึ่งข้อมูลตรงนี้เป็นที่ทราบกันดีในวงการเผาพลอยไทย

สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยทั้ง 5 เม็ดวัดก่อนทดลองแสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางคลื่นรังสียูวีหรือคลื่นสั้น และแสดงลักษณะโหล่ที่ประมาณ 460 นาโนเมตร ลักษณะสเปกตรัมแบบนี้เป็นที่ทราบกันดีว่า เกิดจากจุดบกพร่อง (defect centres) ในโครงสร้างของผลึก Al_2O_3 หรือที่เรียกว่า ศูนย์กลางสีที่เสถียร (stable colour centres) หรือ ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centres) ที่พบในพลอยบุษราคัมศรีลังกา (Schmetzer et al. 1983; Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993) แต่สเปกตรัมของพลอยทั้ง 5 เม็ดวัดหลังเผาครั้งแรกปรากฏเป็นเส้นตรงราบเรียบที่ไม่แสดงการดูดกลืนเลย เพราะเป็นพลอยไร้สี ดังนั้นเมื่อทำการหักลบสเปกตรัมหลังเผาครั้งแรกออกจากสเปกตรัมก่อนการทดลอง พบว่า สเปกตรัมที่เหลือก็คือลักษณะสเปกตรัมที่เรียกว่า ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร นั่นเอง

ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS บนตัวอย่างพลอยทั้ง 5 เม็ด ๆ ละ 5 จุดบริเวณด้านหน้าพลอย พบว่าพลอยกลุ่มนี้มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างต่ำ ($Fe \sim 85 - 350 \text{ ppm}$) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าพลอยบุษราคัมศรีลังกา มีธาตุเหล็กเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 ค่อนข้างน้อย ซึ่งเป็นแบบฉบับของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่มากเกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti > \sim 20 \text{ ppm}$) ยกเว้นบางจุดมีปริมาณใกล้เคียงกัน มีจุดที่ 3 ของตัวอย่าง PC2 ที่พบว่ามีปริมาณธาตุไทเทเนียมมากกว่าธาตุแมกนีเซียมอยู่เล็กน้อย ($\sim 5 \text{ ppm}$) ที่จุดนี้ดูเหมือนว่าอยู่บริเวณจุดสีน้ำเงินจาง ๆ

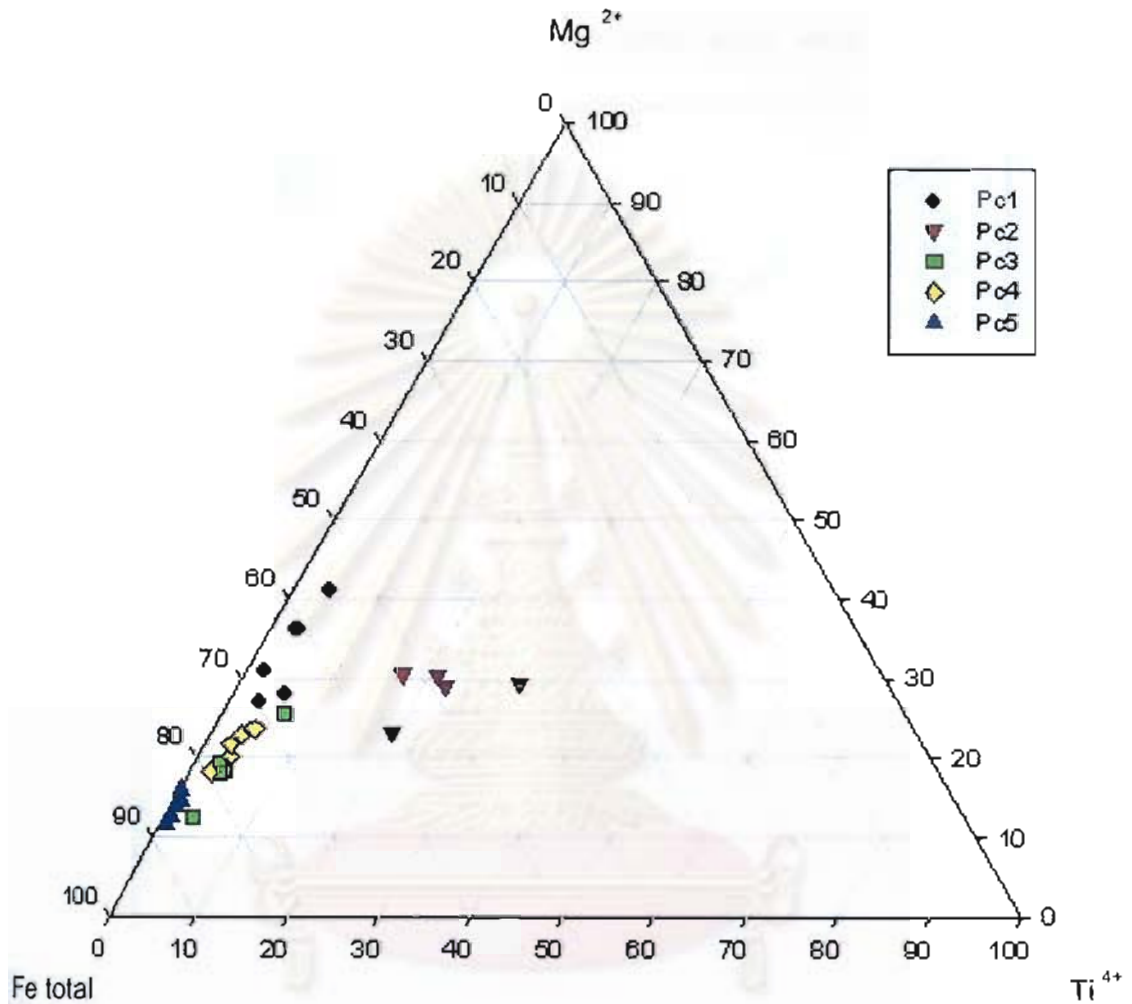
จากการผลทดลองนี้ ทำให้เราเชื่อว่าธาตุแมกนีเซียมหลังจากที่ไปจับกับธาตุไทเทเนียมในรูปของ (colourless) $MgTiO_3$ clusters จนไม่มีธาตุไทเทเนียมเหลืออีกแล้ว Mg^{2+} ที่เหลือมากเกินไปสามารถทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้ หรือที่เรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า “ศูนย์กลางสีที่ตรึงโดยแมกนีเซียม (Mg-trapped hole colour centres)” เมื่อเผาพลอยดังกล่าวในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (e.g. Kvapil et al., 1973; Andreev et al., 1976; Wang et al., 1983; Emmett and Douthit, 1993; Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett et al., 2003; Schmetzer et al. 1983, 2004; Pisutha-Armond et al., 2004, 2006) และสีเหลืองดังกล่าวสามารถทำลายได้ ถ้าเผาในสภาวะขาดออกซิเจน แต่การเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้นั้น ไม่ได้มีเพียงเฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงตัวเดียว ทั้งนี้เพราะจากการทดลองสังเคราะห์พลอยคอร์ันดัม ของ Kvapil, et al. (1973), Wang et al. (1983) และ Häger (1996, 2001) พบว่าถ้ามีเฉพาะธาตุแมกนีเซียมเพียงตัวเดียวในโครงสร้าง Al_2O_3 จะได้พลอยสีม่วงแกมน้ำตาล ไม่ใช่สีเหลือง ต่อมา Häger (1996, 2001) พบว่าการเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้นั้น จำเป็นต้องมีทั้งธาตุแมกนีเซียมและ

เหล็กร่วมอยู่ด้วยในโครงสร้าง Al_2O_3 (รูปที่ 2.26) ซึ่งในกรณีของพลอยธรรมชาติปกติก็จะมีธาตุเหล็กจำนวนหนึ่งอยู่เสมอ ดังนั้นเมื่อนำปริมาณธาตุร่องรอยของพลอยกลุ่มนี้ไปแสดงในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ในรูปที่ 2.27 ปรากฏว่าค่าที่แสดงส่วนใหญ่ตกอยู่บริเวณสีเหลืองในรูปที่ 2.26A และเมื่อนำมาจัดแสดงใน Mg-Ti Cross plot ในรูปที่ 2.28 ค่าที่ได้ส่วนใหญ่ตกอยู่เหนือเส้น Mg:Ti ratio ที่ 2:1 (และสอดคล้องกับตัวอย่าง YSR1H ที่เป็นพลอยศรีลังกาเผาแล้วของ คุณ รักษ์ ธรรมชาติ) แต่มีข้อยกเว้นสำหรับตัวอย่าง PC2 ที่มี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่างเส้น 2:1 ถึง 1:1 แต่ก็ยังแสดงสีเหลืองเด่นชัด ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า สีเหลืองที่เกิดขึ้นจากการเผาปกติในพลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือกลุ่มกำเนิดแบบสัมพันธ์กับหินแปร มีสาเหตุมาจากความบกพร่องในโครงสร้างผลึก Al_2O_3 ที่เรียกว่า ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centres หรือ Mg-trapped hole colour centres) ที่มีธาตุแมกนีเซียมทำให้เสถียร (โดยมีธาตุเหล็กร่วมด้วย) ที่มากเกินไป (Mg>Ti) ทั้งนี้ Mg:Ti ratio ควรจะมีมากกว่าประมาณ 2:1 จึงได้ผลดี โดยที่ต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง

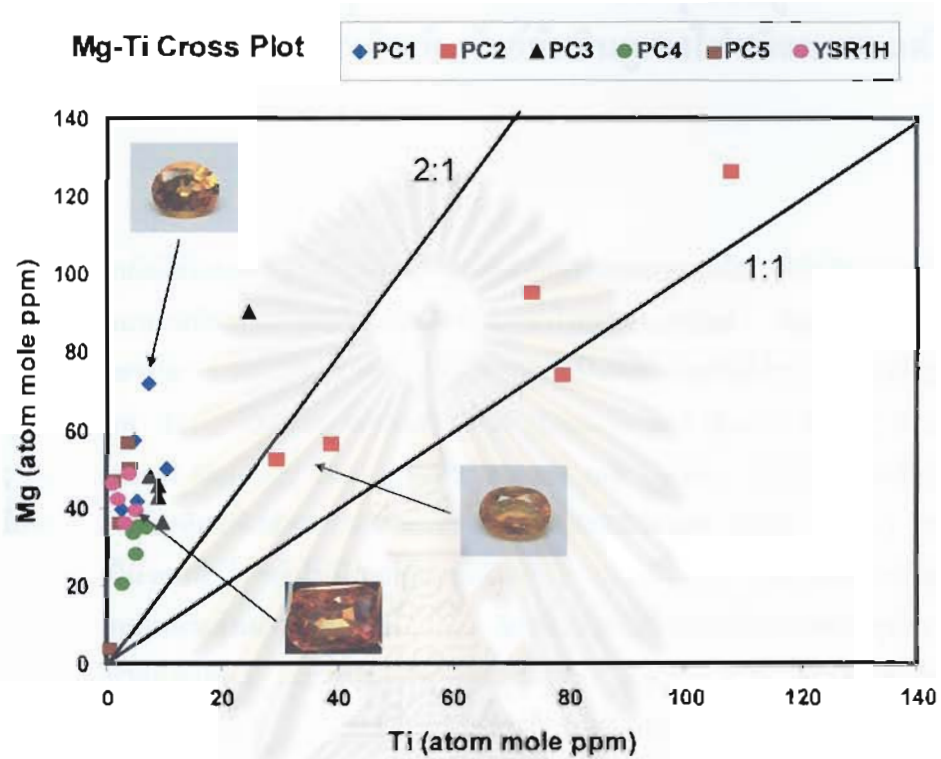


- * colour centre due to Mg
- ** colour centre due to Mg and Fe
- *** yellow due to Fe^{3+}
- **** Fe^{2+}/Fe^{3+} -charge transfer green due to Fe^{3+}
- ***** Fe^{2+}/Ti^{4+} -charge transfer
- ***** precipitation of TiO_2

รูปที่ 2.26 ภาพแสดงความสัมพันธ์ของธาตุร่องรอยในระบบ Al-Mg-Fe-Ti (รูปเหลี่ยมสี่ด้าน) จากรูปเหลี่ยมสี่ด้านถ้าตัดขนานกับด้านฐานจะได้รูปสามเหลี่ยมที่เป็นเสมือนตัวแทนปริมาณธาตุในคอร์ันดัมในระดับ ppm รูปสามเหลี่ยมทางด้านซ้าย (A) แทนแซปไฟร์เผาที่อุณหภูมิ 1850°C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง ส่วนรูปทางขวา (B) แทนแซปไฟร์เผาที่อุณหภูมิ 1750°C ในสภาวะขาดออกซิเจน Häger (1996, 2001)



รูปที่ 2.27 แสดงข้อมูลผลวิเคราะห์ในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยบุษราคัม ศรีลังกา (PC1-5) ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร



รูปที่ 2.28 แสดงข้อมูลผลวิเคราะห์ ใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยบุษราคัมศรีลังกา (ตัวอย่าง PC1-5 จากการศึกษาในครั้งนี้ และตัวอย่าง YSR1H ที่เผาแล้วของ คุณ รักษ์ ธรรมชาติ) ที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำหรือแบบจับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

พลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง

(แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์)

3.1 บทนำ


เนื่องจากยังมีข้อสงสัยว่า สาเหตุของการเกิดสีของพลอยบุษราคัม ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่เรียกว่า “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” ที่เผาด้วยวิธีปกติ หรือเผาเก่า โดยไม่มีการเติมสารใด ๆ ลงไปในบ้านั้น ยังมีบางส่วนที่ไม่กระจ่างเท่าที่ควร ว่าสีเหลืองที่ได้จากการเผาปรกตินั้น เกิดจาก Fe^{3+} เป็นหลัก เพียงอย่างเดียว (Lehman and Harder, 1970; Krebs and Maisch, 1971; Ferguson and Fielding, 1971, 1972; Nassau and Valente, 1987) หรือเป็นผลรวมที่เกิดจาก Fe^{3+} กับศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (Schmetzer et al. 1983; Häger, 1996, 2001) ทั้งนี้เพราะยังไม่มี การศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยยังไม่มีการควบคุมทิศทางการวางตัวอย่าง เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่น แสงของพลอยก่อนและหลังเผาอย่างดีพอ อีกทั้งยังไม่มี การตรวจวิเคราะห์ธาตุร่องรอยในพลอยเพื่อ ประกอบการอธิบายการเกิดสี ฉะนั้นในบทนี้จึงขอนำเสนอรายงานการวิจัย ตัวอย่างพลอยบุษราคัมสดที่มี ปริมาณธาตุเหล็กสูง และเป็นแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ จาก 2 แห่งใน ประเทศไทย โดยนำมาทดลองเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียง เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของสี และ ตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง UV-Vis ทั้งก่อนและหลังเผา รวมทั้งวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ร่องรอยหลังเผาด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS เพื่อศึกษาว่า ตัวอย่างพลอยบุษราคัมดังกล่าว มีสาเหตุ ของการเกิดสีเหลืองแบบใด? สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ธาตุทางเคมีหรือไม่? อย่างไร?

3.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน

พลอยที่นำมาศึกษาในกลุ่มนี้ได้แก่ พลอยบุษราคัมสด จาก อ. บางกะจะ จ. จันทบุรี จำนวน 5 ตัวอย่าง และพลอยแซปไฟร์สดไร้สีอีก 1 ตัวอย่าง จาก อ. บ่อพลอย จ. กาญจนบุรี ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่รู้จักกันว่าเป็นพลอยบุษราคัม “แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” สมบัติ พื้นฐานของพลอยทั้ง 6 เม็ดนี้ แสดงในตารางที่ 3.1 พลอยบางกะจะ สามตัวอย่างแรก (YCH1-3) เป็น พลอยบุษราคัมสดสีเหลืองอ่อนทั้งเม็ด ส่วนพลอยบางกะจะตัวอย่างที่สี่และห้า (YGCH1-2) เป็นพลอย บุษราคัมสดสีเหลืองอ่อนและมีแถบน้ำเงินสีเขียว(cyan) บริเวณขอบด้านหนึ่ง สาเหตุที่เลือกพลอยเม็ดที่สี่ และห้ามาศึกษา ก็เนื่องจากว่าจะได้เห็นการเปลี่ยนแปลงของสีเหลืองและน้ำเงินสีเขียวหลังเผา ว่าสอดคล้อง กับสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis และปริมาณธาตุร่องรอย หรือไม่? อย่างไร? ผล

วิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องมือ EDXRF แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งปรากฏว่า ตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณ Fe_2O_3 ที่ค่อนข้างสูง

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยบุษราคัมสด จำนวน 4 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี (RI = refractive indices, SG = specific gravity, SW UV = short wave ultraviolet, LW UV = long wave ultraviolet)

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		Picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
YCH1 บางกะจะ	1.909	1.760	1.769	Light yellow	3.99	Inert	Weak orange	
YCH2 บางกะจะ	1.460	1.762	1.770	Light yellow	3.96	Inert	Inert	
YCH3 บางกะจะ	0.930	1.760	1.768	Light yellow	3.90	Inert	Inert	
YGCH1 บางกะจะ	1.859	1.762	1.770	Light Yellow with blue zone	3.97	Inert	Inert	
YGCH2 บางกะจะ	1.852	1.760	1.768	Light Yellow with blue zone	3.98	Inert	Inert	
YKB2 บ่อพลอย	0.564	1.760	1.769	Color less	3.97	Inert	Inert	

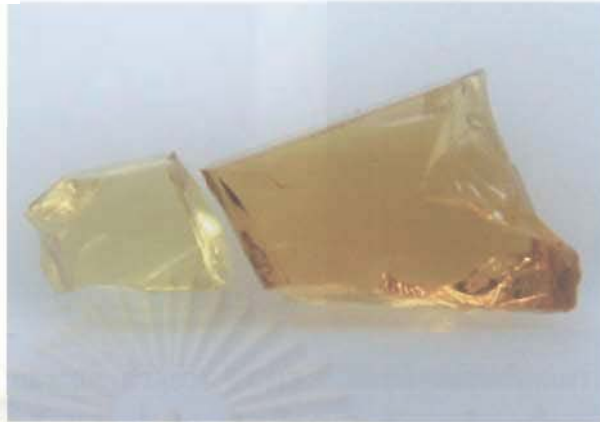
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยบุษราคัมสด จำนวน 4 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF

Sample no.	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
YCH1	99.62	0.01	0.33	0.02	0.00	0.01
YCH2	99.40	0.01	0.56	0.02	0.00	0.02
YCH3	97.62	0.00	2.31	0.04	0.00	0.02
YGCH1	98.70	0.01	1.26	0.01	0.00	0.02
YGCH2	97.41	0.00	2.50	0.04	0.00	0.05
YKB2	99.05	0.02	0.85	0.02	0.01	0.05

3.3 ผลของการทดลองเผา

พลอยบุษราคัมสดทั้ง 6 เม็ด ได้ทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1,600-1,650°C เป็นเวลา 6-10 ชั่วโมง ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (ภายใต้อากาศปกติ หรือบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์) รายละเอียดการเผาและผลของสีที่เปลี่ยนไปของพลอยแต่ละเม็ด แสดงใน รูปที่ 3.1-3.6

ผลโดยรวมของพลอยกลุ่มนี้สรุปได้ว่า พลอยบุษราคัมสด จาก อ. บางกะจะ จ. จันทบุรี จำนวน 5 เม็ด มีการเปลี่ยนสีจากเหลืองอ่อนก่อนเผา ไปเป็นสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) หลังเผาอย่างชัดเจน และพบว่าเป็นสีเหลืองทองที่เสถียรหลังทำ fade test (รูปที่ 3.1-3.5) สำหรับพลอยเม็ดที่มีแถบสีน้ำเงินเขียว พบว่าน้ำเงินสีเขียวจางลงเล็กน้อย (รูปที่ 3.4 และ 3.5) ในทำนองเดียวกันสำหรับพลอยแซปไฟร์สดไร้สีอีก 1 เม็ดจาก อ. บ่อพลอย จ. กาญจนบุรี คือตัวอย่าง YKB2 ก็สามารถเผาจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองทองได้ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.1 แสดงการเปรียบเทียบสีพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH1 ที่ตัดแบ่งเป็นสองชิ้น ชิ้นเล็กทางซ้าย คือพลอยก่อนเผาสีเหลืองอ่อนเก็บไว้สำหรับการเปรียบเทียบ ส่วนชิ้นใหญ่ทางขวา คือพลอยหลังเผาที่อุณหภูมิ $1,600^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศปรกติ ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม็ซง) ที่เสถียร (เผาโดยคุณ รัก ธรรมชาติ และ ถ่ายภาพโดย ชนิตา สมบุญ)



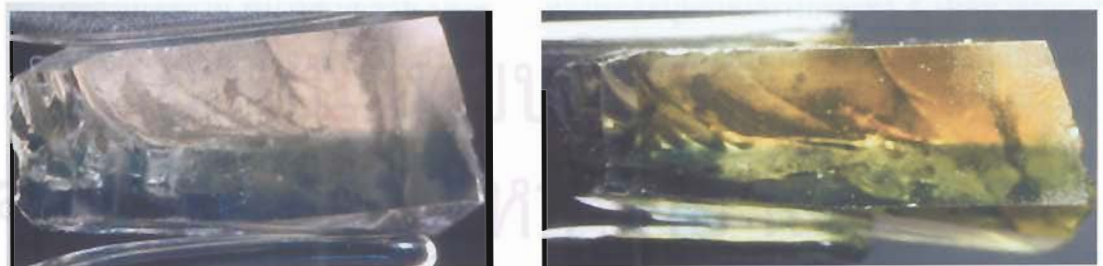
รูปที่ 3.2 พลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH2 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้ายแสดงสีก่อนเผาและ ก่อนเจียรระไน) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม็ซง) ที่เสถียร หลังเผาที่ อุณหภูมิ $1,600^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในอากาศปรกติ (รูปขวาหลังจากเจียรระไน) (เผาโดยคุณ รัก ธรรมชาติ และ ถ่ายภาพโดย ชนิตา สมบุญ)



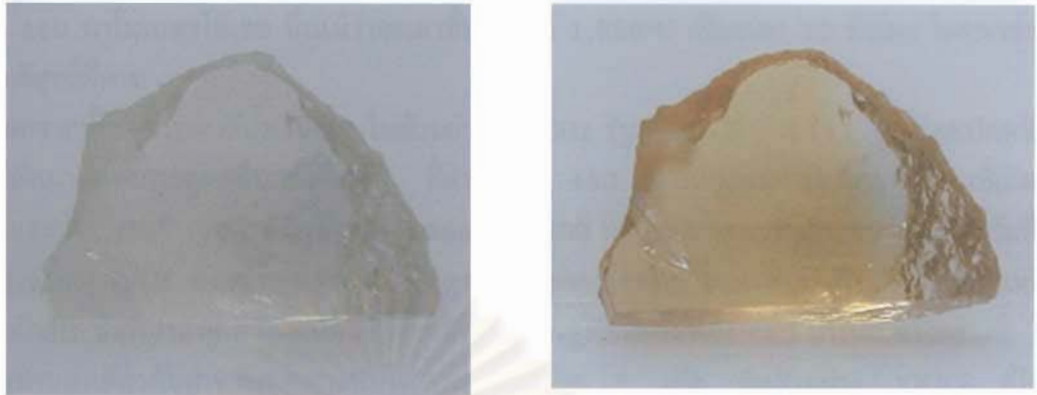
รูปที่ 3.3 พลอยบุษราคัมบางกะจะสด ตัวอย่าง YCH3 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา) (ถ่ายภาพโดยชนิยา สมบุญ)



รูปที่ 3.4 พลอยบุษราคัมบางกะจะสดที่มีแถบสีน้ำเงินเขียว ตัวอย่าง YGCH1 มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่หลังเผาที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา) โปรดสังเกตแถบสีน้ำเงินเขียวที่สีจางลงเล็กน้อยหลังเผา (ถ่ายภาพโดยชนิยา สมบุญ)



รูปที่ 3.5 พลอยบุษราคัมบางกะจะสดที่มีแถบสีน้ำเงินเขียว ตัวอย่าง YGCH2 มีแถบสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) ปรากฏเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาล (สีแม่โขง) ที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา) โปรดสังเกตแถบสีน้ำเงินเขียวที่สีจางลงเล็กน้อยหลังเผา (ถ่ายภาพโดย ชนิยา สมบุญ)



รูปที่ 3.6 ฟลอยแซปไฟร์สดจากกาญจนบุรี ตัวอย่าง YKB2 ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) ปากฎเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาลที่เสถียร หลังเผาที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ (รูปขวา) (ถ่ายภาพโดย ชนินยา สมบุญ)

3.4 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR

ฟลอยบุษราคัมบางกะจะทั้ง 5 เม็ด และฟลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีอีก 1 เม็ดได้ทำการตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR ทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่ตำแหน่งเดียวกันและในสภาวะการวัดเดียวกัน รายละเอียดของสเปกตรัม (o-rays) ทั้งก่อนและหลังเผาของแต่ละตัวอย่าง ได้นำมาจัดวางในรูปเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ และ สเปกตรัมที่เหลือที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนและหลังเผาหักลบกัน ได้จัดแสดงไว้ในอีกรูปถัดไป (รูปที่ 3.7-3.20)

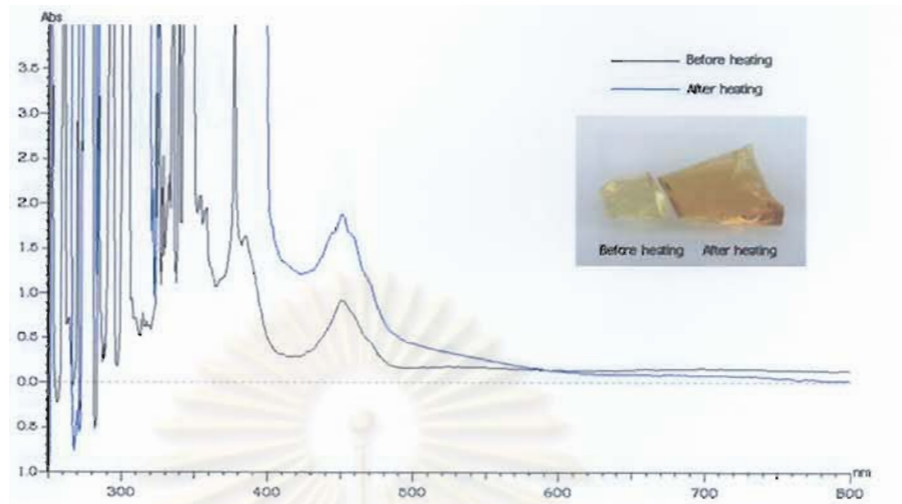
ผลสรุปโดยรวม พบว่าสเปกตรัม (o-rays) ของฟลอยบุษราคัมบางกะจะทั้ง 5 เม็ดที่วัดก่อนเผา แสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร อย่างเด่นชัดและในบางเม็ดอาจเห็นที่ตำแหน่ง 377 และ 388 นาโนเมตร (เนื่องจากตำแหน่ง absorption edge ที่ต่ำในบางเม็ด) การดูดกลืนคลื่นแสงที่ตำแหน่งดังกล่าว ปรกติมักพบในฟลอยคอร์นดัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงเสมอ ส่วนสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงหลังเผาของฟลอยดังกล่าว ก็ยังคงแสดงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 450 ที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่เด่นชัดเช่นกัน และสเปกตรัมหลังเผามีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวีหรือคลื่นสั้นที่มากกว่าสเปกตรัมก่อนเผา ดังนั้นเมื่อนำสเปกตรัมก่อนเผา หักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผา พบว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่ฟีกที่ประมาณ 460 นาโนเมตร เป็นลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร และยังพบอีกว่าการเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงในครั้งนี้ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงของการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+}

ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรได้เลย ถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ในบรรยากาศ ออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม

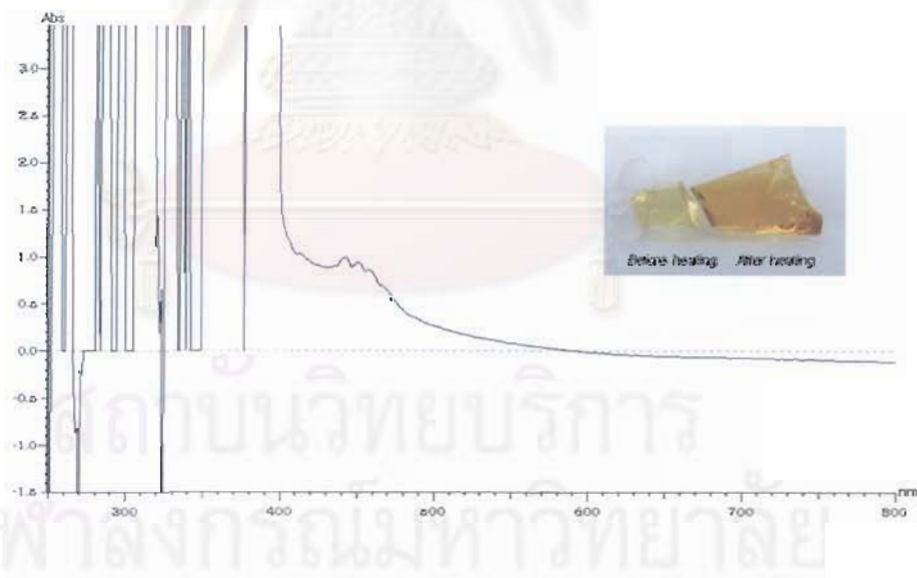
นอกจากนั้น ตรงแถบสีน้ำเงินเขียวในตัวอย่าง YGCH1 (รูปที่ 3.13 - 3.14) พบว่าสเปกตรัมทั้ง ก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ พบว่าสเปกตรัมที่เกิด จาก Metal/Metal IVCT ดังกล่าว หลังเผามีการดูดกลืนลดลงเล็กน้อย ซึ่งปรากฏอยู่ในสเปกตรัมที่เหลือที่ ได้จากการหักลบ ข้อที่น่าสังเกตคือสเปกตรัมที่เหลือไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย

ในทำนองเดียวกันสำหรับพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีอีก 1 เม็ด คือตัวอย่าง YKB2 ก็ได้ผล คล้ายคลึงกัน (รูปที่ 3.19 - 3.20)

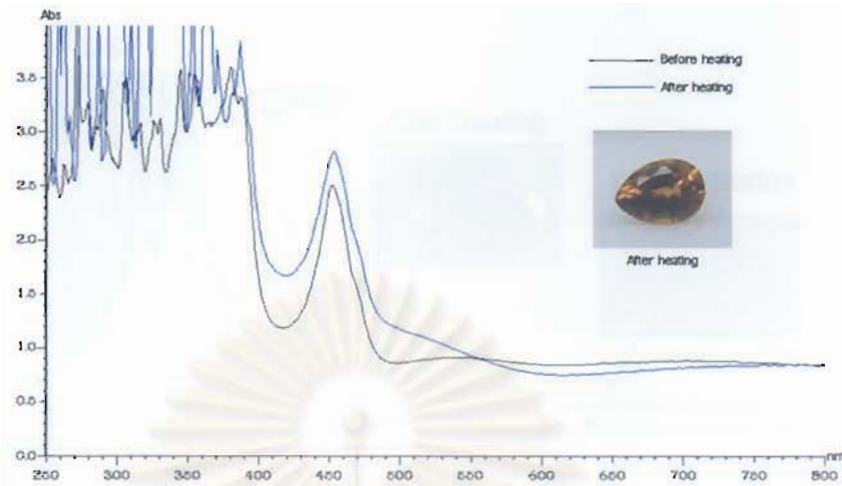




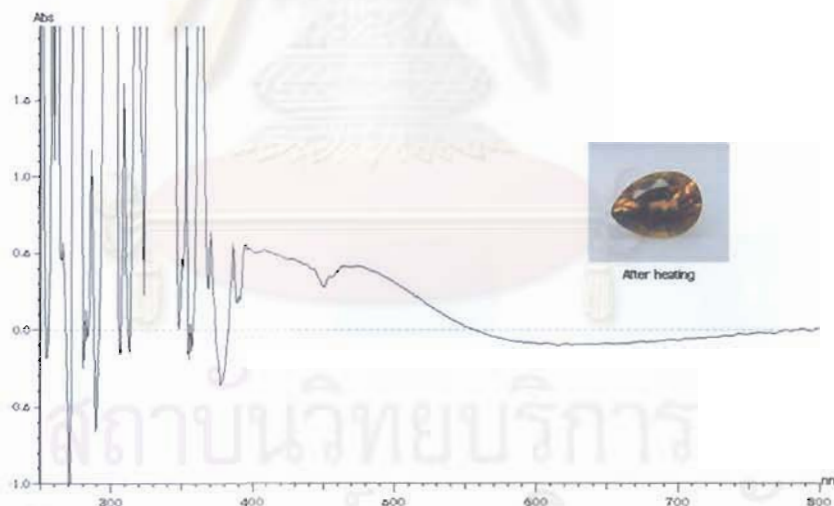
รูปที่ 3.7 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุษราคัมบางกะจะชิ้นใหญ่ในรูปที่ 3.1 (YCH1) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมก่อนเผาแสดงการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร สเปกตรัมหลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และ ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรของ Fe^{3+}



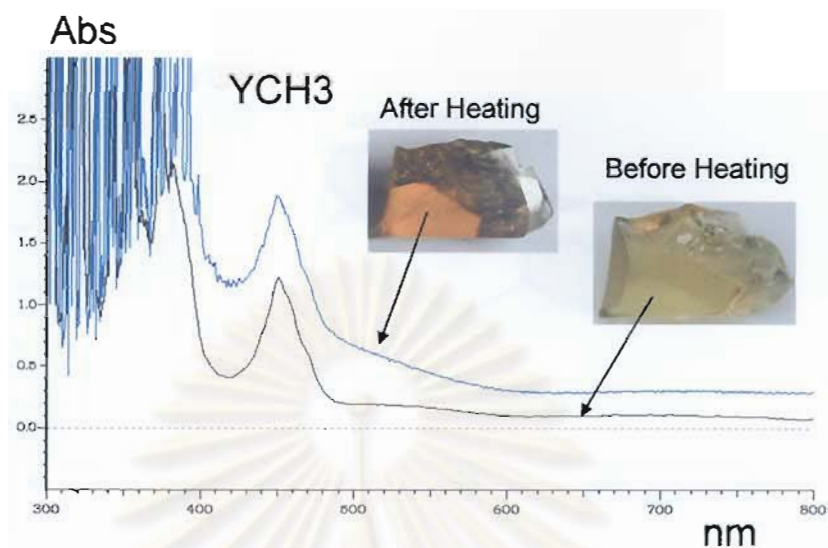
รูปที่ 3.8 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.7 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่พิคที่ประมาณ 460 นาโนเมตร เส้นที่ไม่เรียบบริเวณ 450 นาโนเมตร น่าจะมีสาเหตุมาจากความคลาดเคลื่อนจากการวัด



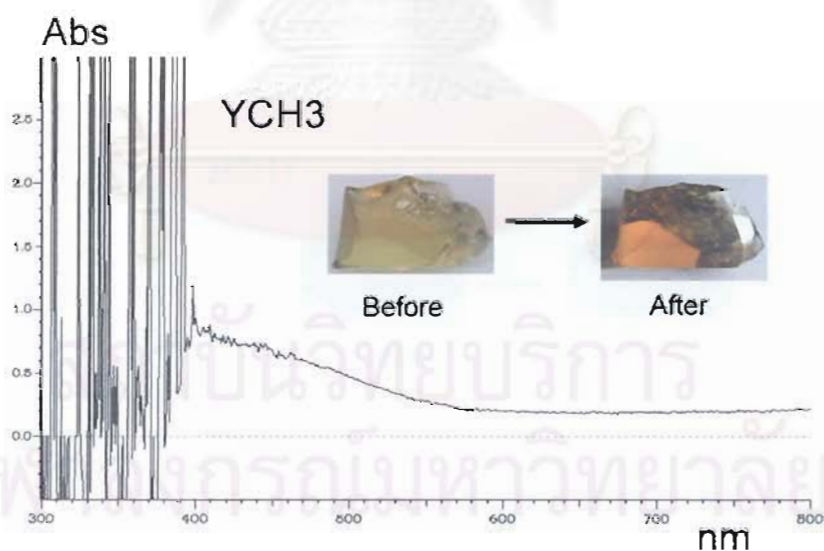
รูปที่ 3.9 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.2 (YCH2) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมทั้งก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และสเปกตรัมหลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี



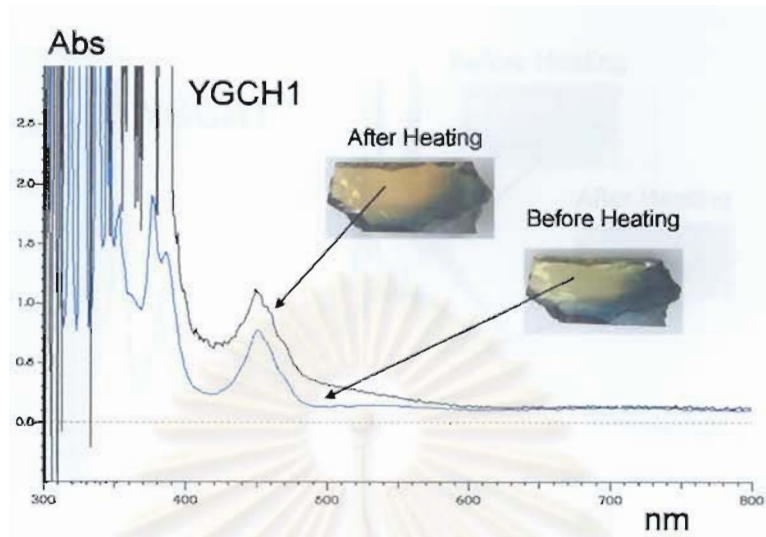
รูปที่ 3.10 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.9 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือ ยังคงแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี ถึงแม้ว่าการวัดสเปกตรัมของพลอยเม็ดนี้ จะมีความคลาดเคลื่อนสูง (สาเหตุอาจเกิดจากการวางตัวอย่างการวัดก่อนและหลังเผาที่ไม่ใช่ที่ตำแหน่งเดียวกัน หรือสภาวะการวัดที่ต่างกัน) ซึ่งสามารถสังเกตเห็นความผิดปกติได้จากพิกที่เป็นลบ (negative peak) ที่ ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร (ถ้าเป็นพิกจริง ควรจะเป็นพิกที่เป็นบวกมากกว่า เพราะทำการเผาพลอยในสภาวะออกซิเจนพอเพียง ดังนั้น Fe^{2+} ที่อาจจะมียอยู่ในพลอยก่อนเผาน่าจะถูกออกซิไดซ์ไปเป็น Fe^{3+} หลังเผามากขึ้น ทำให้เมื่อหักลบ พิกการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร น่าจะเพิ่มขึ้นหลังเผา)



รูปที่ 3.11 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.3 (YCH3) ที่วัดก่อนเผา (สีดำเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีน้ำเงินเส้นบน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และสเปกตรัมหลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี



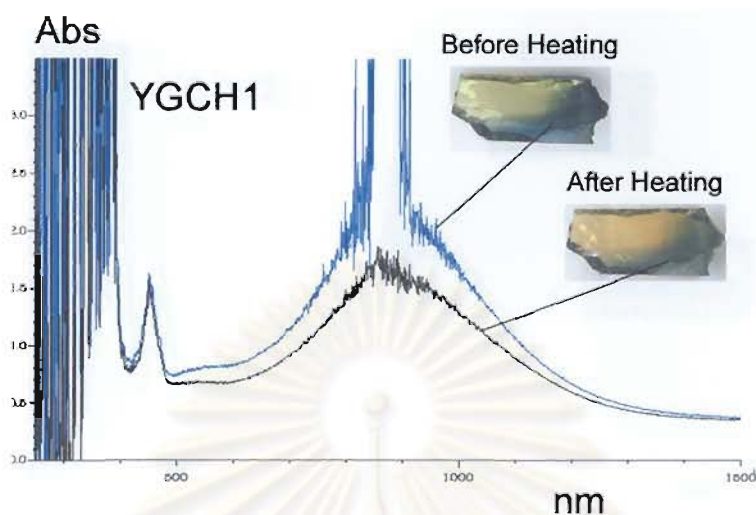
รูปที่ 3.12 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YCH3) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.11 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่พีกเล็กน้อยที่ประมาณ 460 นาโนเมตร โปรดสังเกตว่าไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย



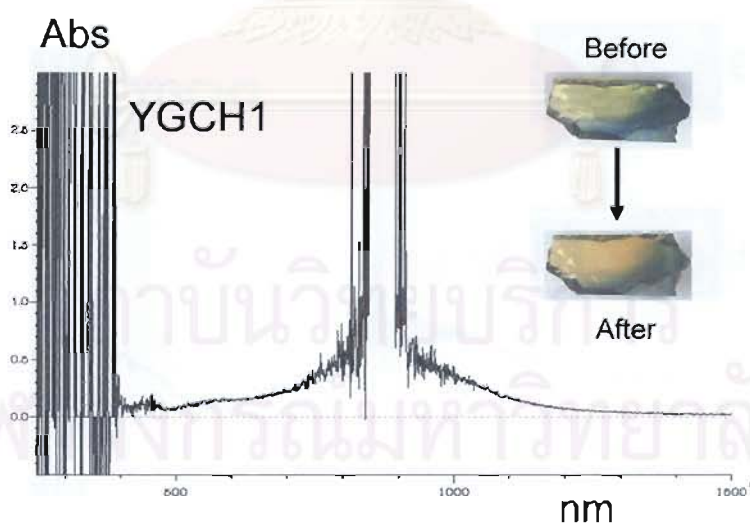
รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.4 (YGCH1) ที่วัดตรงส่วนสีเหลืองก่อนเผา (สีน้ำเงินเส้นล่าง) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (สีดำเส้นบน) สเปกตรัมก่อนเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร สเปกตรัมหลังเผาแสดงการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และ ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรของ Fe^{3+}



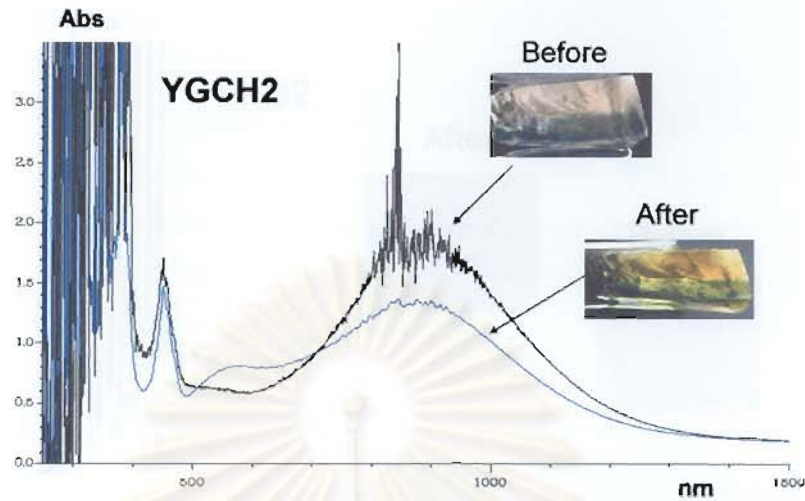
รูปที่ 3.14 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผาในรูปที่ 3.13 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี โปรดสังเกตุว่าไม่ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย



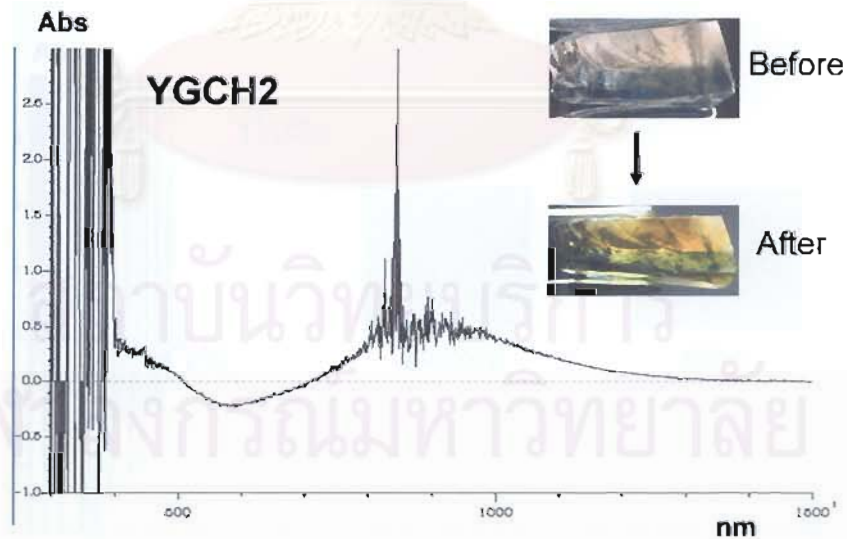
รูปที่ 3.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุขราคัม บางกะจะในรูปที่ 3.4 (YGCH1) ที่วัดตรงแถบสีน้ำเงินเขียวก่อนเผา (เส้นสีน้ำเงินเส้นบน) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (เส้นสีดำเส้นล่าง) สเปกตรัมก่อนและหลังเผา แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตร ตามลำดับ สเปกตรัมหลังเผาแสดงการดูดกลืนลดลงเล็กน้อยที่เกิดจาก IVCT ดังกล่าว



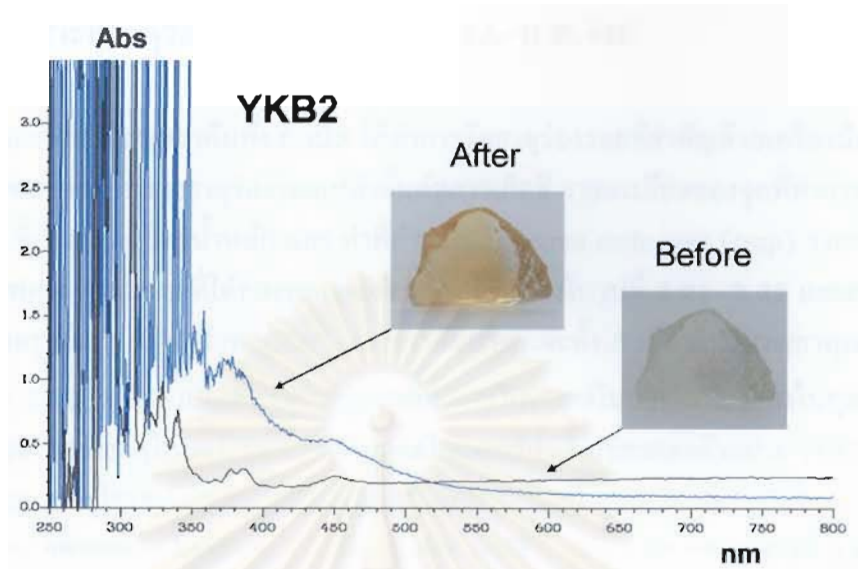
รูปที่ 3.16 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH1) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดหลังเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาในรูปที่ 3.15 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT แต่ไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย



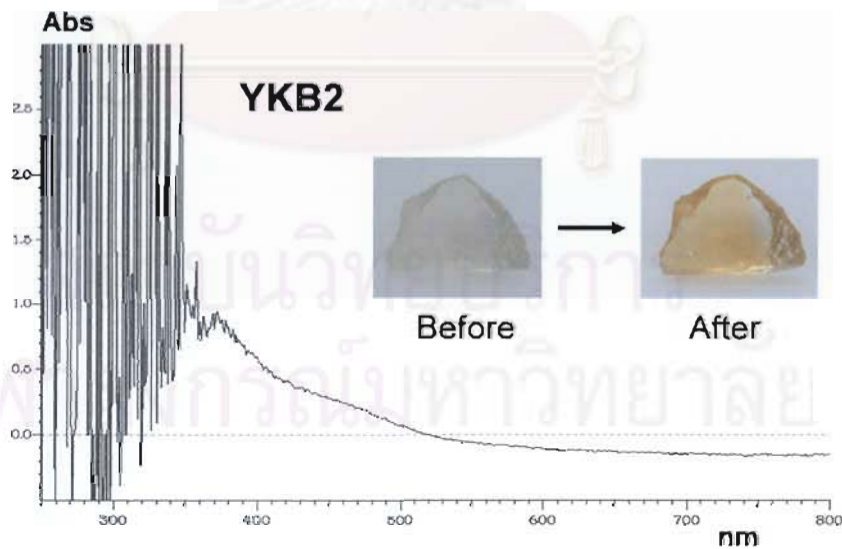
รูปที่ 3.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยบุษราคัมบางกะจะในรูปที่ 3.5 (YGCH2) ที่วัดก่อนเผา (เส้นสีดำ) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีขนาดเล็กจึงไม่สามารถวัดแถบสีเหลืองแยกจากแถบสีเขียวได้ สเปกตรัมที่ได้จึงเป็นส่วนผสมของทั้งสองสี และตำแหน่งที่วัดสเปกตรัมก่อนและหลังเผาอาจคลาดเคลื่อนเล็กน้อย



รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YGCH2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดหลังเผาออกจากสเปกตรัมที่วัดก่อนเผาในรูปที่ 3.17 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการดูดที่เกิดจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT



รูปที่ 3.19 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่างพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีในรูปที่ 3.6 (YKB2) ที่วัดก่อนเผา (เส้นสีดำ) และวัดอีกครั้งหลังเผาที่ตำแหน่งเดิม (เส้นสีน้ำเงิน) สเปกตรัมก่อนและหลังเผ่าแสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรเล็กน้อย เพราะปริมาณธาตุเหล็กในตัวอย่างนี้มีน้อยกว่าของตัวอย่างพลอยบางกะจะ



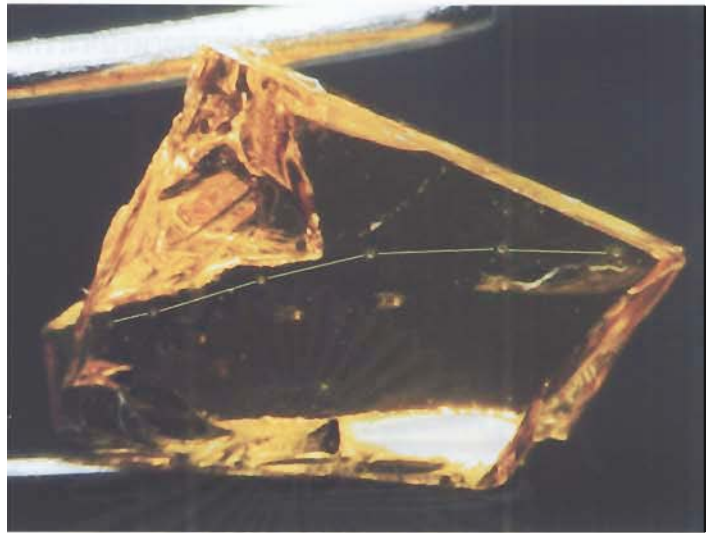
รูปที่ 3.20 แสดงสเปกตรัมที่เหลือ (YKB2) ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมที่วัดก่อนเผ่าออกจากสเปกตรัมที่วัดหลังเผ่าในรูปที่ 3.19 ปรากฏว่าสเปกตรัมที่เหลือแสดงการยกตัวที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และไม่ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรเลย

3.5 ผลวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

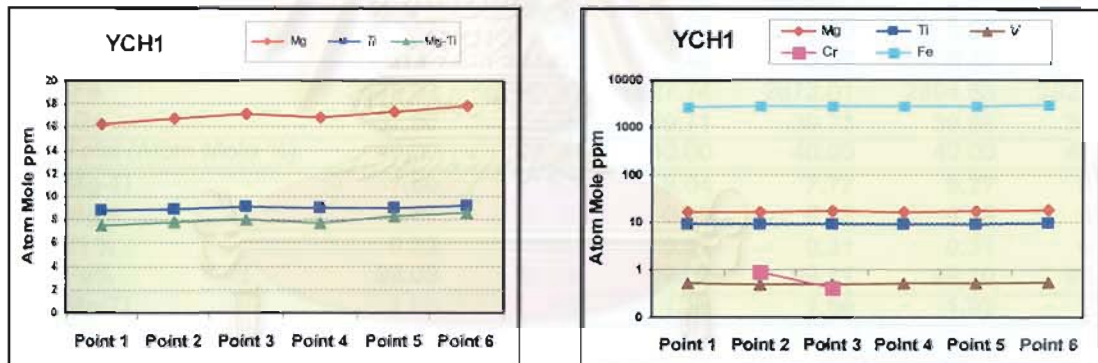
ตัวอย่างพลอยบุษราคัมทั้ง 6 เม็ด ได้ทำการวัดธาตุร่องรอยที่สำคัญด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS เพื่อตรวจสอบบทบาท ของธาตุร่องรอยเหล่านั้นต่อการเกิดสี รายละเอียดของจุดที่ทำการวิเคราะห์ ปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่เป็น ppm โดยน้ำหนัก และ ค่าที่คำนวณเป็น atom mole ppm (amp) รวมทั้งการจัดแสดงในรูปของกราฟต่าง ๆ และผลที่ได้ของพลอยแต่ละเม็ด ได้แสดงในรูปที่ 3.21-3.32 และตาราง 3.3-3.8

ผลสรุปโดยรวม พบว่าพลอยพลอยบุษราคัมบางกะจะทั้ง 5 เม็ด มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~2,700 - 3,800 amp) และพบว่าตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ในบริเวณสีเหลืองในทุกเม็ดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม แต่ตรงทุกจุดในแถบสีน้ำเงินเขียวของตัวอย่าง YGCH1 และ YGCH2 พบว่ามีปริมาณธาตุไทเทเนียมมากกว่าธาตุแมกนีเซียม

สำหรับพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีอีก 1 เม็ด (รูปที่ 3.31-3.32 และตารางที่ 3.8) พบว่ามีปริมาณธาตุเหล็กน้อยกว่าของตัวอย่างพลอยบางกะจะ (Fe ~900-1,000 amp) จึงสามารถอธิบายว่าพลอยเม็ดนี้ ไร้สีก่อนเผา และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 4 ถึง 10 amp)



รูปที่ 3.21 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 6 จุด บนผิวพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 3.22 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH1 ในรูปที่ 3.21 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~2700- 2900 ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti = ~7-9 ppm)

ตารางที่ 3.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH1 ด้วยวิธี LA-ICP-MS

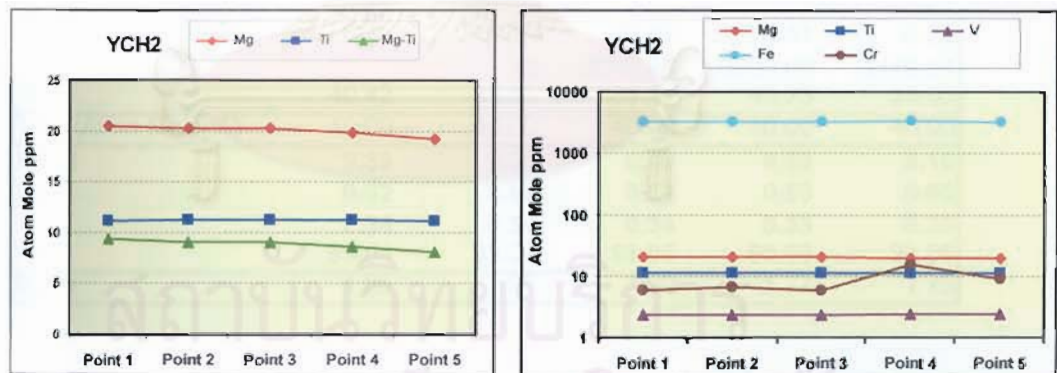
YCH1	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6
Cations (ppm by weight)						
Be	<0.190	<0.215	<0.249	<0.250	<0.27	<0.219
Na	<1.51	<1.83	<1.98	<1.87	<2.02	<1.68
Mg	19.54	20.04	20.60	20.18	20.78	21.39
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	20.78	20.97	21.57	21.38	21.38	21.80
V	1.29	1.27	1.25	1.28	1.31	1.37
Cr	<0.43	2.33	1.08	<0.49	<0.56	<0.45
Mn	1.10	1.15	1.24	1.00	1.09	1.19
Fe	7434.45	7668.98	7801.47	7924.47	7987.12	8065.40
Ga	130.7	134.81	136.76	136.85	137.36	132.56
Total %	53.69	53.71	53.72	53.74	53.74	53.75
Cations (Atom Mole ppm)						
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	3.04	0.00	0.00	2.17	0.00
Mg	16.28	16.69	17.16	16.81	17.30	17.81
Al	397240.42	397150.39	397104.90	397061.54	397036.17	397010.80
Ti	8.79	8.86	9.12	9.03	9.03	9.21
V	0.51	0.50	0.50	0.51	0.52	0.54
Cr	0.00	0.91	0.42	0.00	0.00	0.00
Mn	0.41	0.42	0.46	0.37	0.40	0.44
Fe	2695.63	2780.03	2827.74	2872.01	2894.53	2922.71
Ga	37.96	39.15	39.71	39.73	39.88	38.48
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	7.50	7.83	8.04	7.77	8.27	8.60
Mg%	0.60	0.59	0.60	0.58	0.59	0.60
Ti %	0.32	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31
Fe%	99.08	99.09	99.08	99.11	99.10	99.08
Mg/Ti	1.85	1.88	1.88	1.86	1.92	1.93

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.23 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 3.24 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH2 ในรูปที่ 3.23 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($\sim 3,100 - 3,300$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti $\sim 8-9$ ppm)

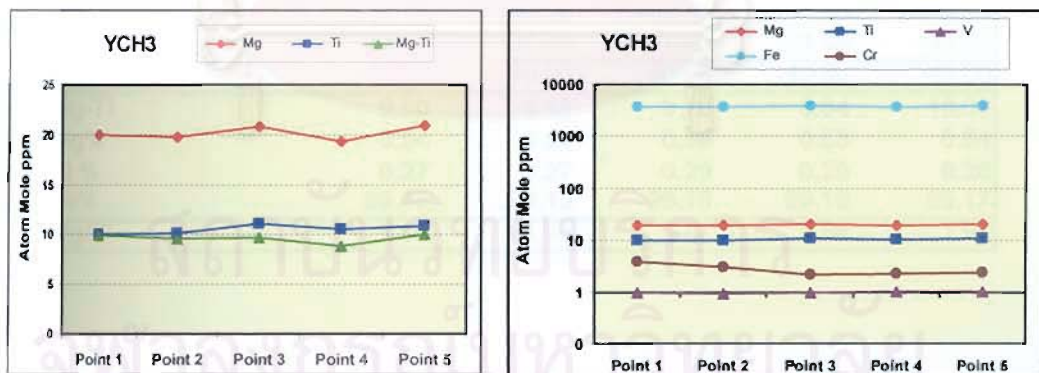
ตารางที่ 3.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH2
ด้วย วิธี LA-ICP-MS

YCH2	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.204	<0.210	<0.148	<0.174	<0.158
Na	<1.33	<1.28	<0.93	1.48	<0.91
Mg	24.65	24.38	24.37	23.81	23.12
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	26.33	26.73	26.74	26.57	26.38
V	2.28	2.30	2.32	2.42	2.46
Cr	15.10	16.97	15.03	39.90	23.67
Mn	1.15	1.17	1.14	1.11	1.05
Fe	9006.14	8964.56	9086.20	9263.64	8777.32
Ga	139.37	140.10	135.08	138.73	134.56
Total %	53.85	53.84	53.85	53.87	53.82
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00
Mg	20.51	20.28	20.27	19.80	19.24
Al	396660.03	396674.07	396632.59	396557.48	396741.48
Ti	11.12	11.28	11.29	11.21	11.14
V	0.91	0.91	0.92	0.96	0.98
Cr	5.87	6.60	5.84	15.51	9.21
Mn	0.42	0.43	0.42	0.41	0.39
Fe	3260.73	3245.79	3289.49	3353.09	3178.54
Ga	40.42	40.63	39.17	40.23	39.03
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	9.39	9.00	8.99	8.59	8.10
Mg%	0.62	0.62	0.61	0.59	0.60
Ti %	0.34	0.34	0.34	0.33	0.35
Fe%	99.04	99.04	99.05	99.08	99.05
Mg/Ti	1.85	1.80	1.80	1.77	1.73

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 3.25 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอยบุซราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 3.26 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YCH3 ในรูปที่ 3.25 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (~3,600 - 3,800 ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ 9-10 ppm)

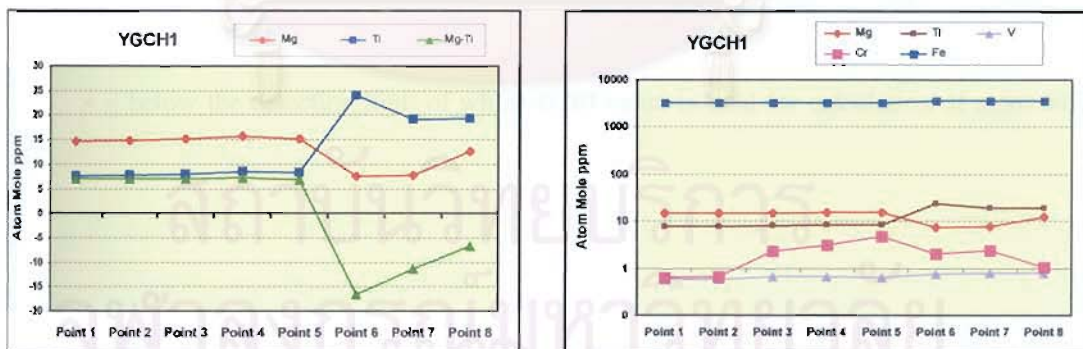
ตารางที่ 3.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพอลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YCH3 ด้วยวิธี LA-ICP-MS

YCH3	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.28	<0.216	<0.233	<0.166	<0.190
Na	<1.71	<1.34	14.10	<1.02	<1.11
Mg	24.03	23.84	25.08	23.31	25.19
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	23.89	24.09	26.42	24.97	25.88
V	1.00	0.96	1.00	1.03	1.01
Cr	9.92	7.88	5.65	5.81	6.16
Mn	1.40	1.44	1.44	1.35	1.39
Fe	10114.03	10206.46	10464.81	10103.71	10555.15
Ga	125.95	126.78	128.50	120.73	122.92
Total %	53.96	53.96	53.99	53.95	54.00
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	12.39	0.00	0.00
Mg	19.97	19.81	20.84	19.37	20.93
Al	396270.44	396237.95	396131.50	396277.37	396112.97
Ti	10.08	10.16	11.14	10.53	10.91
V	0.40	0.38	0.40	0.41	0.40
Cr	3.85	3.06	2.19	2.26	2.39
Mn	0.52	0.53	0.53	0.49	0.51
Fe	3658.25	3691.38	3783.80	3654.58	3816.29
Ga	36.49	36.73	37.22	34.98	35.60
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	9.90	9.65	9.70	8.84	10.02
Mg%	0.54	0.53	0.55	0.53	0.54
Ti %	0.27	0.27	0.29	0.29	0.28
Fe%	99.19	99.19	99.16	99.19	99.17
Mg/Ti	1.98	1.95	1.87	1.84	1.92

ξ = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 3.27 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 8 จุด บนผิวพอลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YGCH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-5 จากซ้ายอยู่ในส่วนสีเหลือง จุดที่ 6-8 อยู่ในแถบสีน้ำเงินเขียว

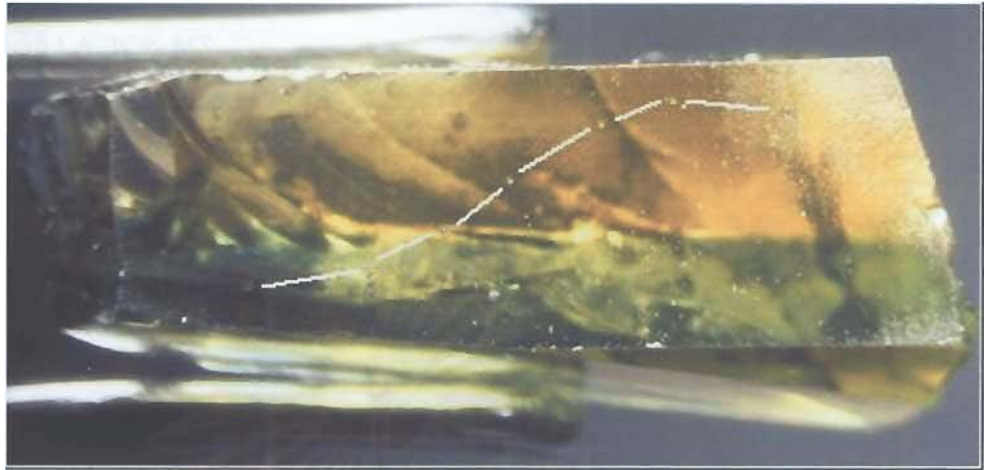


รูปที่ 3.28 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YGCH1 ในรูปที่ 3.27 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($\sim 3,200 - 3,500$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 1-5 ในส่วนสีเหลือง ($Mg-Ti \sim 6-7$ ppm) แต่ปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 6-8 ในส่วนสีน้ำเงินเขียว ($Mg-Ti = -6$ ถึง -17 ppm)

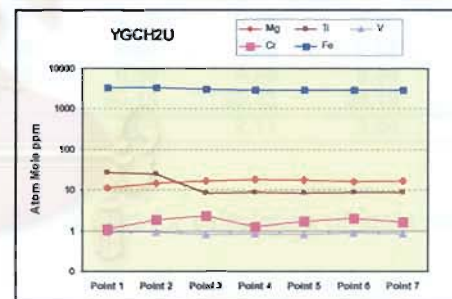
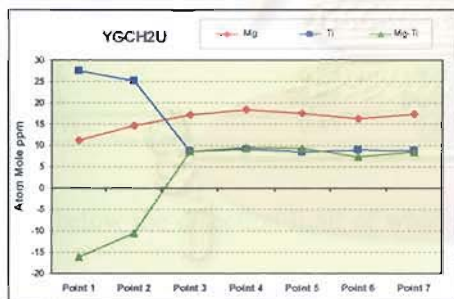
ตารางที่ 3.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YGCH1 ด้วยวิธี LA-ICP-MS

YGCH1	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8
Cations (ppm by weight)								
Be	<0.26	<0.28	<0.28	<0.29	<0.229	<0.25	<0.29	<0.223
Na	<1.49	<1.62	<1.77	<1.61	<1.51	<1.45	<1.86	28.81
Mg	17.69	17.80	18.22	18.93	18.33	9.08	9.35	15.25
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	18.08	18.52	19.11	19.98	19.89	57.20	45.34	45.86
V	1.48	1.51	1.68	1.68	1.63	1.89	2.00	1.99
Cr	1.62	1.75	6.08	8.19	12.62	5.17	6.39	2.76
Mn	0.89	1.07	1.09	1.02	1.11	1.10	1.00	3.26
Fe	8875.06	9059.36	9045.02	9065.35	9003.69	9807.61	9767.67	9736.40
Ga	130.21	132.50	132.24	135.63	133.16	139.72	139.29	136.81
Total %	53.83	53.85	53.85	53.85	53.84	53.93	53.92	53.92
Cations (Atom Mole ppm)								
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	14.72	14.81	15.16	15.75	15.25	7.55	7.77	12.68
Al	396724.54	396657.30	396660.18	396650.17	396671.83	396376.30	396395.00	396402.42
Ti	7.63	7.82	8.07	8.43	8.40	24.13	19.13	19.35
V	0.59	0.60	0.67	0.67	0.65	0.75	0.79	0.79
Cr	0.63	0.68	2.36	3.18	4.91	2.01	2.48	1.07
Mn	0.33	0.39	0.40	0.37	0.41	0.40	0.37	1.20
Fe	3213.79	3279.98	3274.81	3282.08	3259.94	3548.37	3534.08	3522.83
Ga	37.77	38.43	38.35	39.34	38.62	40.49	40.37	39.65
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	7.09	6.99	7.09	7.31	6.85	-16.58	-11.35	-6.67
Mg%	0.45	0.45	0.46	0.48	0.46	0.21	0.22	0.36
Ti %	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.67	0.54	0.54
Fe%	99.31	99.31	99.30	99.27	99.28	99.12	99.24	99.10
Mg/Ti	1.93	1.89	1.88	1.87	1.82	0.31	0.41	0.66

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 3.29 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 7 จุด บนผิวพอลอยบุษราคัมบางกะ จะ ตัวอย่าง YGCH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-2 จากซ้ายอยู่ในส่วนสีน้ำเงินเขียว จุด ที่ 3-7 อยู่ในแถบสีเหลือง



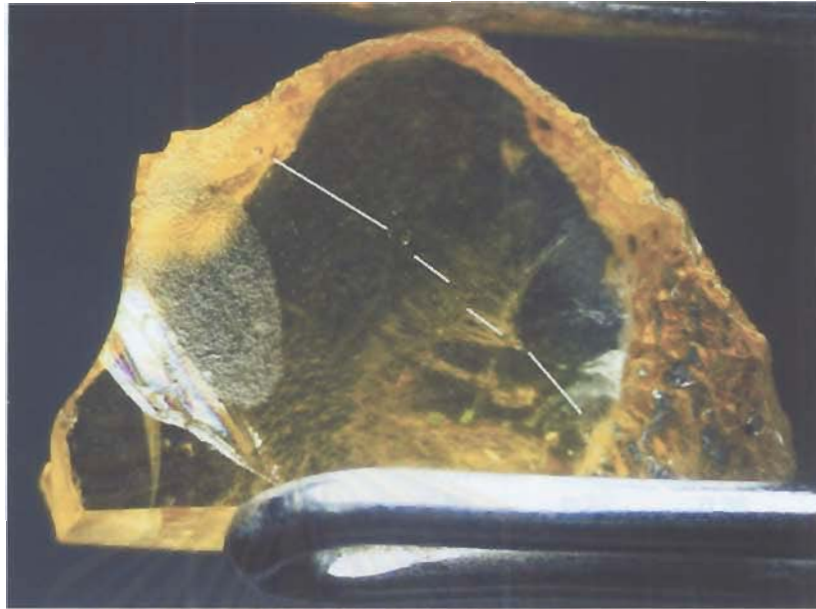
รูปที่ 3.30 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YGCH2 ในรูปที่ 3.29 พบว่า มี ปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 3,000 - 3,400$ amp) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมนี้เซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 1-2 ในส่วนสีน้ำเงินเขียว ($Mg-Ti \sim -16$ ถึง -10 amp) แต่ ปริมาณธาตุแมกนีเซียมนี้เซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงจุดที่ 3-7 ในส่วนสีเหลือง ($Mg-Ti \sim 7-9$ amp)

ตารางที่ 3.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YGCH2 ด้วยวิธี LA-ICP-MS

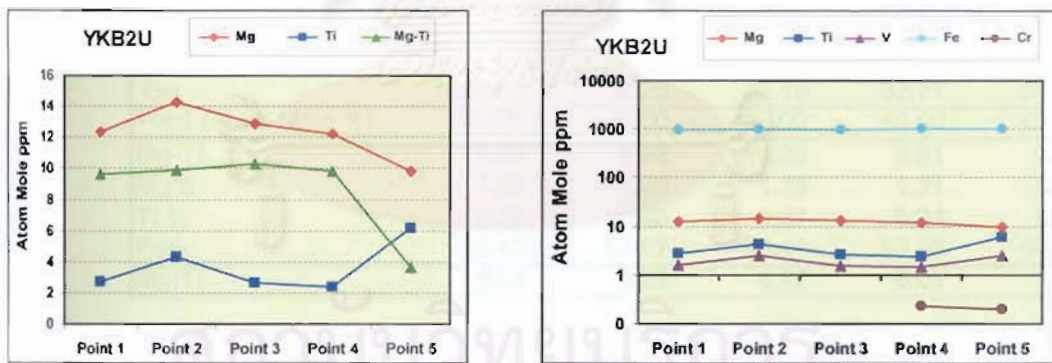
YGCH2U	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7
Cations (ppm by weight)							
Be	<0.27	<0.34	<0.37	<0.32	<0.29	<0.244	<0.30
Na	<1.61	<1.82	2.92	3.59	2.97	<1.51	<1.79
Mg	13.57	17.59	20.51	22.11	21.12	19.52	20.77
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	65.01	59.54	20.13	21.38	19.72	20.96	20.88
V	2.37	2.39	2.11	2.14	2.12	2.30	2.18
Cr	2.87	4.85	6.07	3.33	4.43	5.17	4.27
Mn	1.03	1.06	0.96	1.07	0.79	0.89	0.97
Fe	9393.11	9447.17	8439.08	8304.86	8146.19	8121.45	8314.46
Ga	140.84	140.49	133.60	132.41	135.86	132.51	137.43
Total %	53.89	53.89	53.79	53.77	53.76	53.76	53.78
Cations (Atom Mole ppm)							
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	2.57	3.16	2.61	0.00	0.00
Mg	11.29	14.63	17.07	18.41	17.59	16.25	17.29
Al	396518.39	396497.29	396872.47	396919.64	396977.44	396990.31	396918.85
Ti	27.43	25.12	8.50	9.03	8.33	8.86	8.82
V	0.94	0.95	0.84	0.85	0.84	0.91	0.87
Cr	1.12	1.89	2.36	1.30	1.72	2.01	1.66
Mn	0.38	0.39	0.35	0.39	0.29	0.33	0.36
Fe	3399.62	3419.00	3057.06	3008.79	2951.74	2942.87	3012.27
Ga	40.83	40.73	38.77	38.43	39.43	38.46	39.88
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	-16.15	-10.50	8.57	9.38	9.25	7.40	8.47
Mg%	0.33	0.42	0.55	0.61	0.59	0.55	0.57
Ti %	0.80	0.73	0.28	0.30	0.28	0.30	0.29
Fe%	98.87	98.85	99.17	99.10	99.13	99.15	99.14
Mg/Ti	0.41	0.58	2.01	2.04	2.11	1.84	1.96

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.31 แสดงจุดที่ทำการวิเคราะห์จากซ้ายไปขวา จำนวน 5 จุด บนผิวพลอยบุษราคัมกาญจนบุรี ตัวอย่าง YKB2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 3.32 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง YKB2 ในรูปที่ 3.31 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กสูงปานกลาง ($\sim 900-1,000$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียม ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti $\sim 4-10$ ppm)

ตารางที่ 3.8 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในพลอยบุษราคัมบางกะจะ ตัวอย่าง YKB2 ด้วยวิธี LA-ICP-MS

YKB2U	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.236	<0.33	<0.29	<0.31	<0.222
Na	<1.80	<2.55	<2.28	<2.34	<1.82
Mg	14.75	17.05	15.43	14.59	11.74
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	6.42	10.23	6.24	5.65	14.49
V	1.579	2.55	1.502	1.463	2.479
Cr	<0.44	<0.61	<0.59	0.59	0.51
Mn	0.34	0.61	0.37	0.36	0.40
Fe	2583.39	2600.14	2647.73	2727.28	2781.78
Ga	110.66	110.56	110.34	112.14	109.60
Total %	53.20	53.20	53.20	53.21	53.22
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	12.34	14.27	12.91	12.21	9.82
Al	399011.01	399000.94	398987.26	398958.58	398937.77
Ti	2.73	4.34	2.65	2.40	6.15
V	0.63	1.02	0.60	0.58	0.99
Cr	0.00	0.00	0.00	0.23	0.20
Mn	0.13	0.23	0.14	0.13	0.15
Fe	940.88	946.95	964.25	993.15	1012.94
Ga	32.28	32.25	32.19	32.71	31.97
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	9.62	9.92	10.26	9.81	3.67
Mg%	1.29	1.48	1.32	1.21	0.95
Ti %	0.29	0.45	0.27	0.24	0.60
Fe%	98.42	98.07	98.41	98.55	98.45
Mg/Ti	4.53	3.28	4.87	5.09	1.60

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

3.6 อภิปรายผล

จากการนำพลอยบุษราคัมสด จำนวน 5 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรีและพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีอีก 1 เม็ด (คือพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่เรียกว่า พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับภูเขาไฟชนิดบะซอลต์) มาเผาที่อุณหภูมิ 1,600 - 1,650 °C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (ในอากาศปกติ หรือ บรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์) เป็นเวลา 6 - 10 ชั่วโมง ผลปรากฏว่าพลอยทั้ง 6 เม็ด มีการเปลี่ยนสีจากเหลืองอ่อนถึงไม่มีสีก่อนเผา ไปเป็นสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาล หลังเผาอย่างชัดเจน และพบว่าป็นสีเหลืองทองที่เสถียรหลังทำ fade test ซึ่งพลอยเผาดังกล่าวเป็นที่รู้จักกันดีในวงการเผาพลอยไทยในอดีตว่า เป็นพลอยบุษราคัมสีแม่โขงที่สามารถเผาได้ด้วยวิธีปกติ หรือเผาแบบดั้งเดิม

พบว่าสเปกตรัม (o-rays) ของพลอยทั้ง 6 เม็ดที่วัดทั้งก่อนและหลังเผา แสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่คล้ายกันที่เกิดจาก Fe^{3+} transitions ที่ตำแหน่ง 450, 388 และ 377 นาโนเมตร ซึ่งปกติมักพบในพลอยคอร์ันดัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (Lehman and Harder, 1970; Krebs and Maisch, 1971; Ferguson and Fielding, 1971, 1972; Nassau and Valente, 1987) พบอีกว่า สเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงหลังเผา มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวีหรือคลื่นสั้น มากกว่าสเปกตรัมก่อนเผาอย่างเห็นได้ชัดเจน ดังนั้นเมื่อนำสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงก่อนเผา หักลบออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงหลังเผา พบว่าสเปกตรัมที่เหลือ มีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centres) คือแสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี และมีไหล่ปีกที่ประมาณ 460 นาโนเมตร คล้ายกับสเปกตรัมที่พบในพลอยจากศรีลังกา หรือพลอยคอร์ันดัมสังเคราะห์ที่ใส่เฉพาะธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็กเท่านั้น (Häger, 1996, 2001) ผลการทดลองนี้ แสดงว่าสีเหลืองทองที่เพิ่มขึ้นหลังเผาในพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง มีสาเหตุมาจากความบกพร่องในโครงสร้างผลึก Al_2O_3 ที่เรียกว่าศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรเป็นหลัก และยังพบอีกว่าการเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงในครั้งนี้ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงของการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรได้เลย ถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ 1,600-1,650°C เป็นเวลา 6-10 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนพอเพียงก็ตาม

ตรงแถบสีน้ำเงินเขียวในตัวอย่าง YGCH1 พบว่าสเปกตรัมทั้งก่อนและหลังเผาแสดงการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการดูดกลืนที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียวจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ (Townsend, 1968; Ferguson and Fielding, 1972; Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993) สีน้ำเงินเขียวเมื่อรวมกันสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} ทำให้ปรากฏเป็นสีเขียว พบว่าสเปกตรัมที่เกิดจาก IVCT หลังเผามีการดูดกลืนลดลงเล็กน้อย ซึ่งแสดงในสเปกตรัมที่เหลือจากการหักลบที่ยังเห็น Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT bands แต่การดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรได้หักล้างกันไปจนหมด แสดงว่าการเผาในบรรยากาศออกซิเจนพอเพียงในครั้งนี้ สามารถที่จะออกซิไดซ์ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ได้บางส่วน แต่คงได้ใน

ปริมาณที่น้อยมากจนไม่มีผลที่จะไปเปลี่ยนแปลงความสูงของการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตรได้อย่างไรก็ตามการเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียง Fe^{2+} ก็ยังคงสถานะประจุ $2+$ อยู่ได้ เนื่องจากสมดุลประจุ (charge compensation) ของ (colour active) $FeTiO_3$ clusters จึงยังคงเห็นสีน้ำเงินเขียวคงอยู่ ถึงแม้จะเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงก็ตามที่ (Häger, 1996, 2001) อีกประการหนึ่ง เนื่องจากกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT เป็นกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อการเกิดสีค่อนข้างสูง ดังนั้น ถึงแม้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Fe^{2+} เพียงเล็กน้อยจากการเผา ก็มีผลให้เห็นสีเปลี่ยนไปได้

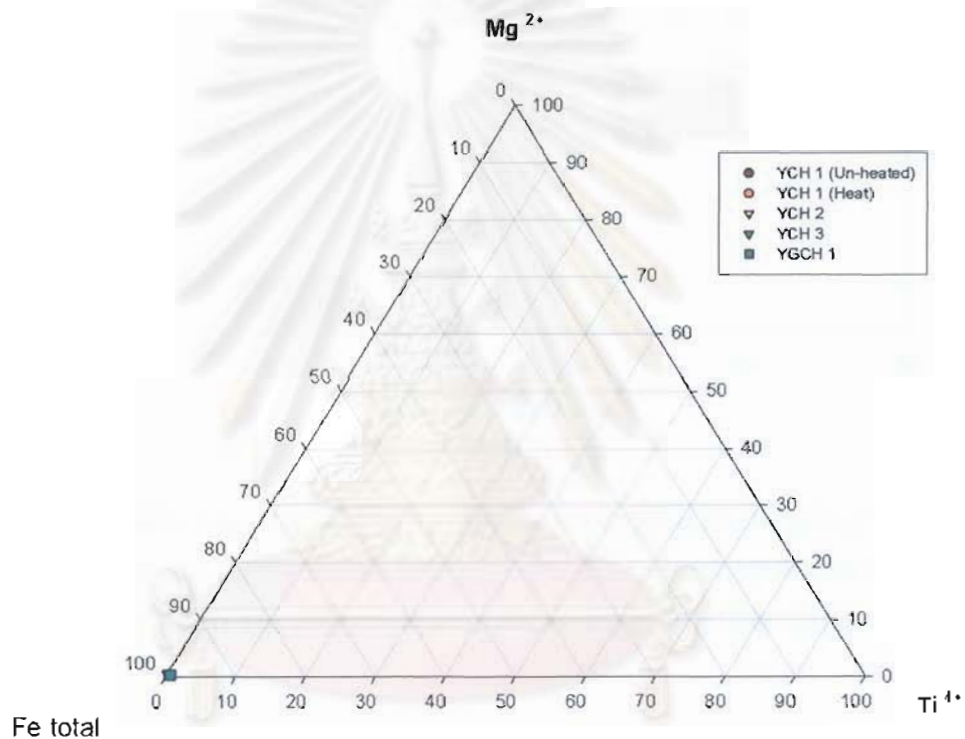
จากผลการวิเคราะห์พลอยบุษราคัมบางกะจะ ทั้ง 5 เม็ด และพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรีอีก 1 เม็ด ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กสูง ($\sim 1,000 - 3,800 \text{ ppm Fe}$) ซึ่งเป็นการยืนยันว่า พลอยบุษราคัมบางกะจะและพลอยแซปไฟร์กาญจนบุรี มีธาตุเหล็กเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 ค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นแบบฉบับของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ นอกจากนี้ทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ในบริเวณสีเหลือง พบว่าทุกเม็ดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมเสมอ แต่ในทางตรงกันข้าม ทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ในแถบสีเขียว พบว่ามีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม

เนื่องจากในพลอยกลุ่มนี้มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อนำผลวิเคราะห์มา แสดงในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ในรูปที่ 3.33 พบว่าข้อมูลทั้งหมดไปกระจุกตัวอยู่บริเวณยอดของธาตุเหล็ก แสดงว่าธาตุเหล็กส่วนใหญ่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดศูนย์กลางสี (จากการทดลองกับ พลอยคอรักันดัมสังเคราะห์ ที่เติมเฉพาะธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็ก พบว่าใช้ธาตุทั้งสองเพียงเล็กน้อย เช่น ประมาณธาตุละ 50 ppm ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้; Häger, 1996, 2001) ทำให้รูปสามเหลี่ยมดังกล่าวไม่สามารถใช้อธิบายการเกิดสีในพลอยที่มีธาตุเหล็กสูงได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อนำข้อมูลมาจัดแสดงใน Mg-Ti cross plot ในรูปที่ 3.34 พบว่าผลวิเคราะห์ที่ได้จากส่วนสีเหลืองของพลอยทั้ง 6 เม็ดตกอยู่ประมาณเส้น Mg:Ti ratio = 2:1 ส่วนผลวิเคราะห์ที่ได้จากแถบสีน้ำเงินเขียวของพลอยเม็ด YGCH1 และ YGCH2 ตกอยู่ใต้เส้น Mg:Ti ratio = 1:1

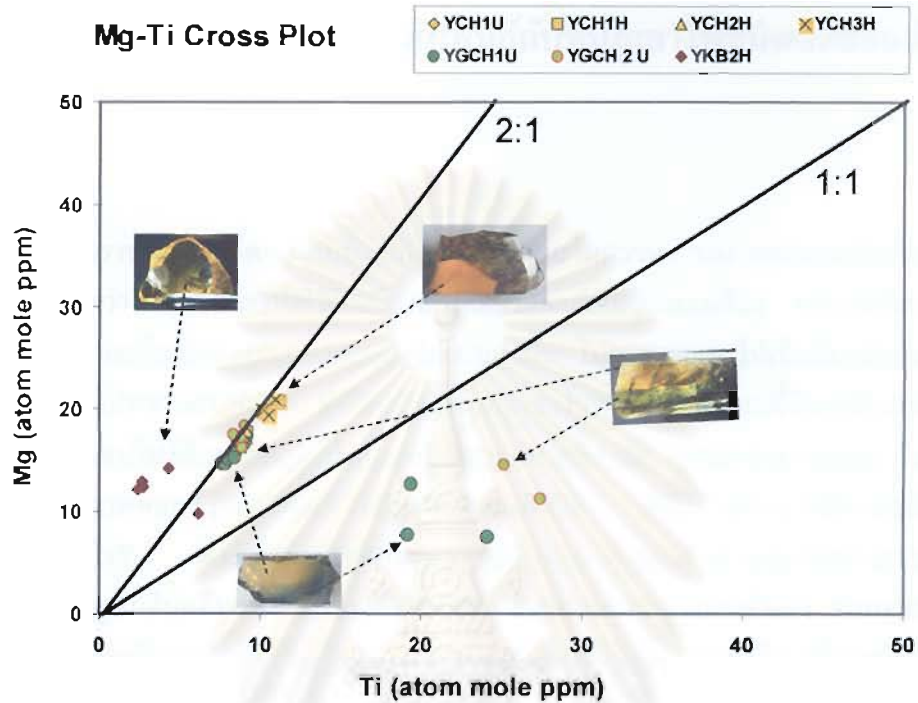
จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอนุมานได้ว่า บริเวณส่วนที่เป็นสีเหลืองอ่อนแล้วเผาขึ้นจนได้สีเหลืองทองนั้น ควรต้องมี Mg:Ti ratio ประมาณ 2:1 จึงสามารถทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้ โดยปริมาณธาตุแมกนีเซียมที่เหลือพอ (หลังจากที่ไปจับกับธาตุไทเทเนียมในรูปของ colourless $MgTiO_3$ แล้ว) ร่วมกับธาตุเหล็ก ทำให้เกิดศูนย์กลางสีที่ทำให้เสถียรโดยธาตุแมกนีเซียม (Mg-trapped hole colour centres) ในโครงสร้างพลอยหลังเผา ดังนั้น พลอยสีเหลืองทองหลังเผาที่มีธาตุเหล็กสูง มีสาเหตุที่เกิดจากทั้ง Fe^{3+} transitions ที่มีปริมาณสูงในตัวของมันเองอยู่แล้วส่วนหนึ่ง (ปรกติให้สีเหลืองอ่อน) ผสมกับ ที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรที่เพิ่มขึ้นหลังเผา รวมกัน แต่ทั้งนี้ จะต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง

สำหรับบริเวณแถบสีน้ำเงินเขียวของพลอยเม็ด YGCH1 ไม่ว่าจะเผาอย่างไร (ทั้งในบรรยากาศออกซิเจนพอเพียงและขาดออกซิเจน) ก็คงได้สีน้ำเงินเท่านั้น เพราะมีปริมาณธาตุไทเทเนียมเหลือพอ (หลังจากที่

ไปจับกับธาตุแมกนีเซียมในรูปของ colourless MgTiO_3 แล้ว) ที่ทำให้เกิดกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ได้สีน้ำเงินเขียว ซึ่งเมื่อรวมกันสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} ทำให้ปรากฏเป็นสีเขียว แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น การเกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้นั้น ไม่สามารถเกิดที่ตำแหน่งเดียวกันกับการเกิดสีน้ำเงินเขียวจากกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ได้ ดังเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว และเป็นเหตุผลที่อธิบายว่า มักพบพลอยแซปไฟร์สีเขียว เฉพาะพลอยที่มาจากแหล่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงเท่านั้น แต่จะไม่พบจากแหล่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ เช่น จากศรีลังกาเลย



รูปที่ 3.33 แสดงผลข้อมูลในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยบุษราคัมบางกะจะ ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์



รูปที่ 3.34 แสดงผลใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยบุษราคัมบางกะจะ (ตัวอย่าง YCH1-3, YGCH1-2) และพลอยบุษราคัมกาญจนบุรี (ตัวอย่าง YKB2) ที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลางถึงสูง หรือแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

พลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์)

4.1 บทนำ








เป็นที่ทราบกันในอดีต ก่อนที่จะเกิดการค้นพบนวัตกรรมการเผาพลอยคอร์ันดัมกับสารเบริลเสียมจนเป็นผลสำเร็จว่า พลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่นำมาเผาโดยกระบวนการปกติหรือเผาเท่านั้น ไม่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองได้ง่ายหรือบางเม็ดไม่ได้เลย โดยไม่ทราบสาเหตุว่า ที่เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร? ดังนั้นในบทนี้จึงขอนำเสนอรายงานการวิจัยตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี โดยทำการทดลองเผาพลอยดังกล่าวในสภาวะออกซิเจนพอเพียง เพื่อตรวจสอบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเจดสีได้หรือไม่? อย่างไร? และทำการการศึกษาอย่างเป็นระบบ โดยมีการควบคุมทิศทางการวางตัวอย่าง เพื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ในช่วง UV-Vis ของพลอยก่อนและหลังเผา ทำการตรวจวิเคราะห์ธาตุร่องรอยในพลอยหลังเผาด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS เพื่อใช้อธิบายว่าสีที่ไม่เปลี่ยนหรือเปลี่ยนไปหลังเผามีสาเหตุมาจากอะไร?

4.2 ตัวอย่างและสมบัติพื้นฐาน

พลอยที่นำมาศึกษาในกลุ่มนี้คือ พลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือที่รู้จักกันว่าเป็นพลอยแซปไฟร์ “แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” สมบัติพื้นฐานของพลอยทั้ง 7 เม็ดนี้แสดงในตารางที่ 4.1 และผลวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเครื่องมือ EDXRF แสดงในตารางที่ 4.2 ที่ปรากฏว่าตัวอย่างทั้งหมดมีปริมาณ Fe_2O_3 ที่ค่อนข้างสูง (0.8 to 1.3 wt%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติพื้นฐานของพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี (RI = refractive indices, SG = specific gravity, SW UV = short wave ultraviolet, LW UV = long wave ultraviolet)

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
Ch1 (Chanthaburi)	0.325	1.762	1.770	Very light yellow	3.961	Inert	Weak yellow	
Ch2 (Chanthaburi)	0.294	1.762	1.770	Light greenish yellow with blue zones	3.956	Inert	Inert	
Ch3 (Chanthaburi)	0.217	1.762	1.770	Light greenish yellow with blue zones	3.903	Inert	Inert	
Ch4 (Chanthaburi)	0.165	1.764	1.770	Light greenish yellow with blue patches	4.300	Inert	Inert	
Ch5 (Chanthaburi)	0.252	1.760	1.768	Very Light yellowish green with blue zones	4.029	Inert	Inert	
Ch6 (Chanthaburi)	0.276	1.761	1.769	Light yellowish green with blue zones	3.974	Inert	Inert	
Ch7 (Chanthaburi)	0.197	1.758	1.764	Light yellowish green with faint blue patches	3.959	Inert	Inert	

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก) ในพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF

Sample no.	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
Ch1	98.22	0.02	1.00	0.72	0.00	0.04
Ch2	98.27	0.03	1.27	0.39	0.00	0.03
Ch3	98.74	0.00	0.89	0.32	0.01	0.04
Ch4	97.93	0.03	1.33	0.64	0.01	0.05
Ch5	98.62	0.00	1.22	0.12	0.01	0.03
Ch6	98.65	0.00	1.16	0.15	0.00	0.04
Ch7	98.38	0.02	1.37	0.19	0.01	0.03

4.3 การทดลองเผา

พลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ได้ทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ถึง 3 ครั้ง โดยในครั้งแรกเผาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และครั้งที่สองเพิ่มเวลาอีกเป็น 24 ชั่วโมง โดยมีได้ทำการยกพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิสูง แต่ปล่อยให้พลอยเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องภายในเตา (ซึ่งต่อไปนี้เรียกว่า “เผาอบ”) พบว่าในการเผาทั้งสองครั้ง พลอยหลังเผาแทบไม่เปลี่ยนสีเลย ดังนั้นในการเผาครั้งที่สามได้ทำการเผาไปพร้อมกับตัวอย่างพลอยบุษราคัมจากศรีลังกา (บทที่ 2) และพลอยบุษราคัมบางกะจะ (บทที่ 3) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการยกพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิประมาณ 1000 °C (ซึ่งต่อไปนี้เรียกว่า “เผายก”) ในแต่ละขั้นตอนของการทดลองได้ทำการบันทึกภาพ และวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ทุกกระยะ (ไม่ได้ทำการเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ เนื่องจากข้อจำกัดของเตาที่ใช้ และเนื่องจากพบว่าการเผาที่สภาวะอุณหภูมิและเวลาดังกล่าวก็ได้ผลดีกับพลอยบุษราคัมจากศรีลังกา และพลอยบุษราคัมบางกะจะ ซึ่งได้เผารวมกันในเบ้าเดียวกันในครั้งสุดท้าย)

4.4 ผลของการทดลองเผา

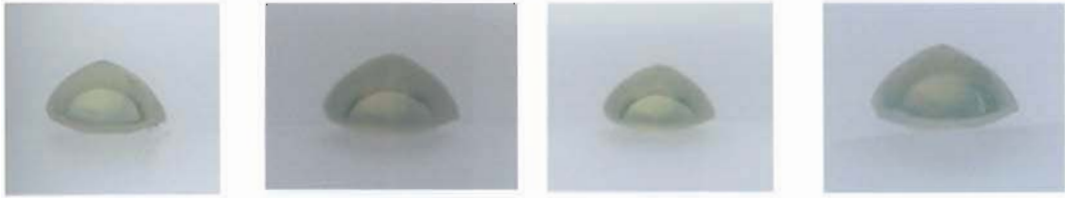
ผลของการทดลองเผาพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ในสภาวะดังกล่าวทั้ง 3 ครั้ง พบว่าได้ผลคล้ายกัน คือเฉดสีของพลอย หลังเผาแทบไม่แตกต่างจากพลอยก่อนเผา ไม่ว่าจะได้เพิ่มเวลาในการเผา จาก 10 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมงแล้ว ก็ตาม หรือใช้ทั้งวิธีเผาอบและเผายกก็ได้ผลไม่แตกต่างกันมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.1 - 4.7



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH1 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH2 ที่มีสีเหลืองแกมเขียวก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



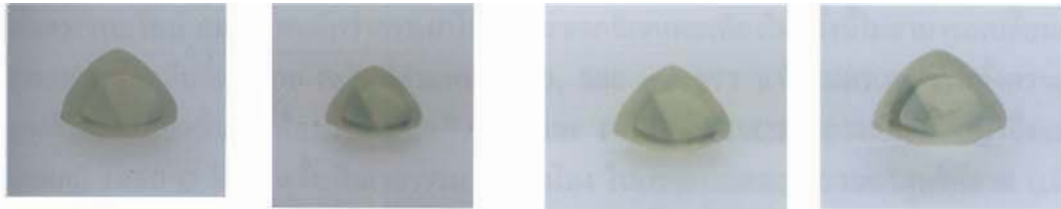
รูปที่ 4.3 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH₃ ที่มีสีเขียวแกมเหลืองก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH₄ ที่มีสีเหลืองอ่อนและแถบเขียวบริเวณขอบก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิม เมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH₅ ที่มีสีเหลืองแกมเขียวก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH6 ที่สีเขียวแกมเหลืองก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ



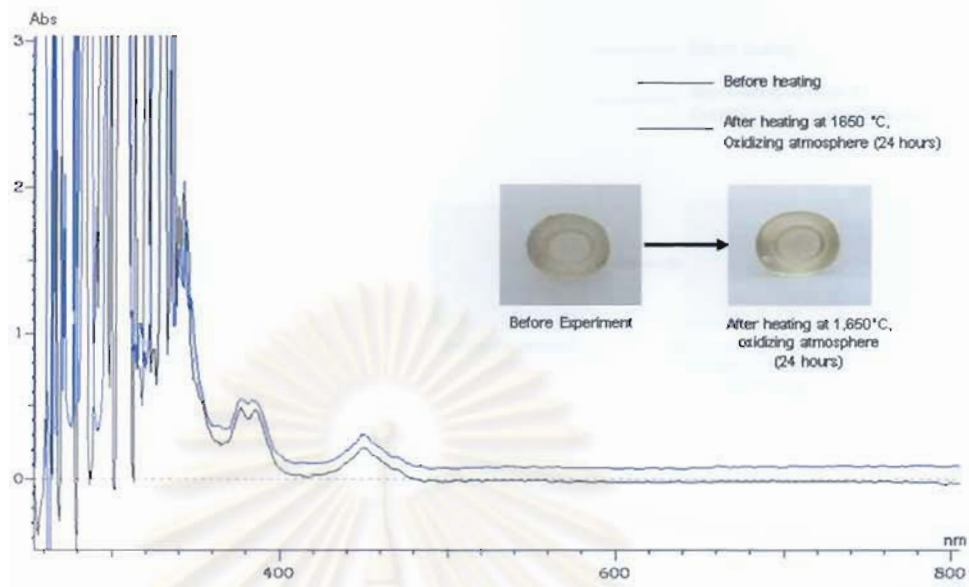
รูปที่ 4.7 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ CH7 ที่สีเหลืองอ่อนและแถบเขียวบริเวณขอบก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ ปรากฏว่าสียังเหมือนเดิมเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) หรือเผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผาอีก 10 ชั่วโมง (รูปขวา) ตามลำดับ

4.5 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis

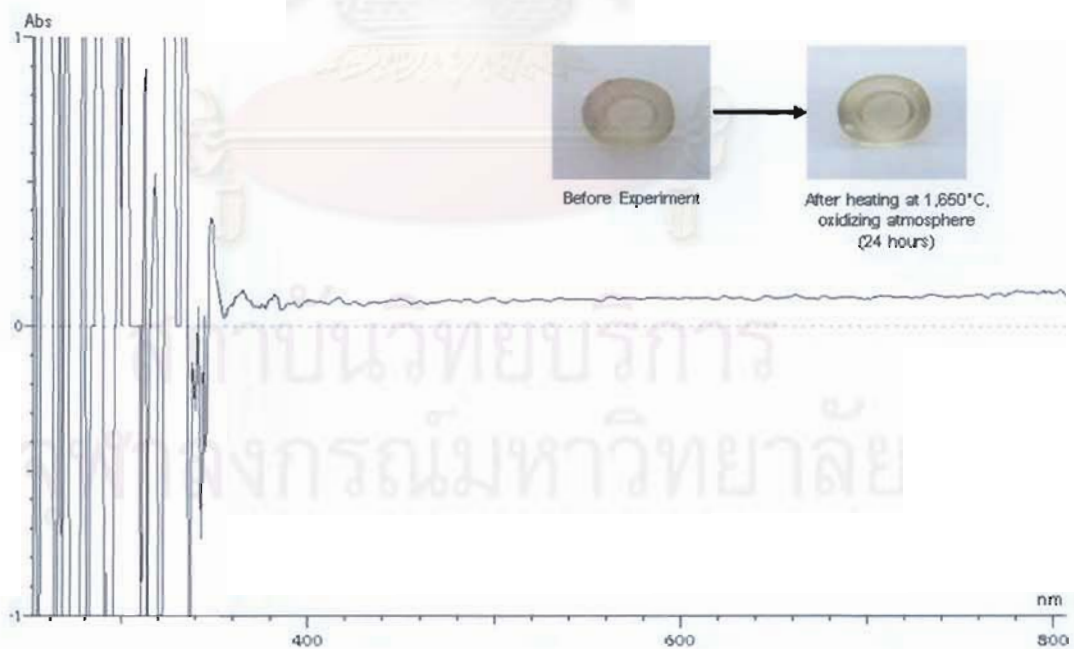
พลอยแซปไฟร์สีเขียวแกมเหลืองและสีเขียวแกมเหลือง จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ได้ทำการตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ทั้งก่อนเผาและหลังเผาที่ตำแหน่งเดียวกันและในสภาวะการวัดเดียวกัน พบว่าสเปกตรัม (o-rays) ของพลอยทั้ง 7 เม็ดที่วัดทั้งก่อนและหลังเผา (รูปที่ 4.8 - 4.21) แสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 และ 377 นาโนเมตร ซึ่งปกติมักพบในพลอยคอร์ันดัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง นอกจากนั้นในตัวอย่างที่มีแถบสีเขียวหรือน้ำเงินเขียว (Cyan) พบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ เนื่องจากว่าสีของพลอยทั้ง 7 เม็ดแทบไม่เปลี่ยนแปลงหลังเผา ดังนั้นเมื่อนำสเปกตรัมก่อนเผาค้นพบออกจากสเปกตรัมหลังเผา สเปกตรัมที่เหลือจะปรากฏเป็น

เส้นตรงราบเรียบ และยังพบอีกว่าการเผาในสถานะออกซิเจนพอเพียงในครั้งนี้อาจไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงของการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรเลย รวมทั้งความสูงของการดูดกลืนของแถบคลื่นอินทรีย์มาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ของแต่ละตัวอย่างถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ $1650^{\circ}C$ ถึง 3 ครั้งเป็นเวลารวม 44 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม (เนื่องจากการเผาทั้ง 3 ครั้งได้ผลคล้ายคลึงกัน จึงจัดแสดงเฉพาะการเผาที่อุณหภูมิ $1650^{\circ}C$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเท่านั้น)

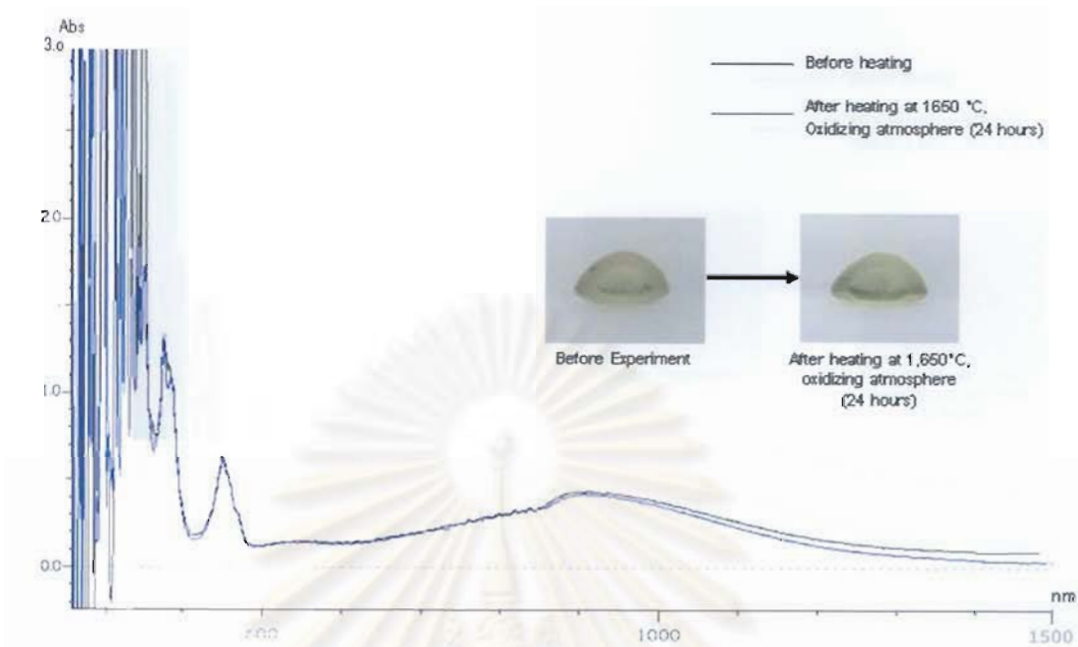




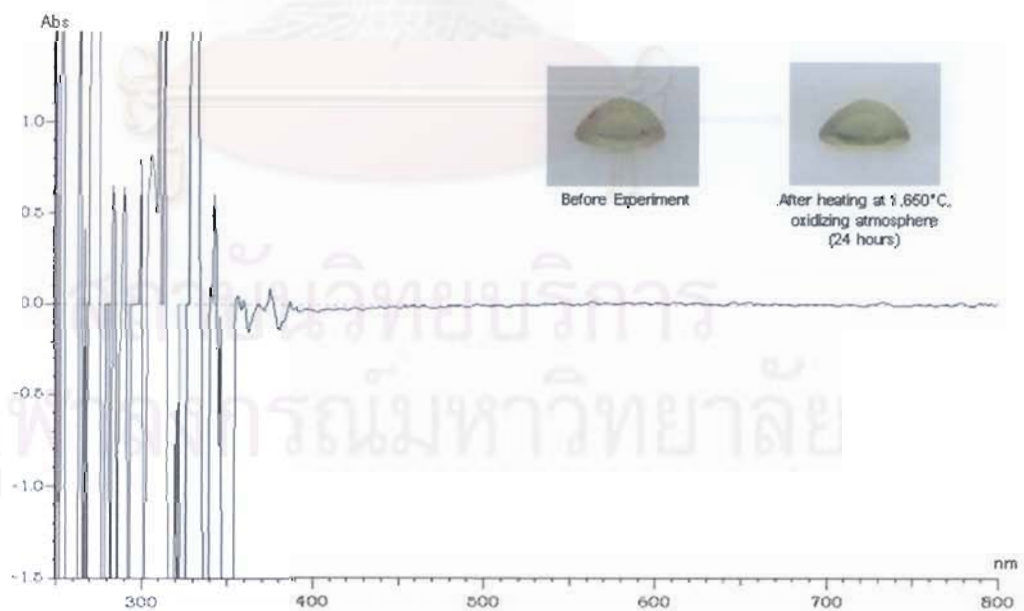
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH1 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัดเนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองอ่อนที่ปราศจากสีน้ำเงิน ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT



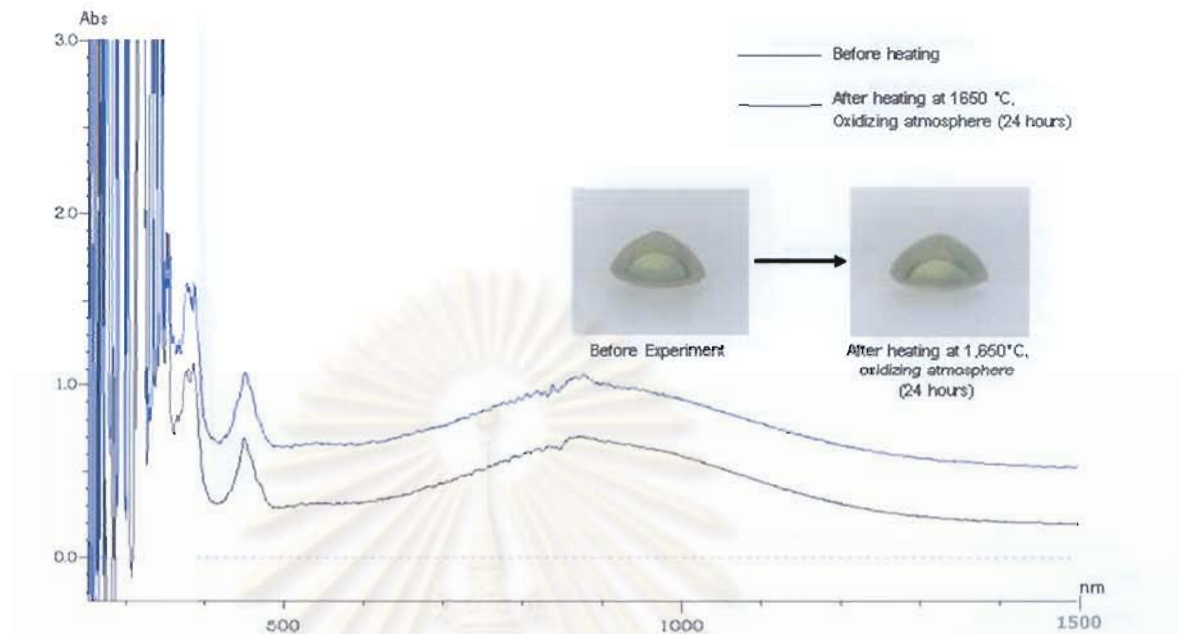
รูปที่ 4.9 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH1 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.8 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



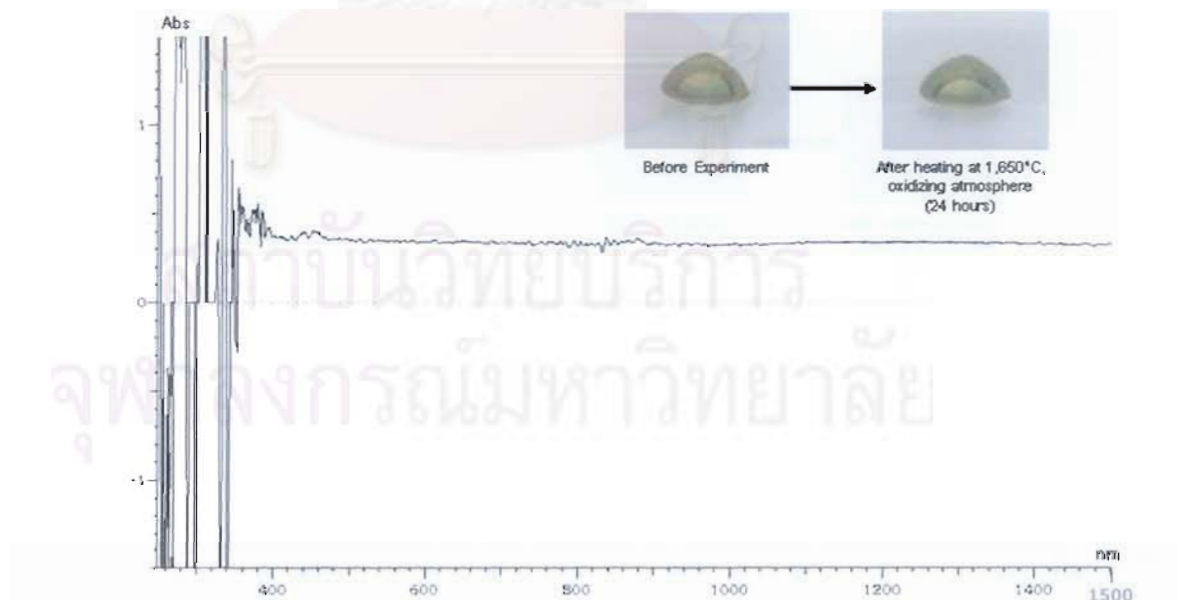
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH2 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองแกมเขียวและแถบสีน้ำเงินเขียว (Cyan) ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอื่นเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ



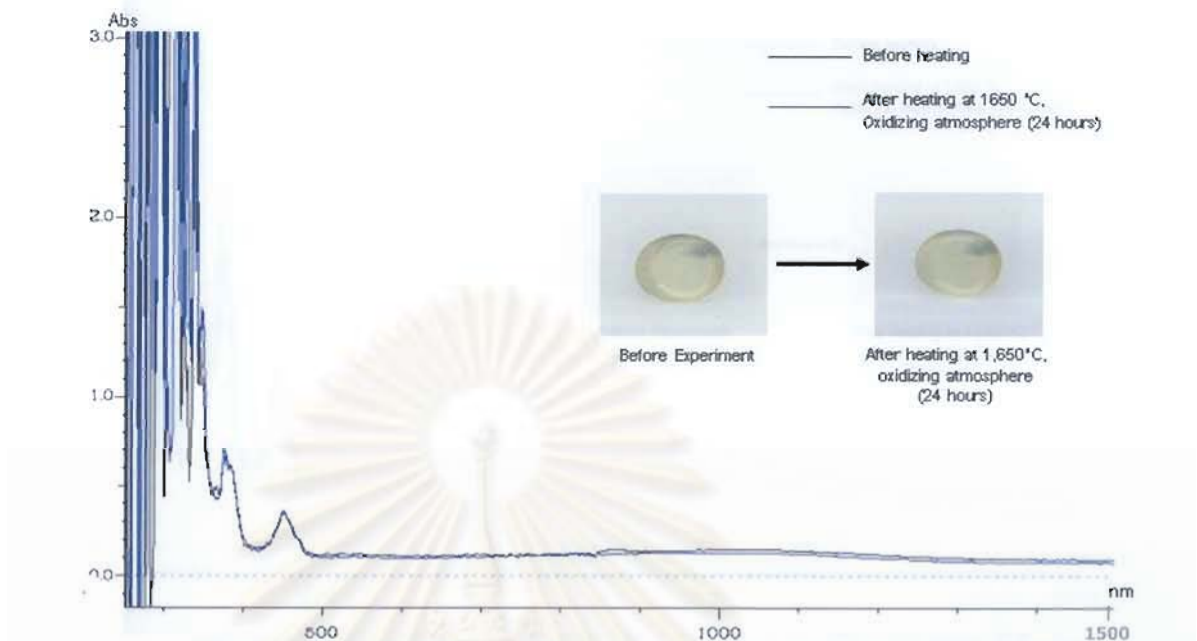
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH2 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.10 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



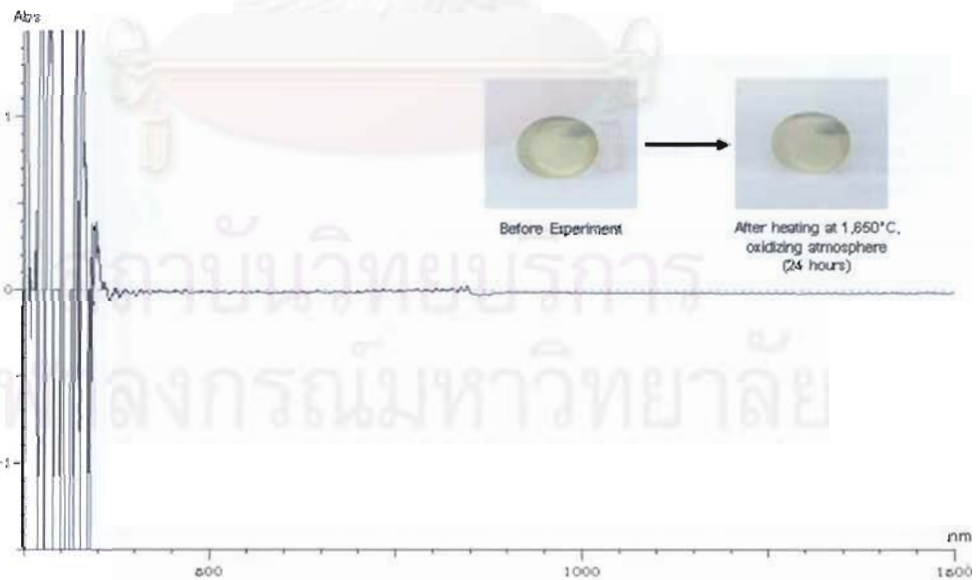
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH3 ที่วัด ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเมตนี้มีสีเขียวแกมเหลืองและแถบสีน้ำเงินเขียว (Cyan) ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ



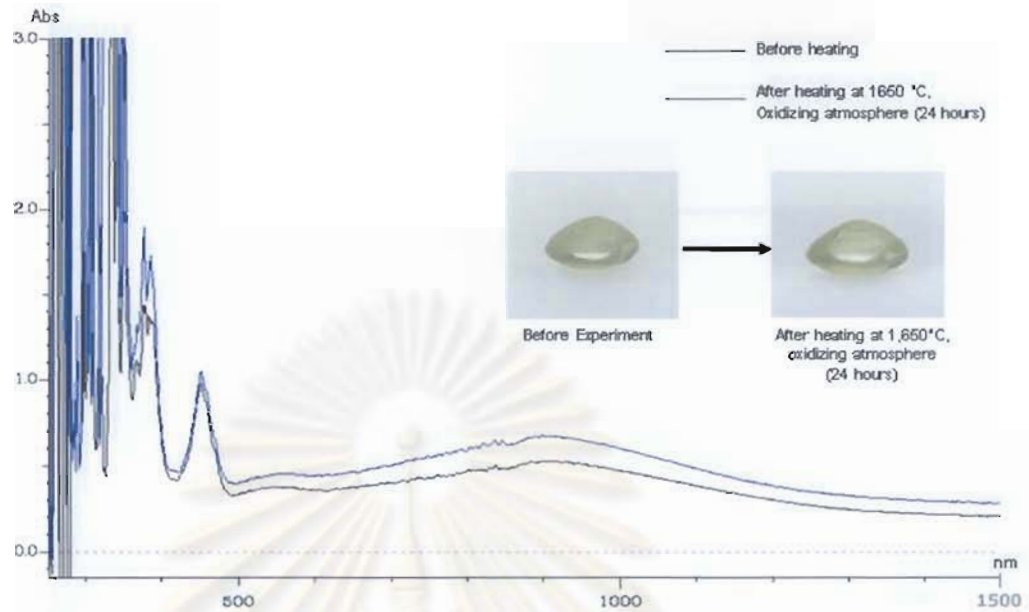
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH3 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.12 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



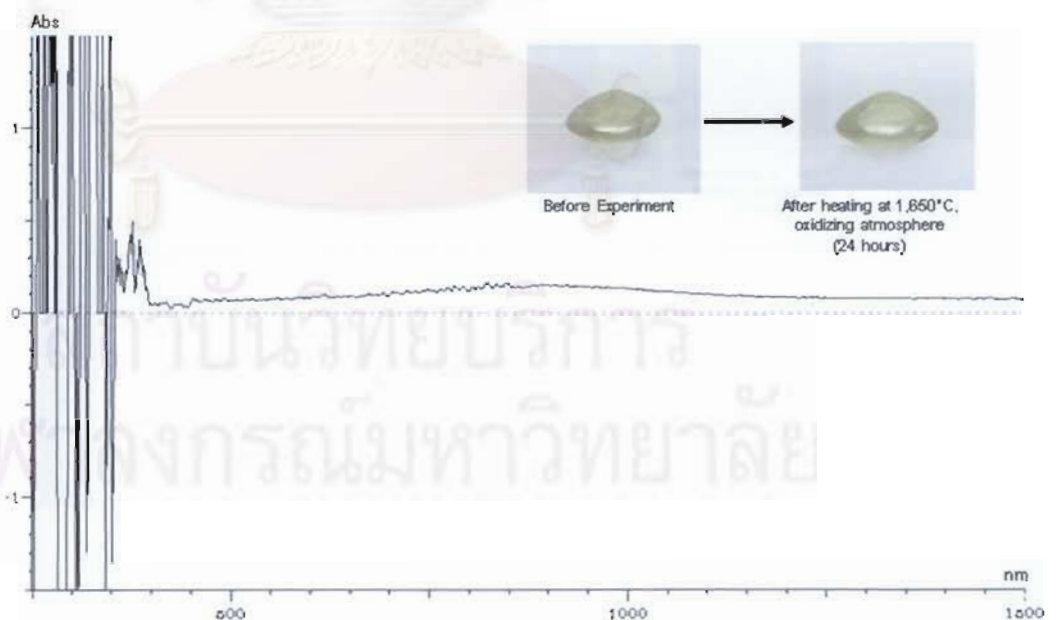
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH₄ ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe³⁺ ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลาสมาที่มีสีเหลืองอ่อนและแถบสีน้ำเงินเขียวบริเวณขอบ ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe²⁺/Ti⁴⁺ และ Fe²⁺/Fe³⁺ IVCT เพราะวัดสเปกตรัมบริเวณกลางเม็ด



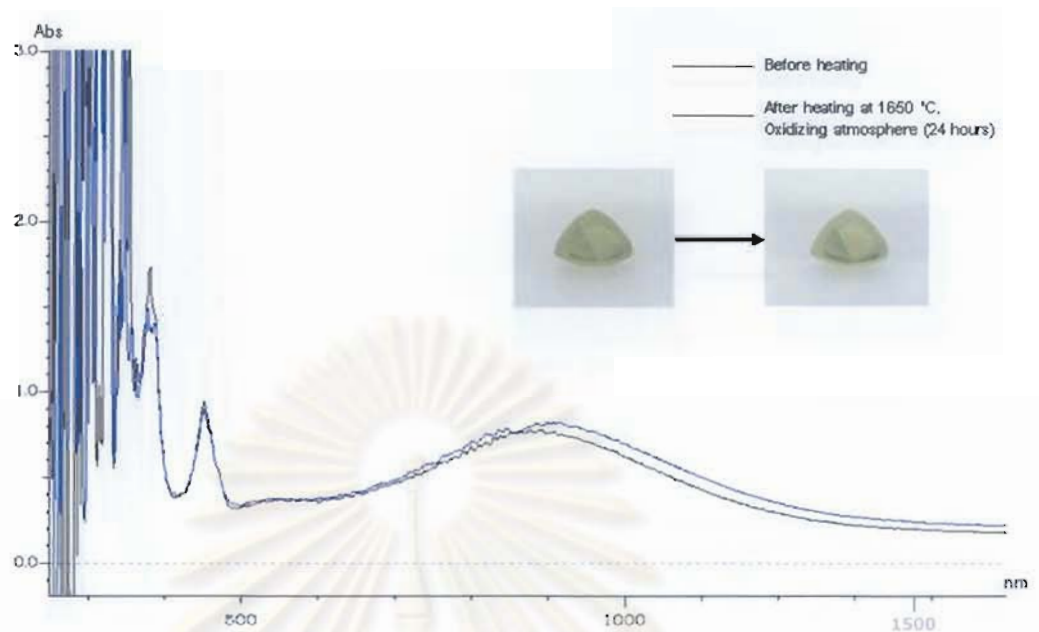
รูปที่ 4.15 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH₄ ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาทิ้งกลับออกจากสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.14 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



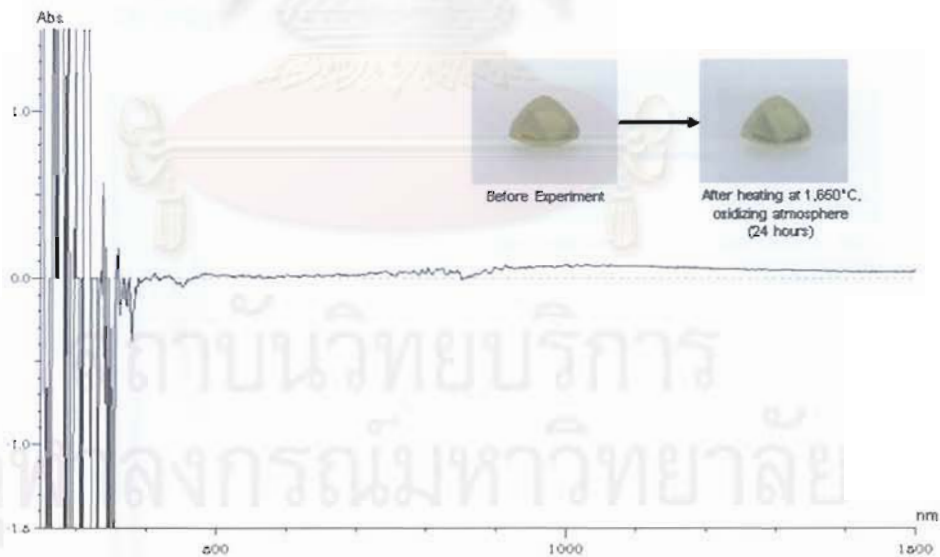
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) ของตัวอย่าง CH5 ที่วัดก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรด สังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเขียวแกมเหลืองที่มีแถบสีน้ำเงินอ่อน ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ



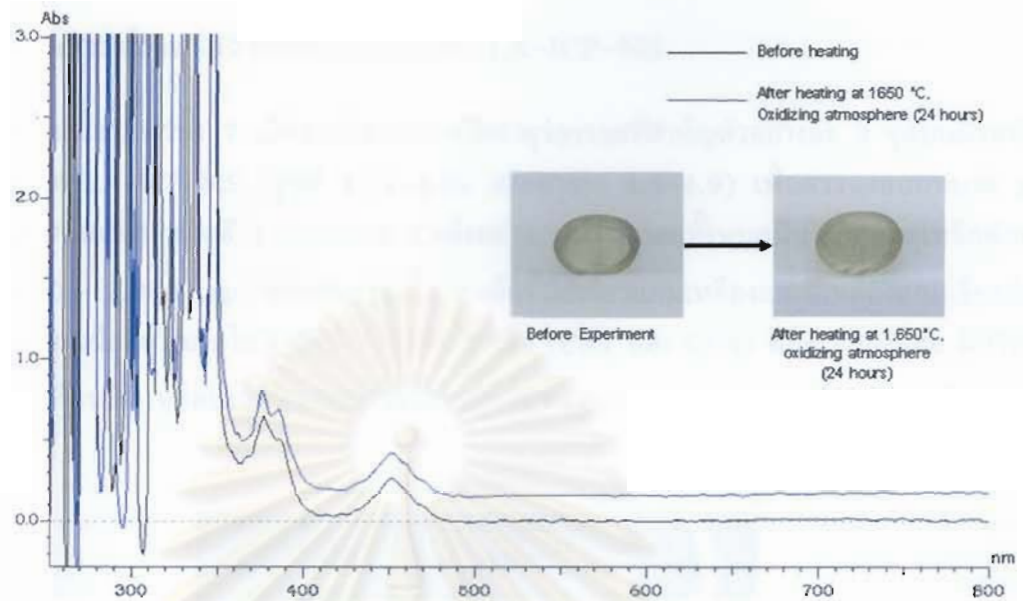
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH5 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาทักลบออกจาก สเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.16 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



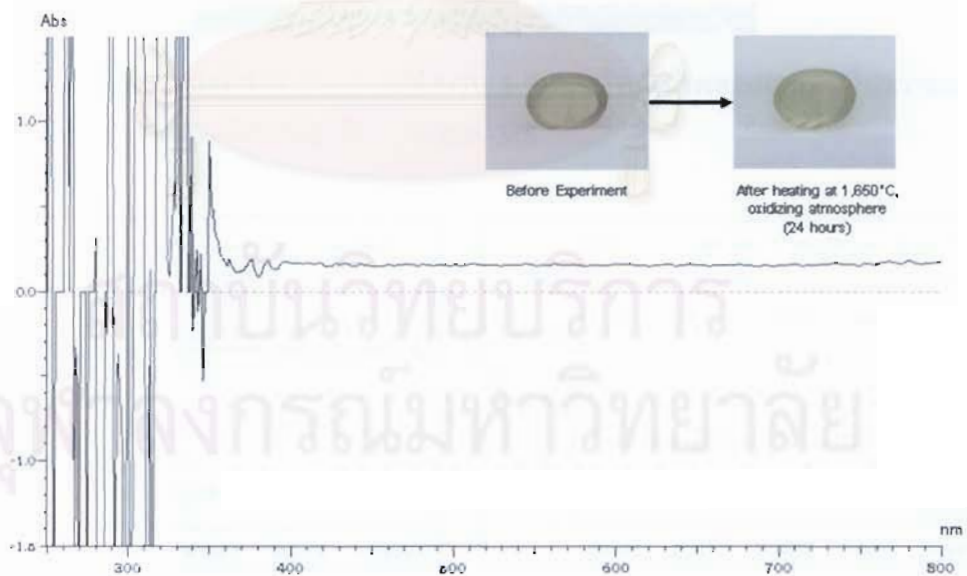
รูปที่ 4.18 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays)ของตัวอย่าง CH6 ที่วัดก่อน และ หลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกต การดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเขียวแกมเหลืองที่มีแถบสีน้ำเงินเขียวที่เด่นชัด ดังนั้นจึงพบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH6 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาทักลบออกจากสเปกตรัม หลังเผาในรูปที่ 4.18 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ



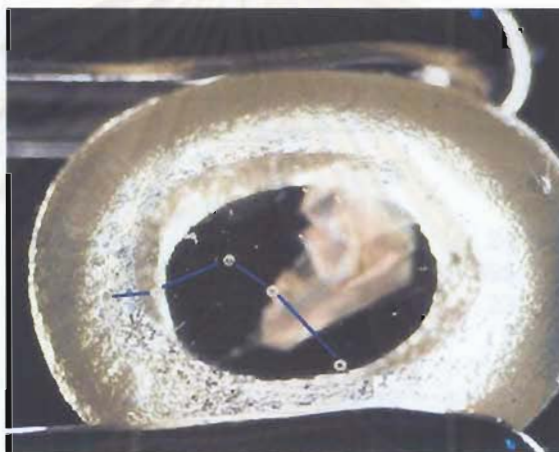
รูปที่ 4.20 สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงUV-Vis (o-rays)ของตัวอย่าง CH7 ที่วัดก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ โปรดสังเกตการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ที่เด่นชัด เนื่องจากพลอยเม็ดนี้มีสีเหลืองอ่อนและแถบสีน้ำเงินเขียวบริเวณขอบ ดังนั้นจึงไม่พบแถบการดูดกลืนอันเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT เพราะวัดสเปกตรัมบริเวณกลางเม็ด



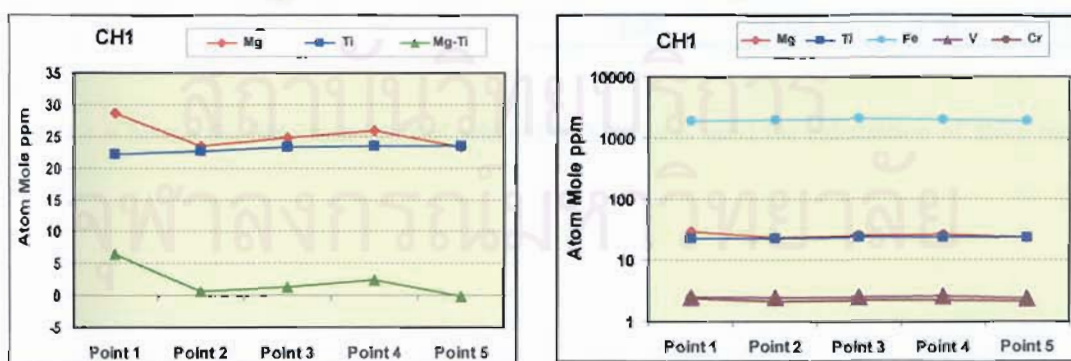
รูปที่ 4.21 สเปกตรัมที่เหลือของตัวอย่าง CH7 ที่ได้จากการนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจาสเปกตรัมหลังเผาในรูปที่ 4.20 ปรากฏว่าเป็นเส้นตรงราบเรียบ

4.6 ผลวิเคราะห์ธาตุร่องรอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

พลอยแซปไฟร์ทั้ง 7 เม็ดได้ทำการตรวจวัดธาตุร่องรอยที่สำคัญตัวอย่างละ 5 จุดบนผิวหน้าขัดมัน ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS (รูปที่ 4.22-4.35 และตาราง 4.3-4.9) เพื่อตรวจสอบบทบาท ของธาตุร่องรอยเหล่านั้นต่อการเกิดสี จากรูปและตารางดังกล่าว พบว่าพลอยทั้งหมดมีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,000 - 7,000 \text{ ppm}$) และพบว่า 5 ใน 7 เม็ดที่มีสีเขียวแกมเหลืองและสีเหลืองแกมเขียวมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียม ส่วนอีก 2 เม็ด (CH1 และ CH4) ที่มีสีเหลืองอ่อน มีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเกือบเท่า หรือมากกว่าธาตุไทเทเนียมเล็กน้อย ($Mg - Ti < \sim 6 \text{ to } 0 \text{ ppm}$) เกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 4.22 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านหน้าพลอยจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

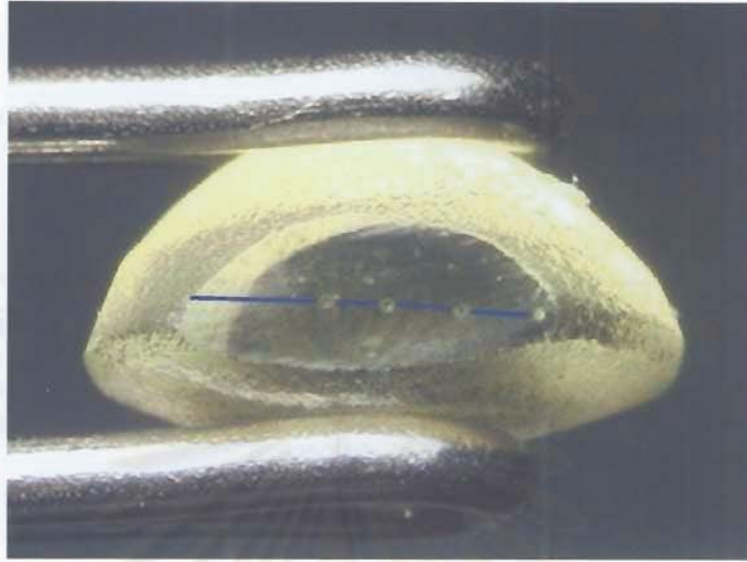


รูปที่ 4.23 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH1 ในรูปที่ 4.22 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,880$ ถึง $2,000 \text{ ppm}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเกือบเท่ากับ หรือมากกว่าธาตุไทเทเนียมเพียงเล็กน้อย ($Mg - Ti < \sim 6$ ถึง 0 ppm) ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์

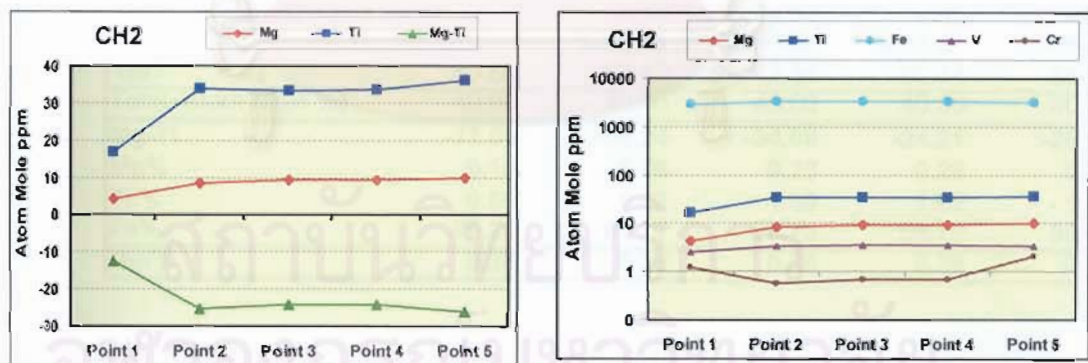
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH1 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS

CH1	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weght)					
Be	<0.132	<0.202	<0.176	<0.183	<0.196
Na	1.72	<0.92	<0.80	<0.81	<0.86
Mg	34.31	28.07	29.64	31.07	27.99
Al	529250.5	529250.5	529250.44	529250.5	529250.44
Ti	52.35	53.76	55.16	55.38	55.32
V	6.33	6.19	6.33	6.37	6.02
Cr	6.06	5.48	5.58	5.59	5.55
Mn	0.504	0.326	0.452	0.305	0.568
Fe	5197.6	5301.52	5504.16	5488.38	5207.01
Ga	170.43	172.16	179.56	179.79	170.57
Total %	52.97	52.96	52.96	52.96	52.96
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	1.52	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	28.64	23.43	24.74	25.93	23.37
Al	398004.79	397973.18	397895.78	397900.17	398007.16
Ti	22.17	22.77	23.36	23.45	23.43
V	2.52	2.47	2.52	2.54	2.40
Cr	2.36	2.14	2.18	2.18	2.17
Mn	0.19	0.12	0.17	0.11	0.21
Fe	1888.20	1925.80	1999.02	1993.31	1891.63
Ga	37.66	40.52	35.73	37.37	37.19
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	6.47	0.66	1.38	2.48	-0.07
Mg%	1.48	1.19	1.21	1.27	1.21
Ti %	1.14	1.15	1.14	1.15	1.21
Fe%	97.38	97.66	97.65	97.58	97.59
Mg/Ti	1.29	1.03	1.06	1.11	1.00

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.24 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

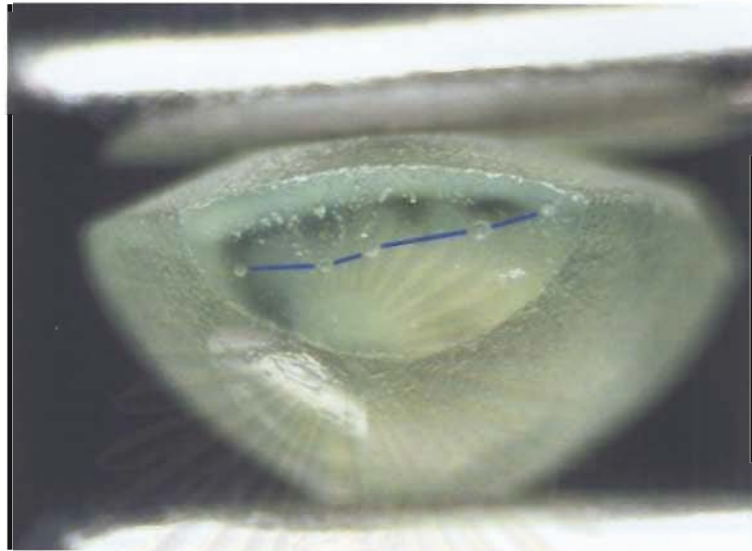


รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH2 ในรูปที่ 4.24 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง (Fe ~2,800 ถึง 3,300 ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (Mg-Ti ~ -12 ถึง -26 ppm)

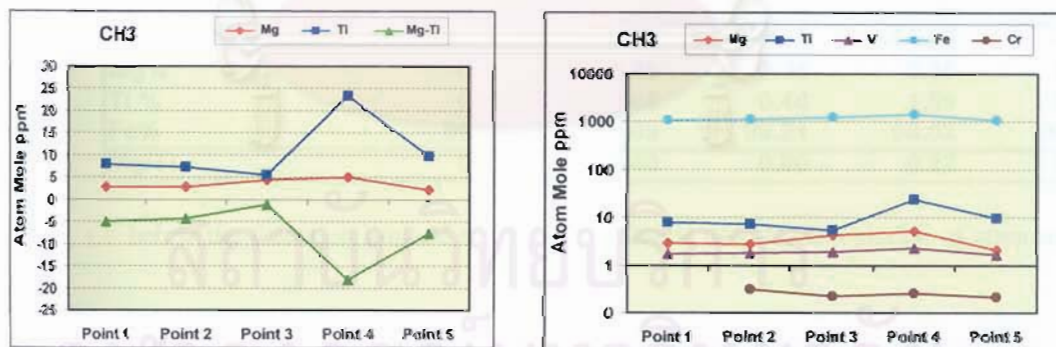
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH2 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS

CH2	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.142	<0.184	<0.165	<0.158	<0.153
Na	<0.70	<0.88	<0.78	<0.72	<0.71
Mg	5.04	10.22	11.09	11.12	12.04
Al	529250.50	529250.50	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	39.65	79.93	78.90	79.27	85.42
V	6.47	8.61	8.95	8.91	8.50
Cr	3.19	1.47	1.77	1.80	5.47
Mn	1.00	1.16	1.37	1.33	1.39
Fe	7727.55	8957.84	9111.48	8926.44	8740.77
Ga	174.21	215.21	215.05	209.44	203.34
Total %	52.97	53.00	52.98	52.97	53.06
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	4.20	8.50	9.22	9.25	10.02
Al	397123.20	396647.78	396592.07	396659.94	396723.76
Ti	16.76	33.74	33.30	33.46	36.07
V	2.57	3.42	3.55	3.54	3.37
Cr	1.24	0.57	0.69	0.70	2.13
Mn	0.37	0.43	0.50	0.49	0.51
Fe	2801.07	3243.14	3298.30	3231.87	3165.16
Ga	50.58	62.42	62.36	60.74	58.98
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	-12.56	-25.24	-24.08	-24.21	-26.05
Mg%	0.15	0.26	0.28	0.28	0.31
Ti %	0.59	1.03	1.00	1.02	1.12
Fe%	99.26	98.71	98.73	98.70	98.56
Mg/Ti	0.25	0.25	0.28	0.28	0.28

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.26 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

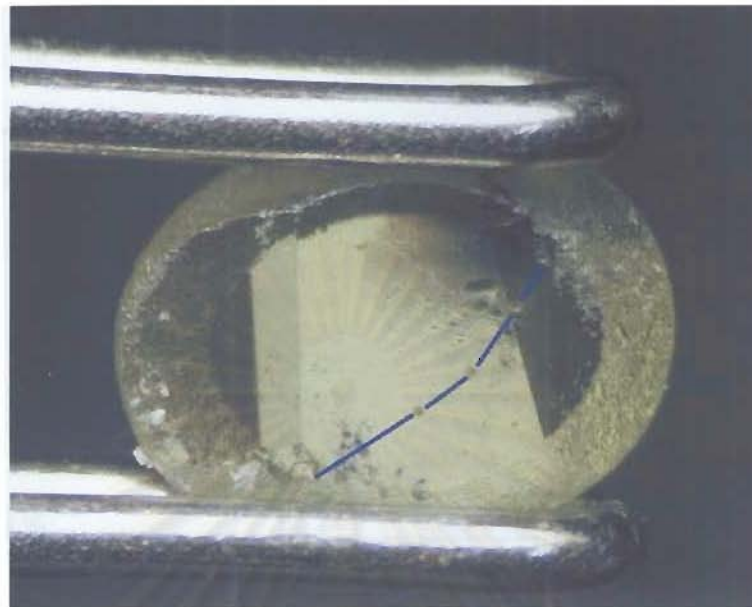


รูปที่ 4.27 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH3 ในรูปที่ 4.26 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,100$ ถึง $1,400 \text{ ppm}$) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim -1$ ถึง -18 ppm)

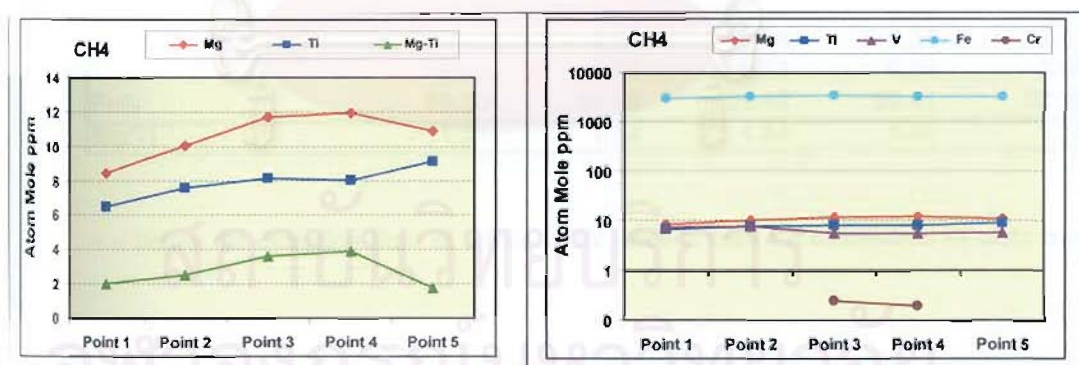
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH3 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วยวิธี LA-ICP-MS

CH3	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.238	<0.27	<0.138	0.22	<0.110
Na	4.29	<2.85	<1.39	<1.43	<1.14
Mg	3.48	3.42	5.18	6.18	2.46
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	18.56	17.05	12.73	54.75	22.86
V	1.756	1.811	1.953	2.353	1.648
Cr	<0.67	0.81	0.57	0.67	0.54
Mn	0.647	0.775	0.833	0.921	0.688
Fe	2950.52	3023	3376.35	3935.11	2993.9
Ga	185.12	188.4	198.6	205.89	170
Total %	53.02	52.99	53.01	52.99	52.99
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
Na	3.79	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.91	2.86	4.33	5.17	2.06
Al	398856.32	398833.14	398702.34	398478.33	398847.60
Ti	7.88	7.24	5.40	23.22	9.70
V	0.70	0.72	0.78	0.94	0.66
Cr	0.00	0.32	0.22	0.26	0.21
Mn	0.24	0.29	0.31	0.34	0.25
Fe	1074.17	1100.49	1228.72	1431.26	1089.94
Ga	53.99	54.94	57.90	59.99	49.58
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	-4.97	-4.38	-1.07	-18.05	-7.65
Mg%	0.27	0.26	0.35	0.35	0.19
Ti %	0.73	0.65	0.44	1.59	0.88
Fe%	99.01	99.09	99.21	98.02	98.93
Mg/Ti	0.37	0.40	0.80	0.22	0.21

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.28 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH4 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 4.29 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH4 ในรูปที่ 4.28 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 2,900$ ถึง $3,400$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมมากกว่าธาตุไทเทเนียมอยู่เพียงเล็กน้อย ($< \sim 4$ ppm) ตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์

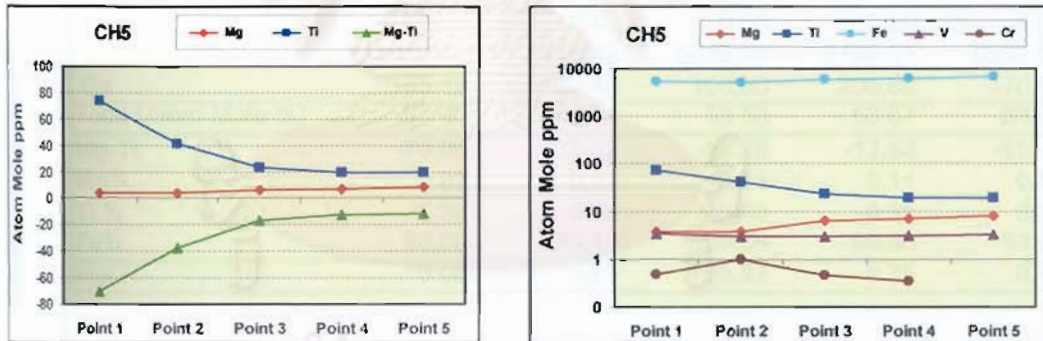
ตารางที่ 4.6 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH4 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วยวิธี LA-ICP-MS

CH4	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.193	<0.194	<0.177	<0.178	<0.169
Na	<0.90	<0.87	<0.80	<0.82	<0.76
Mg	10.16	12.09	14.08	14.37	13.13
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	15.33	17.89	19.24	19.1	21.66
V	7.08	7.49	5.49	5.53	5.85
Cr	<0.48	<0.45	0.62	0.49	<0.41
Mn	0.813	0.942	1.146	1.185	1.128
Fe	8208.57	9001.8	9374.87	9342.82	9119.53
Ga	211.74	225.25	232.91	233.88	220.13
Total %	53.24	53.25	53.28	53.35	53.24
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	8.46	10.06	11.71	11.95	10.92
Al	396946.39	396654.63	396516.80	396527.86	396611.98
Ti	6.48	7.55	8.12	8.06	9.14
V	2.81	2.97	2.18	2.19	2.32
Cr	0.00	0.00	0.24	0.19	0.00
Mn	0.30	0.35	0.42	0.44	0.42
Fe	2974.11	3259.11	3393.00	3381.50	3301.38
Ga	61.46	65.33	67.53	67.81	63.84
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	1.98	2.51	3.59	3.89	1.78
Mg%	0.28	0.31	0.34	0.35	0.33
Ti %	0.22	0.23	0.24	0.24	0.28
Fe%	99.50	99.46	99.42	99.41	99.40
Mg/Ti	1.31	1.33	1.44	1.48	1.19

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.30 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขัดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH5 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS สองจุดทางซ้ายอยู่ในแถบสีน้ำเงิน สามจุดทางขวาอยู่ในส่วนสีเขียวอมเหลือง

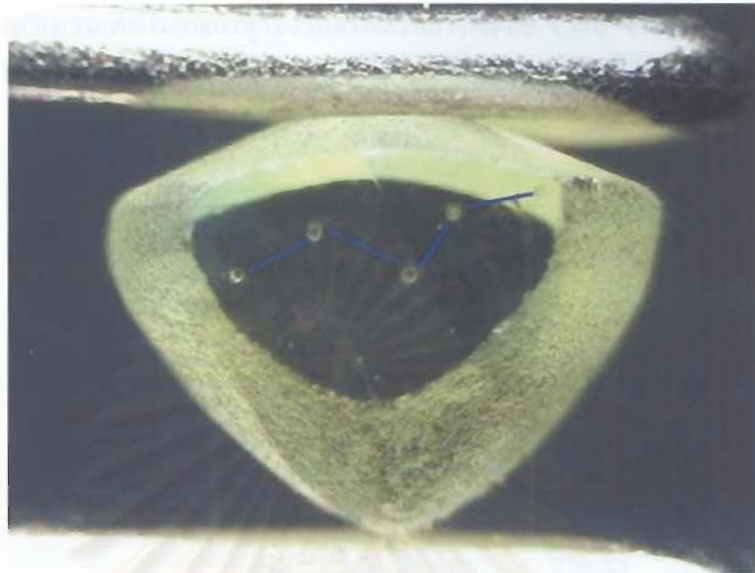


รูปที่ 4.31 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH5 ในรูปที่ 4.30 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 5,000$ ถึง $7,000$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim -11$ ถึง -70 ppm) โดยเฉพาะตรงจุดที่ 1 และ 2 ซึ่งอยู่ในแถบสีน้ำเงินพบว่า มีธาตุไทเทเนียมมากกว่าธาตุแมกนีเซียมอยู่มาก

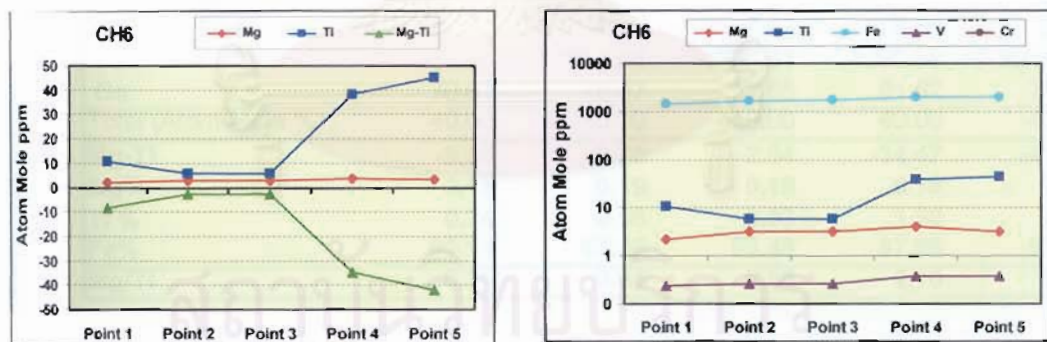
ตารางที่ 4.7 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH5 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วย วิธี LA-ICP-MS

CH5	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.128	<0.121	<0.116	<0.134	<0.126
Na	<1.34	<1.22	<1.18	<1.26	<1.25
Mg	3.78	3.77	6.35	6.88	8.25
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	73.86	41.29	23.13	19.51	19.6
V	3.5	3.01	2.98	3.06	3.26
Cr	0.49	0.98	0.46	0.34	<0.34
Mn	0.615	0.528	0.545	0.596	0.531
Fe	5273.31	5113.49	5812.94	6192.11	6939.56
Ga	164.91	165.07	162.6	164.62	171.32
Total %	53.48	53.46	53.53	53.56	53.64
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	3.78	3.77	6.35	6.88	8.25
Al	529250.44	529250.44	529250.38	529250.44	529250.44
Ti	73.86	41.29	23.13	19.51	19.60
V	3.50	3.01	2.98	3.06	3.26
Cr	0.49	0.98	0.46	0.34	0.00
Mn	0.62	0.53	0.55	0.60	0.53
Fe	5273.31	5113.49	5812.94	6192.11	6939.56
Ga	185.12	188.40	198.60	205.89	170.00
Total (Atom Mole %)	53.48	53.46	53.53	53.57	53.64
Mg-Ti	-70.08	-37.52	-16.78	-12.63	-11.35
Mg%	0.07	0.07	0.11	0.11	0.12
Ti %	1.38	0.80	0.40	0.31	0.28
Fe%	98.55	99.13	99.50	99.58	99.60
Mg/Ti	0.05	0.09	0.27	0.35	0.42

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.32 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขัดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH6 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

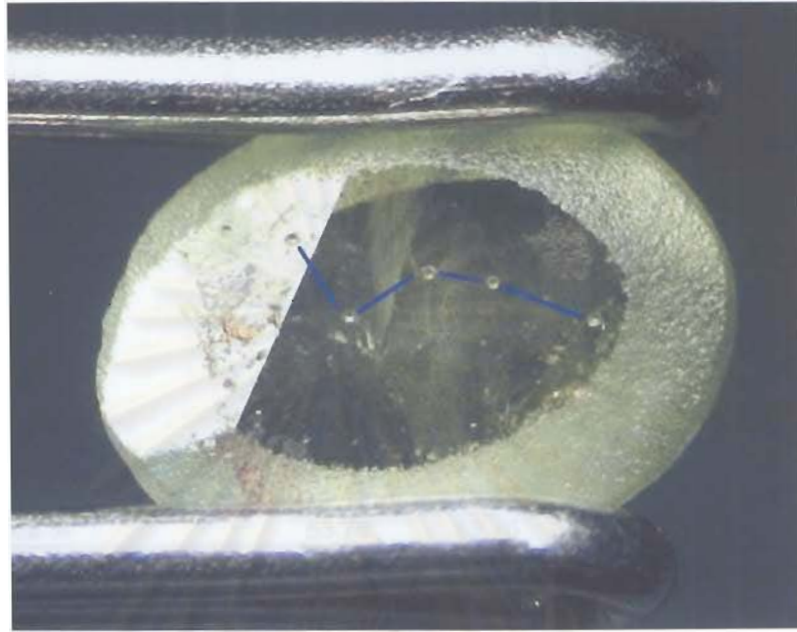


รูปที่ 4.33 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH6 ในรูปที่ 4.32 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,400$ ถึง $2,000$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim 2$ ถึง -42 ppm)

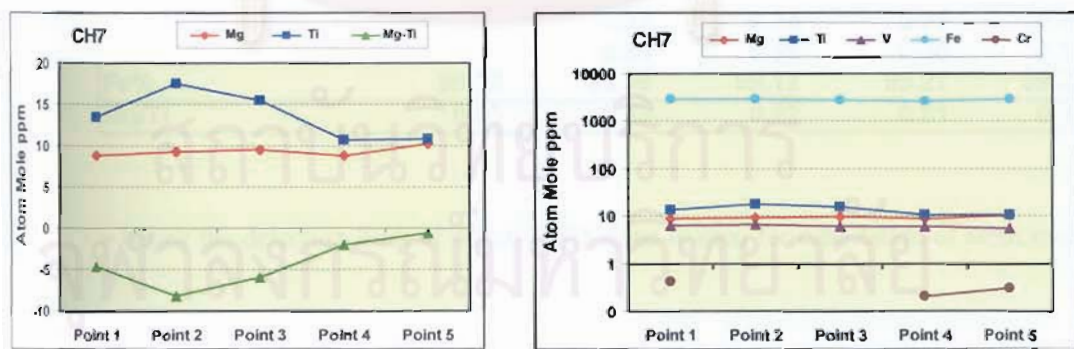
ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุรองรอยในตัวอย่างพลอย CH6 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วยวิธี LA-ICP-MS

CH6	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	0.125	0	0	0.713	0.976
Na	<1.38	<1.35	<1.42	<1.40	<1.06
Mg	2.65	3.87	3.83	4.75	3.93
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	25	14	13.54	90.76	106.82
V	0.592	0.66	0.662	0.965	0.98
Cr	<0.35	<0.35	<0.37	<0.36	<0.27
Mn	1.058	1.268	1.158	1.399	1.336
Fe	3913.83	4552.62	4689.58	5503.53	5548.59
Ga	243.03	268.09	270.82	280.57	269.41
Total %	53.34	53.41	53.42	53.51	53.52
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.28	0.00	0.00	1.60	2.20
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.21	3.23	3.20	3.96	3.28
Al	398491.89	398257.09	398207.01	397874.79	397855.09
Ti	10.60	5.93	5.74	38.43	45.23
V	0.24	0.26	0.26	0.38	0.39
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.39	0.47	0.43	0.52	0.49
Fe	1423.57	1654.94	1704.51	1998.69	2014.95
Ga	70.81	78.07	78.85	81.62	78.37
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	-8.39	-2.70	-2.54	-34.47	-41.95
Mg%	0.15	0.19	0.19	0.19	0.16
Ti %	0.74	0.36	0.33	1.88	2.19
Fe%	99.11	99.45	99.48	97.85	97.55
Mg/Ti	0.21	0.54	0.56	0.10	0.07

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 4.34 แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดบนด้านที่ขีดมันจากซ้ายไปขวาของตัวอย่าง CH7 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 4.35 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง CH7 ในรูปที่ 4.33 จากผลวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 2,600$ ถึง $3,000$ ppm) และมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ ($Mg-Ti \sim -1$ ถึง -8 ppm)

ตารางที่ 4.9 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยในตัวอย่างพลอย CH7 จากบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ด้วยวิธี LA-ICP-MS

CH7	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.30	0.22	<0.171	<0.190	<0.171
Na	<3.00	<1.43	<1.71	<1.87	<1.72
Mg	10.54	11.12	11.50	10.51	12.30
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	31.75	41.36	36.65	25.43	25.55
V	6.38	6.46	5.95	6.12	5.51
Cr	1.09	<0.37	<0.43	0.52	0.77
Mn	0.58	0.61	0.66	0.61	0.65
Fe	7894.85	8074.62	7769.17	7339.12	8052.94
Ga	171.14	173.45	167.18	161.38	170.64
Total %	53.74	53.76	53.72	53.68	53.75
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	8.78	9.26	9.58	8.76	10.24
Al	397063.66	396993.71	397107.73	397269.50	397008.52
Ti	13.42	17.47	15.49	10.75	10.80
V	2.54	2.57	2.36	2.43	2.19
Cr	0.42	0.00	0.00	0.20	0.30
Mn	0.21	0.22	0.24	0.22	0.24
Fe	2861.29	2925.93	2816.05	2661.26	2918.18
Ga	49.69	50.35	48.54	46.88	49.53
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	-4.64	-8.22	-5.91	-1.99	-0.55
Mg%	0.30	0.31	0.34	0.33	0.35
Ti %	0.47	0.59	0.55	0.40	0.37
Fe%	99.23	99.08	99.12	99.27	99.28
Mg/Ti	0.65	0.53	0.62	0.81	0.95

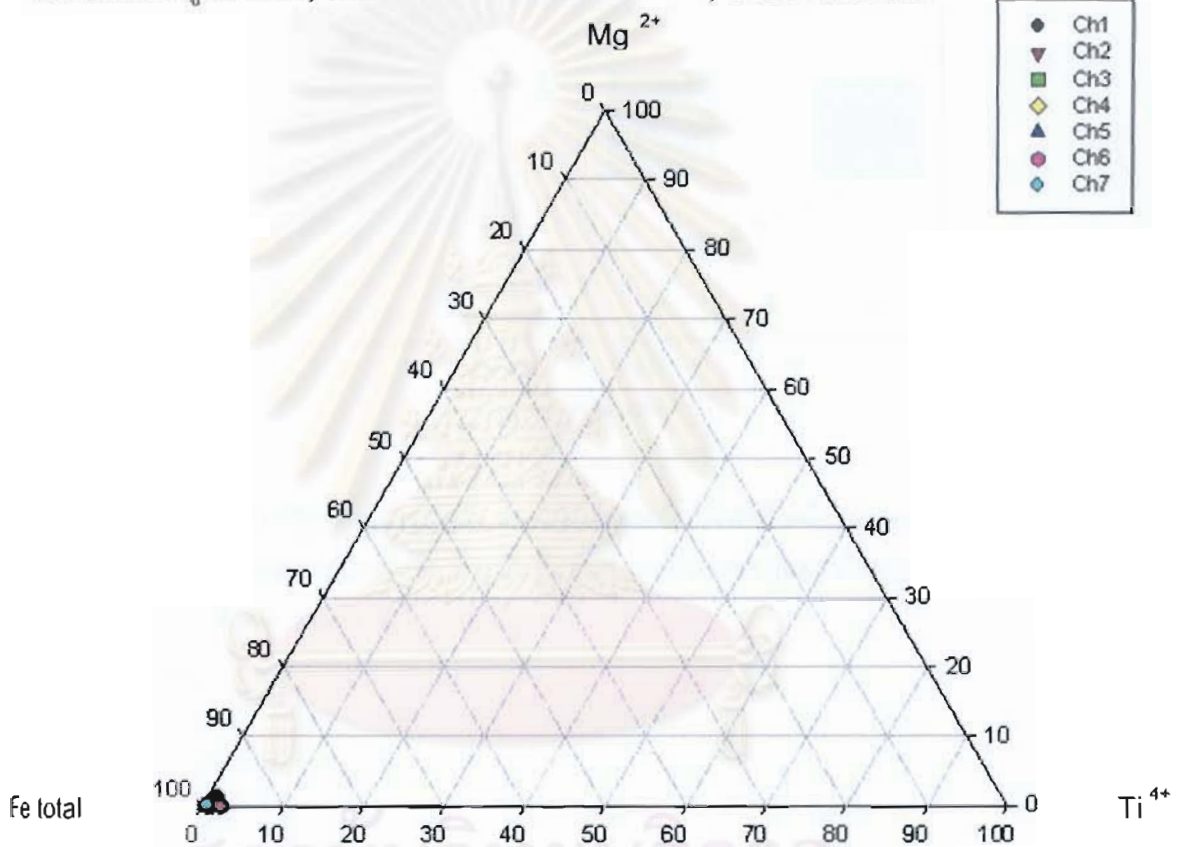
< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

4.7 อภิปรายผล

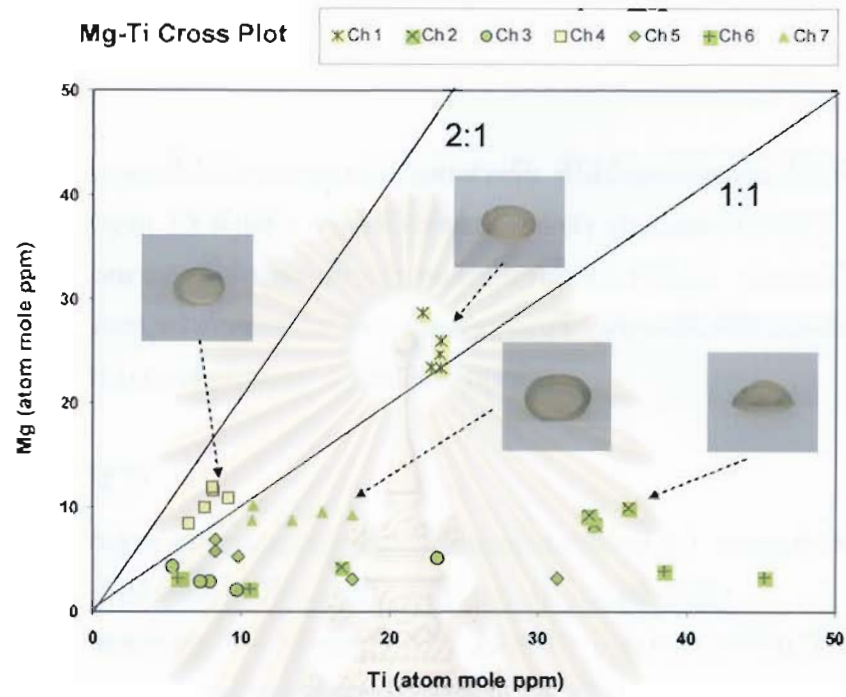
จากการนำพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลืองสด จำนวน 7 เม็ด จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี (คือพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงหรือที่เรียกว่าพลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์) มาเผาที่อุณหภูมิ 1,650 °C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (บรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์) เป็นเวลา 10 และ 24 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาอบ และอีก 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผายก พบว่าสีของพลอยทั้ง 7 เม็ดแทบไม่เปลี่ยนแปลง พบว่าสเปกตรัม (o-rays) ของพลอยดังกล่าวที่วัดทั้งก่อนและหลังเผา (รูปที่ 4.8 ถึง 4.21) แสดงการดูดกลืนคลื่นแสงที่คล้ายกันที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตร ซึ่งปรกติมักพบในพลอยคอร์รันดัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง นอกจากนั้นในตัวอย่างที่มีแถบสีน้ำเงินเขียว (Cyan) จะพบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่มีจุดสูงสุดที่ 565 และ 900 นาโนเมตรตามลำดับ เนื่องจากสีของพลอยทั้ง 7 เม็ดไม่เปลี่ยนหลังเผา ดังนั้นเมื่อนำสเปกตรัมก่อนเผาหักลบออกจากสเปกตรัมหลังเผา สเปกตรัมที่เหลือจะปรากฏเป็นเส้นตรงราบเรียบ และยังพบอีกว่าการเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงในครั้งนี้อาจไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความสูงของการดูดกลืนที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 450, 388 and 377 นาโนเมตรเลย รวมทั้งความสูงของการดูดกลืนของแถบคลื่นอื่นเนื่องมาจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ของแต่ละตัวอย่างถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ 1650°C ถึง 3 ครั้งเป็นเวลารวมกันถึง 44 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม

จากผลการวิเคราะห์พลอยด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS พบว่าพลอยกลุ่มนี้ทั้งหมดมีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ($Fe \sim 1,000$ ถึง $7,000$ ppm) ซึ่งเป็นการยืนยันว่าเป็นแบบฉบับของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ และพบว่า 5 ใน 7 เม็ดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมน้อยกว่าธาตุไทเทเนียมมาก และอีก 2 เม็ดมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมใกล้เคียงหรือมากกว่าธาตุไทเทเนียมเพียงเล็กน้อย ($Mg - Ti < \sim 6$ ถึง 0 ppm) เกือบทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ เนื่องจากในพลอยกลุ่มนี้มีปริมาณธาตุเหล็กค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่อจัดแสดงข้อมูลลงในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram พบว่าจุดทั้งหมดไปกระจุกตัวอยู่บริเวณยอดของธาตุเหล็ก (รูปที่ 4.36) แสดงว่าธาตุเหล็กส่วนใหญ่ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดศูนย์กลางสี (จากการทดลองกับพลอยคอร์รันดัมสังเคราะห์ ที่เติมเฉพาะธาตุแมกนีเซียมและธาตุเหล็ก พบว่าใช้ธาตุทั้งสองเพียงเล็กน้อย เช่น ปริมาณธาตุละ 50 ppm ก็เพียงพอที่จะทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรได้; Häger, 1996, 2001) และการใช้รูปสามเหลี่ยมดังกล่าวไม่สามารถใช้อธิบายการเกิดสีในพลอยที่มีธาตุเหล็กสูงได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำข้อมูลมาจัดแสดงใน Mg-Ti cross plot (รูปที่ 4.37) พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่ตกอยู่บริเวณใกล้หรือต่ำกว่าเส้น $Mg:Ti$ ratio = 1:1 ซึ่งต่างจากพลอยบุษราคัมบางกะจะอย่างเห็นได้ชัด แต่คล้ายกับที่พบในแถบสีน้ำเงินเขียวในบทที่ 3

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถอนุมานได้ว่าไม่มีธาตุแมกนีเซียมเหลือพอที่จะไปทำให้เกิดศูนย์กลางสีที่เสถียรได้หลังจากที่ไปจับเป็น (colourless) MgTiO_3 clusters จนหมด แต่มีไทเทเนียมเหลือมากพอที่จะไปทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียว (Cyan) อันเนื่องมาจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ IVCT (colour active FeTiO_3 clusters) และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ถึงแม้ว่าจะเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียง Fe^{2+} ก็ยังคงสถานะประจุ 2^+ อยู่ได้ เนื่องมาจากสมดุลประจุ (charge compensation) ของ clusters ดังกล่าว ดังนั้นสีเหลืองอ่อนที่พบในพลอยกลุ่มนี้มีสาเหตุมาจาก Fe^{3+} transitions เป็นหลัก (โดยเฉพาะตัวอย่าง CH1, CH4, CH7 ที่มีสีเหลืองอ่อนเป็นหลักในรูปที่ 4.37) ซึ่งเมื่อรวมกับสีน้ำเงินเขียว (Cyan) ทำให้พลอยดังกล่าว



รูปที่ 4.36 แสดงผลข้อมูลในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram ของกลุ่มพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง (CH1-7) จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ซึ่งมีปริมาณธาตุเหล็กสูง จึงพบว่าข้อมูลไปกระจุกตัวอยู่ที่ยอดของธาตุเหล็ก



รูปที่ 4.37 แสดงข้อมูลใน Mg-Ti cross plot ของกลุ่มพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวและสีเขียวแกมเหลือง (CH1-7) จากแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี จะเห็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่จะตกอยู่บริเวณใกล้หรือต่ำกว่าเส้น Mg:Ti ratio = 1:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5 พลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน

5.1 บทนำ


ตัวอย่างพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน ที่ได้นำมาทดลองเผาได้แก่ พลอยแซปไฟร์ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ชุดนี้ เป็นชุดที่เหมาะสมที่ใช้เปรียบเทียบกับพลอยบุษราคัมจากศรีลังกา (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร) กับพลอยบุษราคัมจากบางกะจะ และกาญจนบุรี (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟบะซอลต์) เพื่อทดสอบสมมุติฐานของการวิจัยเป็นครั้งสุดท้าย

5.2 สมบัติพื้นฐาน


สมบัติพื้นฐาน ของพลอยชุดดังกล่าวได้สรุปอยู่ใน ตารางที่ 5.1 และองค์ประกอบทางเคมี ที่ทำการวิเคราะห์ในเบื้องต้นด้วยเครื่องมือ EDXRF อยู่ใน ตารางที่ 5.2 ตามลำดับ

ตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ จากแหล่งพลอย อิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ เป็นพลอยที่สะสมตัวอยู่ในชั้นกะสะพลอยชนิดทุติยภูมิ ซึ่งเชื่อกันว่ามีกำเนิดจากแหล่งปฐมภูมิที่มีความสัมพันธ์กับหินแปร แต่จากผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ของพลอยชุดดังกล่าวในตารางที่ 5.2 และ 5.3 พบว่า มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกันอย่างมาก จากค่าต่ำมาก เช่น จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ EDXRF พบว่า ตัวอย่าง Ymd6 และ Ymd7 มีค่า Fe_2O_3 อยู่ระหว่าง 0.11 ถึง 0.17 % ซึ่งเป็นค่าปกติที่พบอยู่ในพลอยบุษราคัมจากประเทศศรีลังกา (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร) และสูงชันอย่างต่อเนื่องไปจนถึงค่าสูงมาก เช่น ตัวอย่าง Ymd4, Ymd10, Ymd3, Ymd8 และ Ymd11 ที่มีค่า Fe_2O_3 มากกว่า 0.8 % ซึ่งเป็นค่าปกติที่พบอยู่ในพลอยพลอยบุษราคัมจากบางกะจะ (แบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินบะซอลต์) ข้อที่น่าสังเกตคือ พลอยที่มีค่าเหล็กสูงทั้งห้าตัวอย่าง (Ymd4, Ymd10, Ymd 3, Ymd8 และ Ymd11 ในตารางที่ 5.3) มีสีเหลืองอ่อนถึงอ่อนมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น ๆ ที่ไม่มีสีและมีปริมาณค่าเหล็กต่ำกว่า

ตารางที่ 5.1 แสดงสมบัติพื้นฐาน ของพลอยแซปไฟร์ ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		Picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
Ymd1	1.909	1.763	1.769	colourless	3.990	Inert	Weak orange	

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		Picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
Ymd2	1.460	1.763	1.770	colourless	3.964	Inert	Weak orange	
Ymd3	1.306	1.762	1.771	Light yellow	3.973	Inert	Inert	
Ymd4	1.041	1.761	1.770	Very light yellow	3.941	Inert	Weak orange	
Ymd5	0.990	1.761	1.769	colourless	3.950	Inert	Weak orange	
Ymd6	0.853	1.761	1.769	colourless	3.972	Inert	Weak orange	
Ymd7	0.793	1.763	1.769	colourless	3.990	Inert	Inert	
Ymd8	0.597	1.765	1.773	Light yellow	3.995	Inert	Inert	
Ymd9	0.625	1.762	1.769	colourless	3.938	Inert	Weak orange	
Ymd10	0.601	1.760	1.769	Very light yellow	3.972	Inert	Inert	
Ymd11	0.487	1.765	1.772	light yellow	3.970	Inert	Weak orange	

Sample no.	Weight (ct)	RI		Colour	SG	Luminescence		Picture
		Min	Max			SW UV	LW UV	
Ymd12	0.463	1.768	1.772	colourless	3.973	Inert	Weak orange	






ตารางที่ 5.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมี (%) ของพลอยแซปไฟร์โรสีถึงสีเหลืองอ่อน จำนวน 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ที่ทำการวิเคราะห์ในเบื้องต้นด้วยเครื่องมือ EDXRF

Sample no.	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃
Ymd 1	99.62	0.01	0.33	0.02	0.00	0.01
Ymd 2	99.39	0.01	0.56	0.02	0.00	0.01
Ymd 3	98.99	0.01	0.98	0.02	0.00	0.01
Ymd 4	99.16	0.01	0.80	0.00	0.00	0.01
Ymd 5	99.47	0.01	0.47	0.03	0.00	0.01
Ymd 6	99.84	0.00	0.17	0.02	0.00	0.01
Ymd 7	99.80	0.00	0.11	0.02	0.00	0.02
Ymd 8	98.25	0.02	1.69	0.00	0.00	0.02
Ymd 9	99.31	0.02	0.63	0.00	0.00	0.01
Ymd 10	98.88	0.01	1.02	1.05	0.00	0.02
Ymd 11	98.34	0.01	1.61	0.03	0.00	0.02
Ymd 12	99.19	0.00	0.75	0.00	0.00	0.02

5.3 การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS และ EDXRF

ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ที่ได้เป็น ppm โดยน้ำหนัก ได้นำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ และได้ทำการจัดเรียงลำดับตัวอย่างใหม่ โดยใช้ค่าเฉลี่ยของปริมาณเหล็กจากค่าต่ำไปค่าสูงตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 5.3 เมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องมือ EDXRF ผลปรากฏว่าค่าที่วัดได้ด้วยเครื่องมือ EDXRF ที่สถาบันฯ มีค่าสูงกว่าในทุกตัวอย่าง แต่โดยส่วนใหญ่สอดคล้องกับลำดับที่เรียงลำดับไว้ใหม่ อย่างไรก็ตามมีบางตัวอย่างที่ขัดแย้งอยู่บ้าง แต่เนื่องจากค่าที่วัดด้วยเครื่องมือ EDXRF เป็นเพียง semi-quantitative result จึงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงกว่ามาก (LA-ICP-MS วิเคราะห์เป็นจุดเล็ก ๆ ที่มีความถูกต้องแม่นยำเฉพาะจุดสูง จึงต้องทำการวิเคราะห์จำนวนหลายจุดเพื่อนำมาเป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวอย่าง ในขณะที่ EDXRF วิเคราะห์เป็นพื้นที่ใหญ่กว่า แต่ไม่ได้ใช้ standard และมีการปรับเทียบให้ได้ 100%) สำหรับผลวิเคราะห์ของธาตุอื่นๆ จะอยู่ในบทหลัง

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของธาตุเหล็กด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS และ EDXRF

Sample no.	Average Fe ₂ O ₃ Contents (atom mole ppm) by LA-ICP-MS (5 spots)	Average Fe ₂ O ₃ Contents (%) by LA-ICP-MS (5 spots)	Fe ₂ O ₃ Contents (%) by EDXRF	Colour	Pictures
Ymd7	51.60	0.02	0.11	colourless	
Ymd6	193.19	0.07	0.17	colourless	
Ymd1	474.32	0.18	0.33	colourless	
Ymd5	768.37	0.30	0.47	colourless	
Ymd9	805.28	0.31	0.63	colourless	

Sample no.	Average Fe ₂ O ₃ Contents (atom mole ppm) by LA-ICP-MS (5 spots)	Average Fe ₂ O ₃ Contents (%) by LA-ICP-MS (5 spots)	Fe ₂ O ₃ Contents (%) by EDXRF	Colour	Pictures
Ymd2	1137.84	0.44	0.56	colourless	
Ymd12	1154.32	0.45	0.75	colourless	
Ymd4	1555.26	0.61	0.80	Very light yellow	
Ymd10	1802.19	0.70	1.02	Very light yellow	
Ymd3	1946.88	0.76	0.98	Light yellow	
Ymd8	2064.65	0.80	1.69	Light yellow	
Ymd11	2883.50	1.12	1.61	Light yellow	

5.4 การทดลองเผา

พลอยแซปไฟร์ทั้ง 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอยอิลลาภา ประเทศมาดากัสการ์ ได้ทำการทดลองเผาที่อุณหภูมิ 1,650°C ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ถึง 3 ครั้ง โดยในครั้งแรกเผาเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และครั้งที่สองเพิ่มเวลาอีกเป็น 24 ชั่วโมง (ดูรายละเอียดใน รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2) โดยมีได้ทำการยกพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิสูง แต่ปล่อยให้พลอยเย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องภายในเตา (เผาอบ) พบว่าในการเผาทั้งสองครั้ง พลอยส่วนใหญ่หลังเผาเปลี่ยนสีไปน้อยมากและเกิดขึ้นเพียงบางเม็ดเท่านั้น

ดังนั้นในการเผาครั้งที่สามได้ทำการเผาไปพร้อมกับตัวอย่างพลอยบุษราคัมจากศรีลังกา (บทที่ 2) พลอยบุษราคัมและพลอยเขียวบางกะจะ (บทที่ 3 และ 4) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง แล้วทำการยกพลอยออกจากเตาที่อุณหภูมิประมาณ 1000°C (เผายก) หลังจากนั้นทำการ fade test ด้วยหลอดไฟ 100 แสงเทียนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในแต่ละขั้นตอนของการทดลอง ได้ทำการบันทึกภาพ และตรวจวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ทุกระยะ (ไม่ได้ทำการเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่านี้ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวไว้ในบทที่ 4)

5.5 ผลของการทดลองเผา

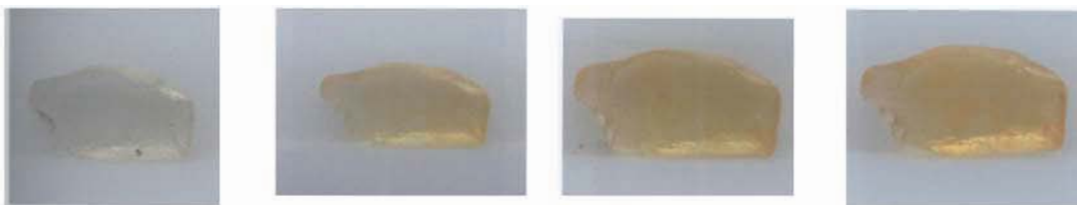
ผลจากการทดลองเผาพลอยแซปไฟร์อิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ในสภาวะดังกล่าวทั้ง 3 ครั้ง พบว่าได้ผลคล้ายกันมาก ไม่ว่าจะได้เพิ่มเวลาในการเผา จาก 10 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมง แล้วก็ทำตาม หรือใช้ทั้งวิธีเผาอบและเผายกก็ได้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

พบว่าพลอย 2 ตัวอย่างแรกที่มีปริมาณค่าเหล็กต่ำสุด (Ymd7 ~51 และ Ymd6 ~193 amp Fe, ตารางที่ 5.3) มีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีสีก่อนเผาเป็นสีเหลืองทองหรือเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผา (รูปที่ 5.1 และ 5.2) ในขณะที่ตัวอย่างที่ 3 ที่มีค่าเหล็กสูงชัน (Ymd1 ~474 amp Fe, ตารางที่ 5.3 พลอยเม็ดนี้แสดงลักษณะที่อยู่กึ่งกลางระหว่างกลุ่มแรกและกลุ่มถัดไป) มีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีสีก่อนเผาเป็นสีเหลืองทองบางบริเวณหลังเผา (รูปที่ 5.3) และสีเหลืองทองที่เกิดขึ้นหลังเผาเป็นสีที่คงทนหลังทำ fade test (ต่อไปนี้จะเรียกพลอยทั้ง 3 ตัวอย่างแรกนี้ว่าเป็นพลอยที่มีปริมาณค่าเหล็กต่ำ, $\text{Fe} < 500 \text{ amp}$)

สำหรับพลอยตัวอย่างอื่น ๆ ที่เหลืออีก 9 ตัวอย่าง ที่มีค่าเหล็กสูงชันมากกว่าสามตัวอย่างแรก (Ymd 5, 9, 2, 12, 4, 10, 3, 8, 11; $\text{Fe} \sim 768$ ถึง $\sim 2,863 \text{ amp}$; ตารางที่ 5.4 ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกพลอยกลุ่มนี้ว่าเป็นพลอยที่มีปริมาณค่าเหล็กปานกลาง, $\text{Fe} \sim 500$ ถึง $\sim 1,000 \text{ amp}$ ถึงสูง, $\text{Fe} > 1,000 \text{ amp}$) พบว่าสีแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลยหลังเผา ยกเว้นคราบสนิมเหล็กที่จับอยู่บนผิวได้จางหายไป (รูปที่ 5.4 ถึง 5.12)



รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd7 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองเล็กน้อยที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เหลือ 51.6 amp และ หนา 1.67–2.36 มม



รูปที่ 5.2 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd6 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองทองที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 139.2 amp และ หนาประมาณ 2.38 มม



รูปที่ 5.3 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd1 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏเป็นสีเหลืองทองบางจุดที่คงทนเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 474.3 amp และ หนา 2.19-2.76 มม



รูปที่ 5.4 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd5 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) สีนํ้าตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 768.4 amp และ หนา 1.38-2.38 มม



รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd9 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย) สีนํ้าตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 805.3 amp และ ทน 1.69-1.85 มม



รูปที่ 5.6 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd2 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีนํ้าตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,137.8 amp และ ทน 2.27-2.44 มม



รูปที่ 5.7 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd12 ที่ไร้สีก่อนเผา (รูปซ้าย สีนํ้าตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,154.3 amp และ ทน 1.52-1.66 มม



รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd4 ที่มีสีเหลืองอ่อนมากก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,555.3 amp และ หนา 2.12-2.65 มม



รูปที่ 5.9 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd10 ที่มีสีเหลืองอ่อนมากก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,802.2 amp และ หนา 1.59-1.81 มม



รูปที่ 5.10 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd3 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย สีน้ำตาลบริเวณขอบเกิดจากคราบสนิมเหล็ก) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 1,946.9 amp และ หนา 2.28-2.89 มม



รูปที่ 5.11 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd8 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 2,064.6 amp และ ทน 1.68-1.73 มม

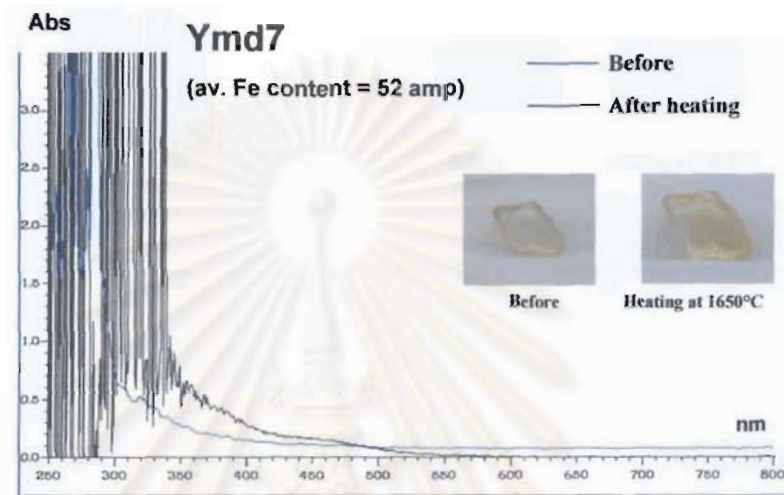


รูปที่ 5.12 แสดงตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ Ymd11 ที่มีสีเหลืองอ่อนก่อนเผา (รูปซ้าย) หลังเผาที่ 1650°C ปรากฏว่าแทบไม่เปลี่ยนสีเมื่อเผาอบ 10 ชั่วโมง (รูปกลางซ้าย) เผาอบ 24 ชั่วโมง (รูปกลางขวา) และเผายก (รูปขวา) ตามลำดับ ตัวอย่างนี้มี Fe เฉลี่ย 2,883.5 amp และ ทน 1.40-1.46 มม

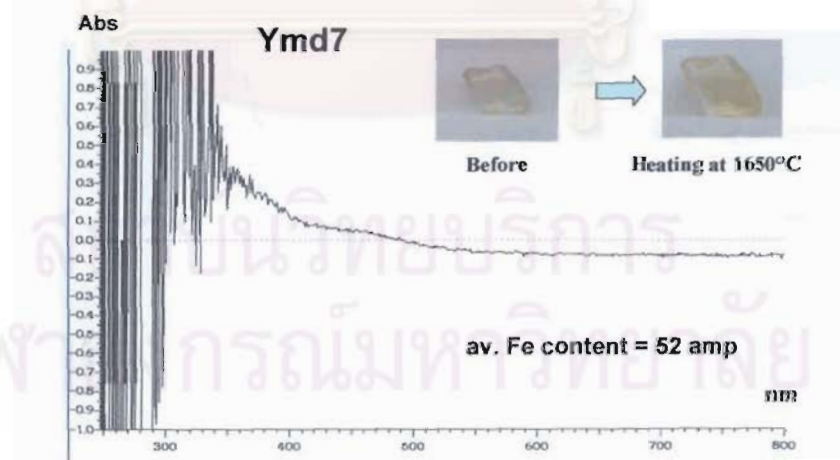
5.6 การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis

จากการตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยทั้งสามตัวอย่างแรก ที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ และมีการเปลี่ยนแปลงสีหลังเผาเด่นชัด พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ที่ปรากฏค่อนข้างราบเรียบก่อนทดลอง มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง หรือไปทาง UV คล้ายๆ กันกับหลังเผาทั้งสามครั้ง (รูปที่ 5.13 ถึง 5.18 แสดงเฉพาะการเผาครั้งที่สาม หรือเผายก) โดยมีไหลที่ประมาณ 460 nm เมื่อทำการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนของพลอยก่อนทดลอง ออก

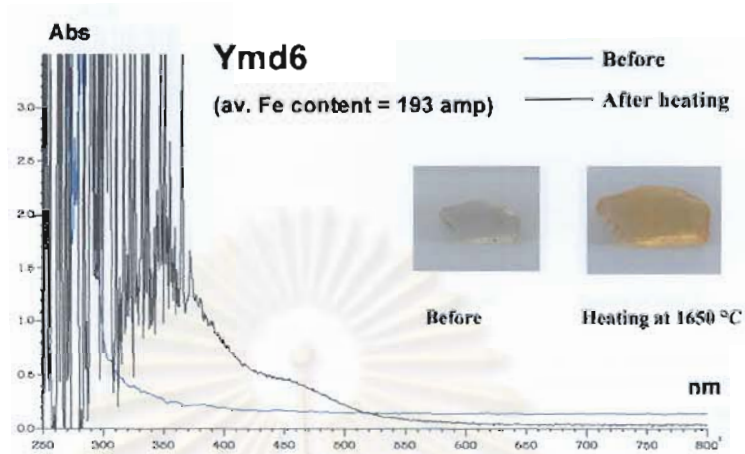
จากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาของแต่ละเม็ด (รูปที่ 5.14, 5.16 และ 5.18) พบว่าสเปกตรัมการที่เหลือก็คือลักษณะการดูดกลืนของสเปกตรัมหลังเผานั่นเอง



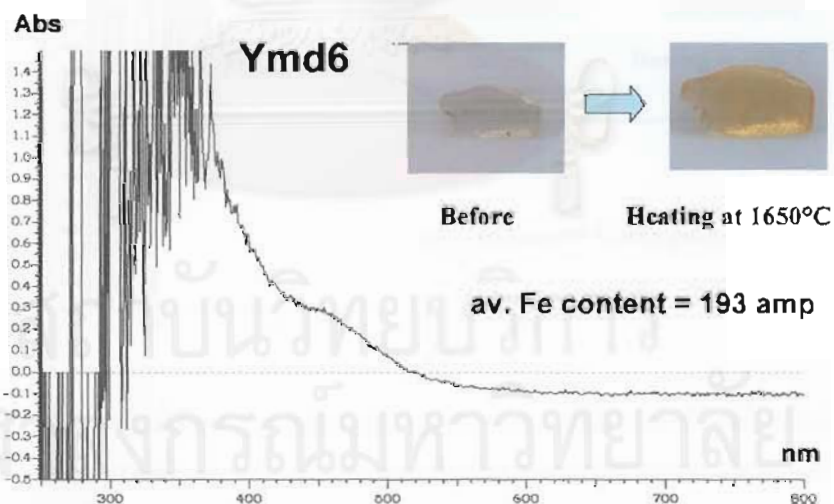
รูปที่ 5.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd7 ที่ทำการวัดก่อนการทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ)



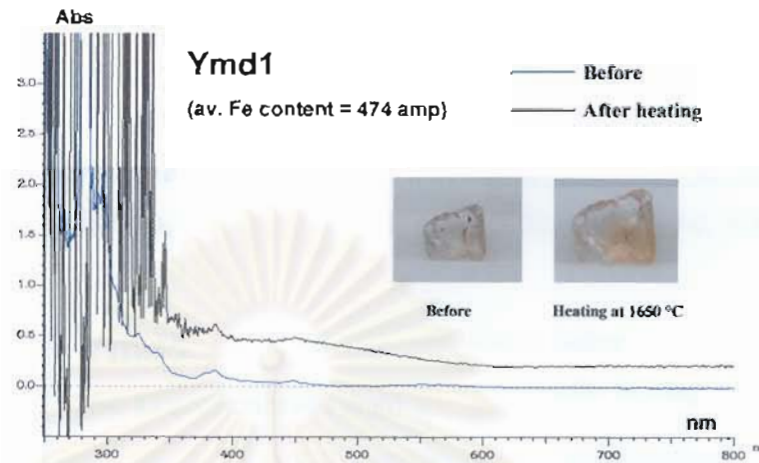
รูปที่ 5.14 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd7 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไปทาง UV (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.13)



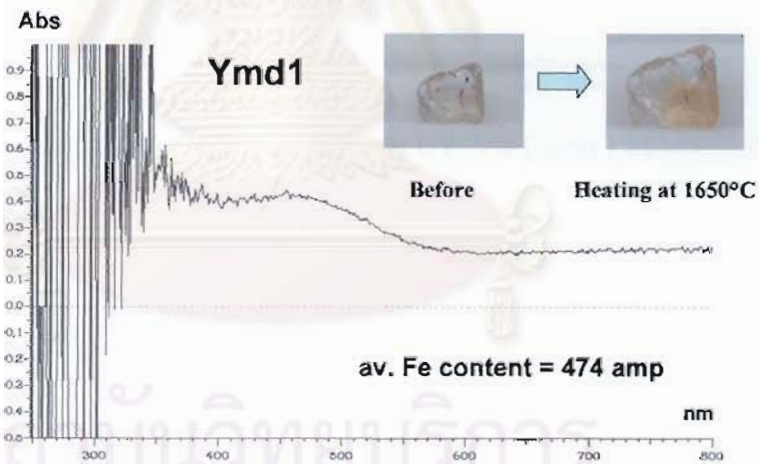
รูปที่ 5.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd6 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผายก (เส้นสีดำ)



รูปที่ 5.16 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd6 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทาง UV และไหลที่ประมาณ 460 nm (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.15)



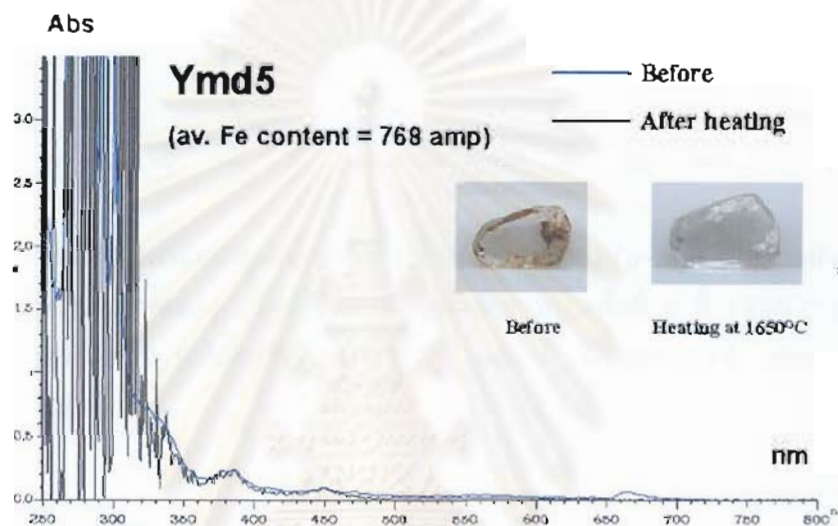
รูปที่ 5.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd1 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่สามที่ 1650 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต peaks ที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm เริ่มปรากฏให้เห็นบ้างเล็กน้อย



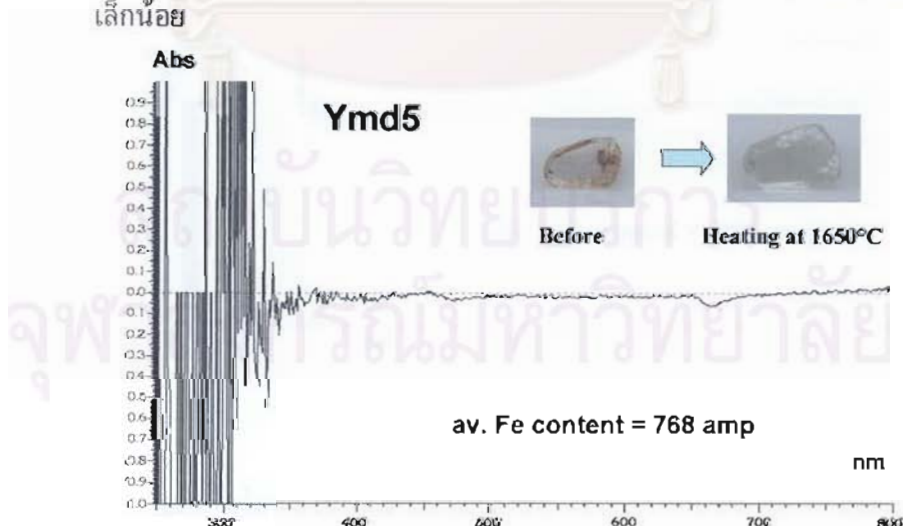
รูปที่ 5.18 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd1 ที่มีการยกตัวสูงขึ้นเล็กน้อยไปทาง UV (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สาม ในรูปที่ 5.17)

สำหรับสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของพลอยตัวอย่างอื่นๆ อีก 9 ตัวอย่าง ที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลางถึงสูง พบการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏเด่นชัดขึ้นและสูงขึ้นในตัวอย่างพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กมากขึ้นตามลำดับตามคาด (รูปที่ 5.19, 5.21, 5.23, 5.25, 5.27, 5.29, 5.31, 5.33, 5.35) เมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่น

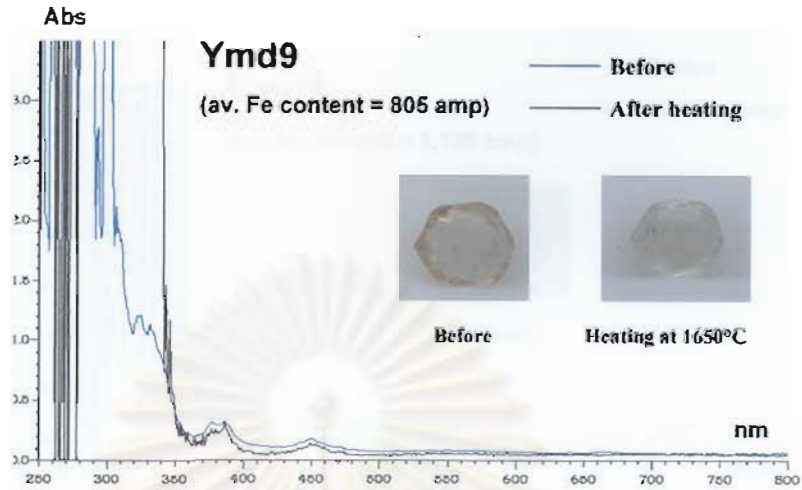
แสง ของพลอยก่อนและหลังการเผา ในแต่ละตัวอย่าง (เนื่องจากการเผาทั้ง 3 ครั้งได้ผลคล้ายคลึงกัน จึงจัดแสดงเฉพาะการเผาครั้งที่สามที่อุณหภูมิ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งพลอยเม็ดดังกล่าวได้ถูกเผามาแล้วที่อุณหภูมิ 1,650°C รวมกันถึง 44 ชั่วโมง) พบว่า แทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงหลังเผาเลย (รูปที่ 5.22 ถึง 5.48) ดังนั้นเมื่อทำการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนของพลอยก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนของพลอยหลังเผาในแต่ละเม็ด พบว่าสเปกตรัมที่เหลือที่เกิดจากการเผา ค่อนข้างราบเรียบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 5.20, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30, 5.32, 5.34, 5.36)



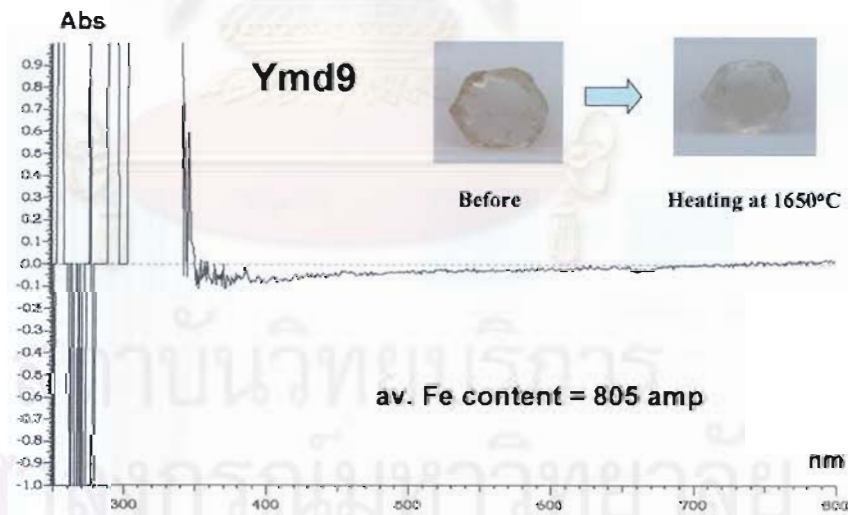
รูปที่ 5.19 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd5 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นเล็กน้อย



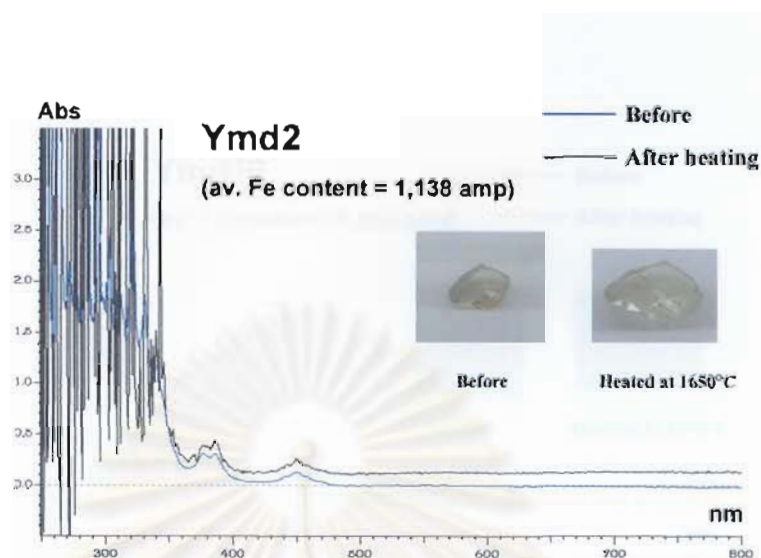
รูปที่ 5.20 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd5 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.19



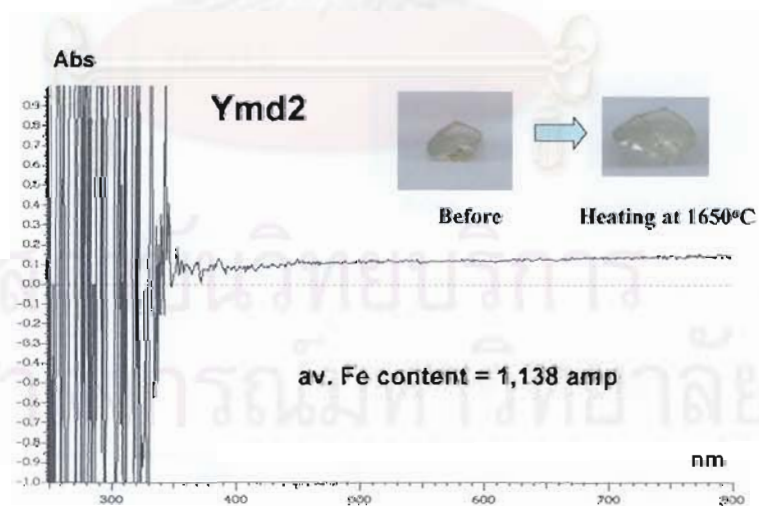
รูปที่ 5.21 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd9 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผายก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe³⁺ peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



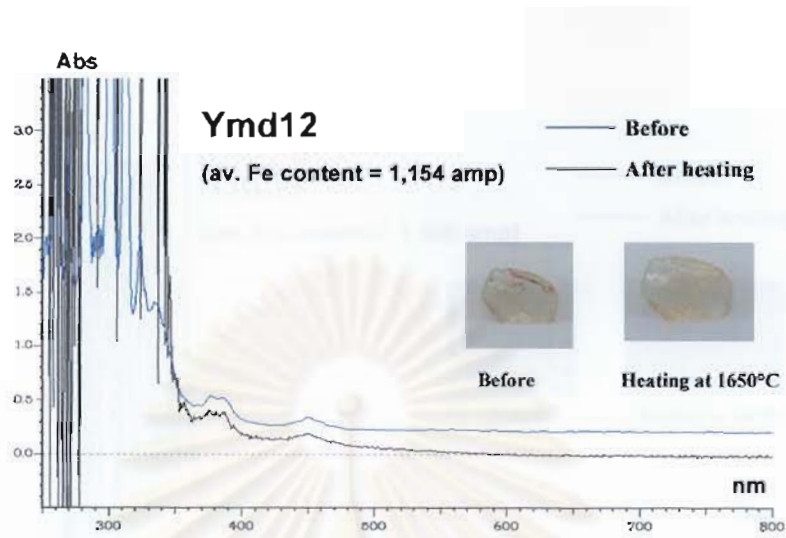
รูปที่ 5.22 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd9 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.21



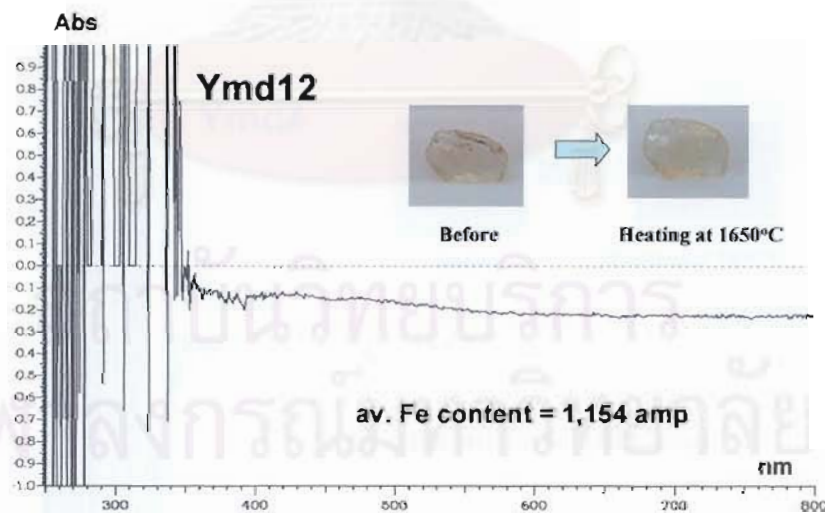
รูปที่ 5.23 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd2 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



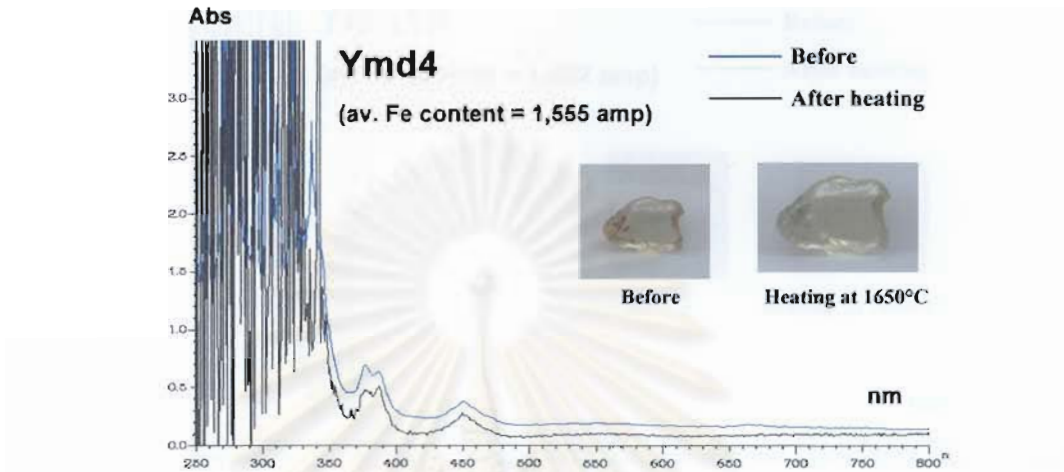
รูปที่ 5.24 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd2 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.23



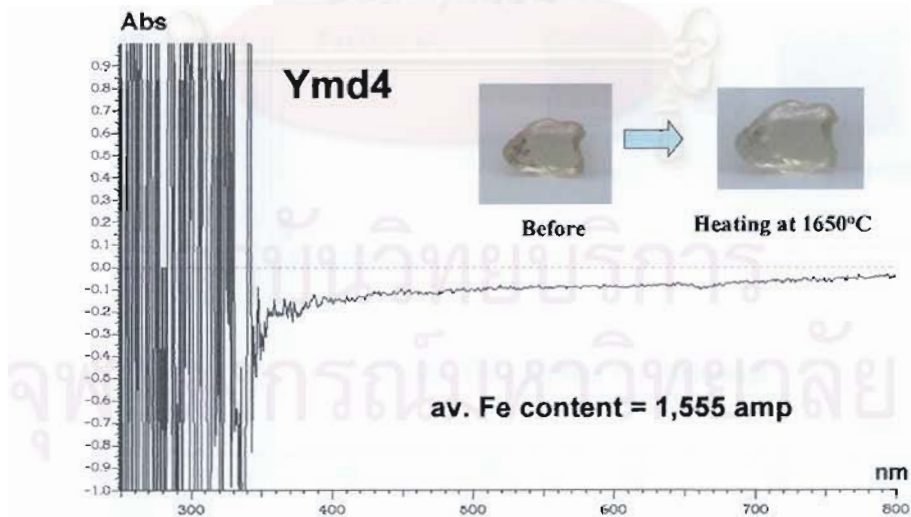
รูปที่ 5.25 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd12 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



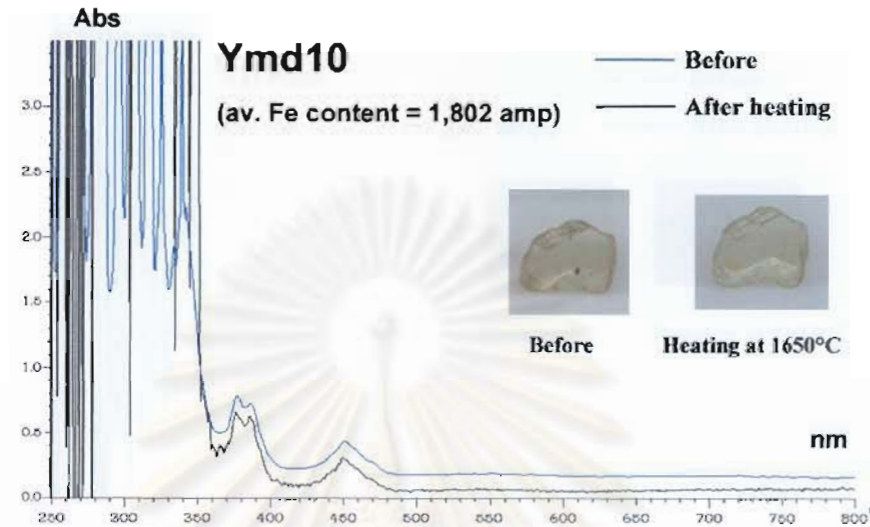
รูปที่ 5.26 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบ ของตัวอย่าง Ymd12 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.25



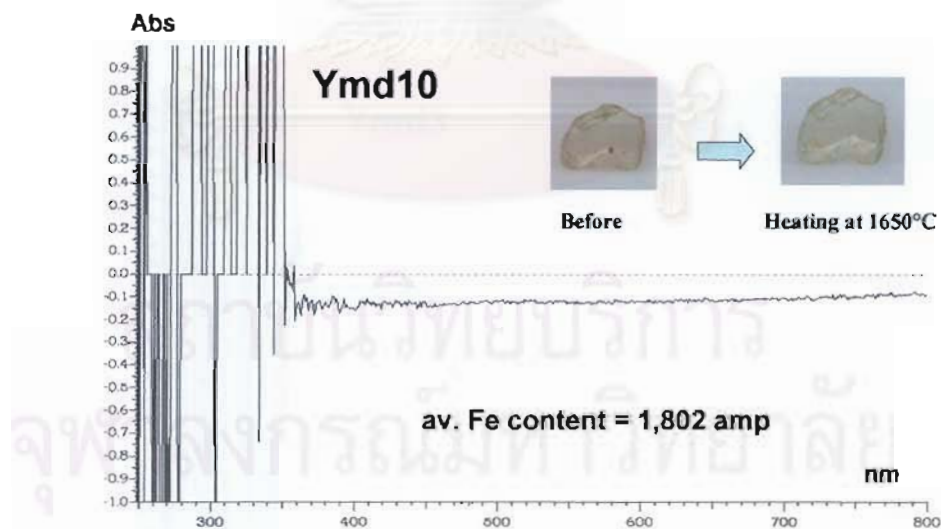
รูปที่ 5.27 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd4 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผายก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดมากขึ้น



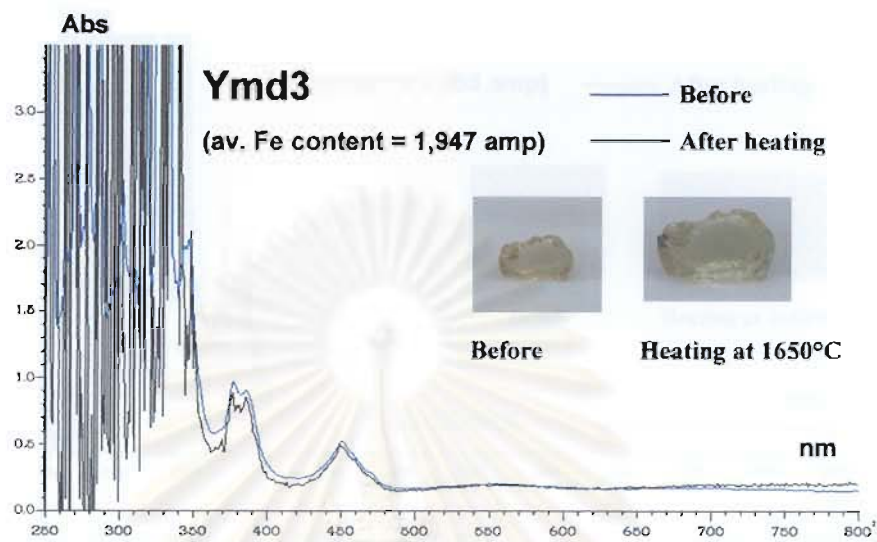
รูปที่ 5.28 แสดงสเปกตรัมที่เกิดจากการเผาของตัวอย่าง Ymd4 ที่ค่อนข้างราบเรียบ (ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.27



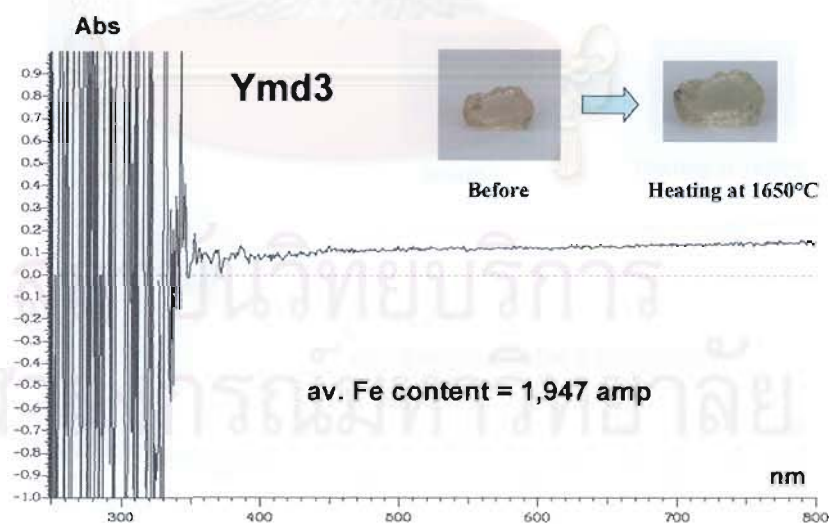
รูปที่ 5.29 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd10 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



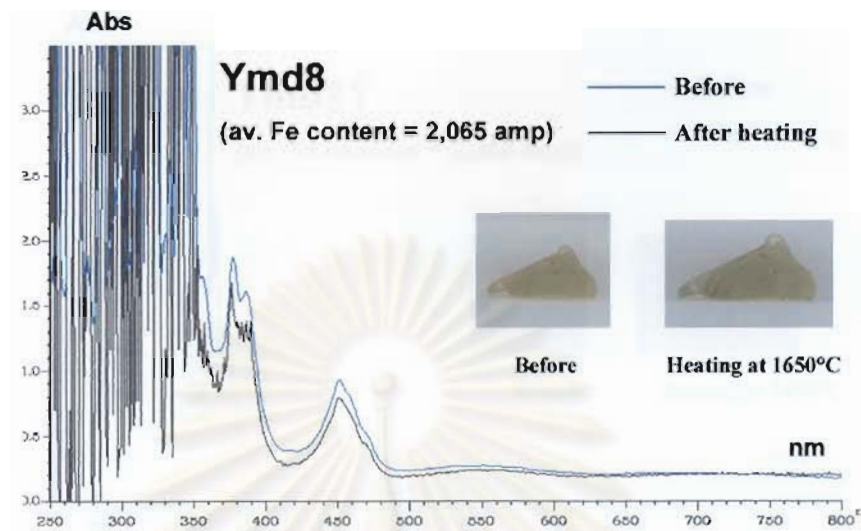
รูปที่ 5.30 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd10 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.29



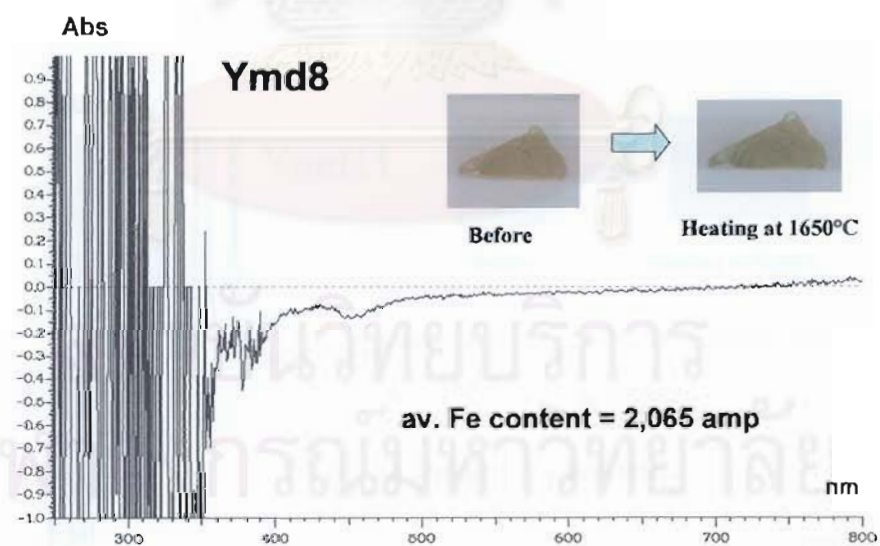
รูปที่ 5.31 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd3 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ด้วยวิธีแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



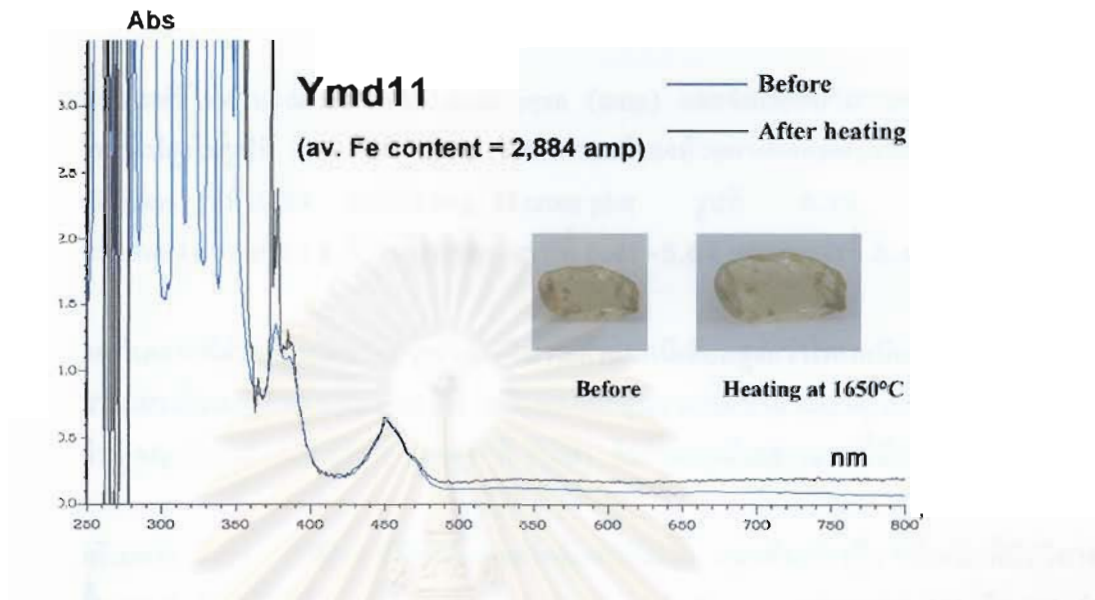
รูปที่ 5.32 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd3 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.31



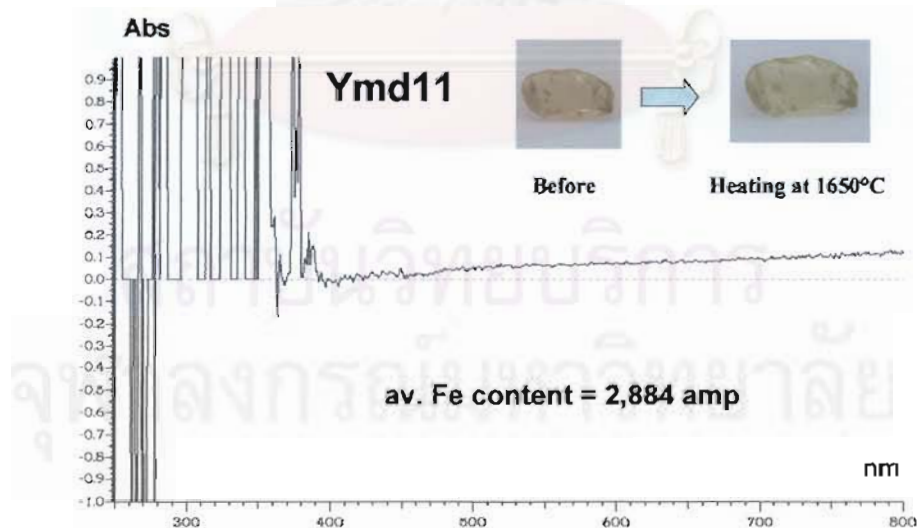
รูปที่ 5.33 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd8 ที่ทำการวัดก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดมาก



รูปที่ 5.34 แสดงสเปกตรัมของตัวอย่าง Ymd8 ที่ได้จากการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.33 negative peak ที่ 450 nm น่าจะเกิดจาก error ของการวัด



รูปที่ 5.35 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-ray) ของตัวอย่าง Ymd11 ที่ทำวัด ก่อนทดลอง (เส้นสีน้ำเงิน) และหลังการเผาครั้งที่ 3 ที่ 1650°C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงด้วยวิธีเผาแยก (เส้นสีดำ) สังเกต Fe^{3+} peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ปรากฏให้เห็นชัดเจน



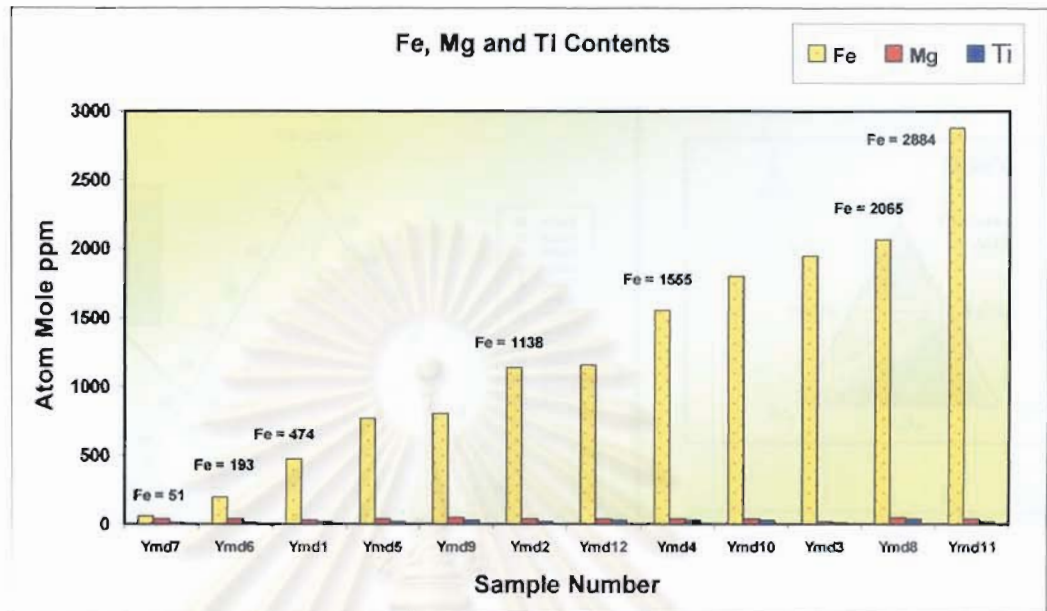
รูปที่ 5.36 แสดงสเปกตรัมที่ค่อนข้างราบเรียบของตัวอย่าง Ymd11 ที่ได้จากการหักกลับสเปกตรัมการดูดกลืนก่อนทดลองออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาครั้งที่สามในรูปที่ 5.35

5.7 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS อย่างละเอียด

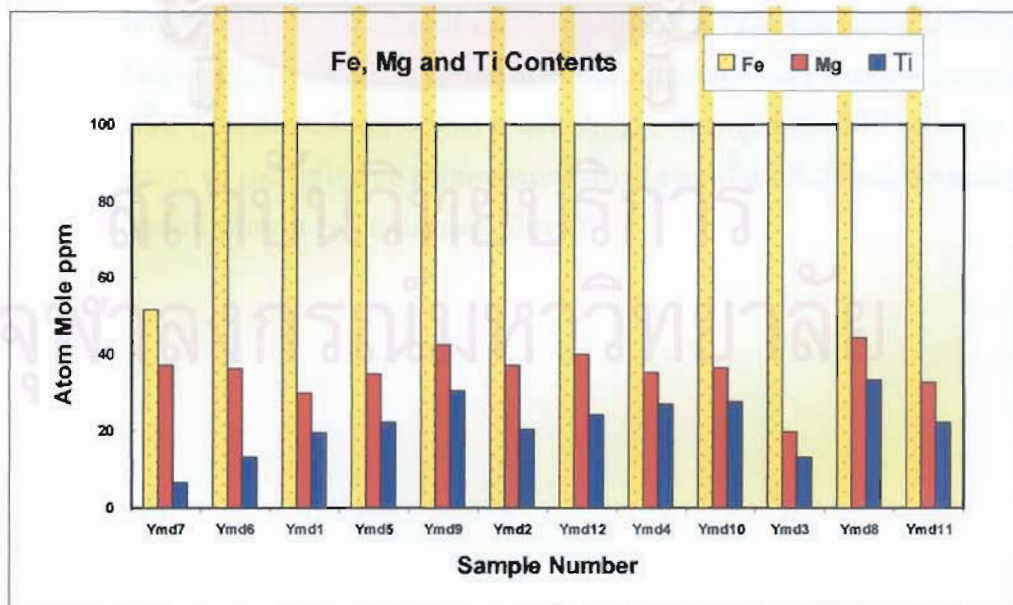
ผลวิเคราะห์ที่ได้คำนวณเป็น atom mole ppm (amp) และจัดเรียงปริมาณค่าเฉลี่ยของธาตุเหล็กตามลำดับจากต่ำไปสูงในรูปที่ 5.37 และ 5.38 ผลวิเคราะห์ของตัวอย่างทั้งหมดได้จัดแสดงในสามเหลี่ยม Mg-Ti-Fe diagram รูปที่ 5.39 และใน Mg-Ti cross plot รูปที่ 5.40 ส่วนรายละเอียดการวิเคราะห์แต่ละจุดของพลอยทั้ง 12 ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5.41-5.64 และตารางที่ 5.4-5.15

จากผลวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด พบว่ามีปริมาณค่าแมกนีเซียมสูงกว่าไทเทเนียมเกือบทุกจุด (Mg > Ti) โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลอยสองตัวอย่างแรก หรือพลอยกลุ่มแรกที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ (Ymd6 และ Ymd7) พบว่ามี Mg:Ti ratio มากกว่า 2:1 (ดูรูปที่ 5.40) ซึ่งทั้งสองตัวอย่างแรกนี้มีการเปลี่ยนสีหลังเผาที่เด่นชัด

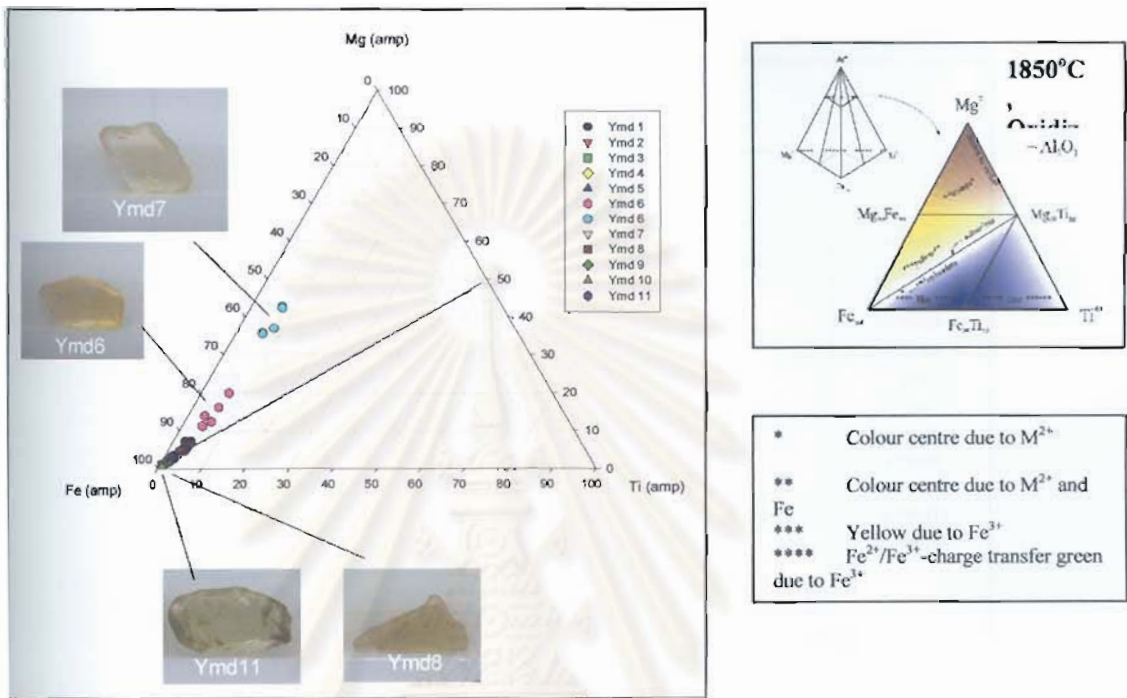
ส่วนตัวอย่าง Ymd1 ที่มีการเปลี่ยนสีหลังเผาเพียงบางส่วน และตัวอย่างอื่นๆที่เหลือที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงขึ้นไปตามลำดับแต่ไม่มีการเปลี่ยนสีหลังเผา พบว่ามี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 2:1 (ดูรูปที่ 5.40)



รูปที่ 5.37 กราฟแท่งแสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณธาตุ เหล็ก แมกนีเซียม และไทเทเนียม ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จำนวน 5 จุดบนพลอยแซปไฟร์แต่ละตัวอย่าง (ดูรายละเอียดตำแหน่งและผลวิเคราะห์ในรูป 5.41-5.64 ตารางที่ 5.4 - 5.15) รวมทั้งหมด 12 ตัวอย่าง จากแหล่งพลอย อีลากากา ประเทศมาดากัสการ์ โดยเรียงลำดับจากตัวอย่างที่มีปริมาณธาตุเหล็กน้อยไปมากตามลำดับ

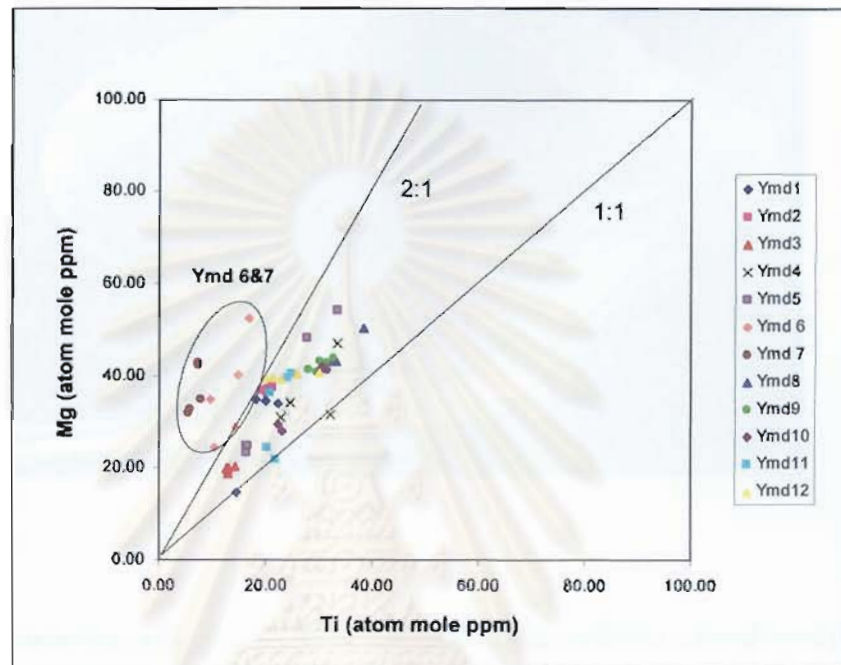


รูปที่ 5.38 แสดงส่วนขยายของรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.39 แสดงผลวิเคราะห์ของตัวอย่างทั้งหมดใน Model ของ Häger (1992, 2001) จะเห็นว่า ตัวอย่าง Ymd6 และ Ymd7 ของกลุ่มที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ มีสีเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผาที่เกิดจากศูนย์กลางสี่ที่เสถียร (ตกอยู่ในพื้นที่สีเหลืองของ Model ทางขวา) ในขณะที่ตัวอย่างอื่นๆ โดยเฉพาะตัวอย่าง Ymd 8 และ Ymd11 ของกลุ่มที่สองที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงมาก จะ plot อยู่ใกล้ปลายยอดของเหล็กในรูปแบบสามเหลี่ยม สีเหลืองอ่อนของสองตัวอย่างหลังนี้ เกิดจาก Fe^{3+} transitions เป็นหลัก

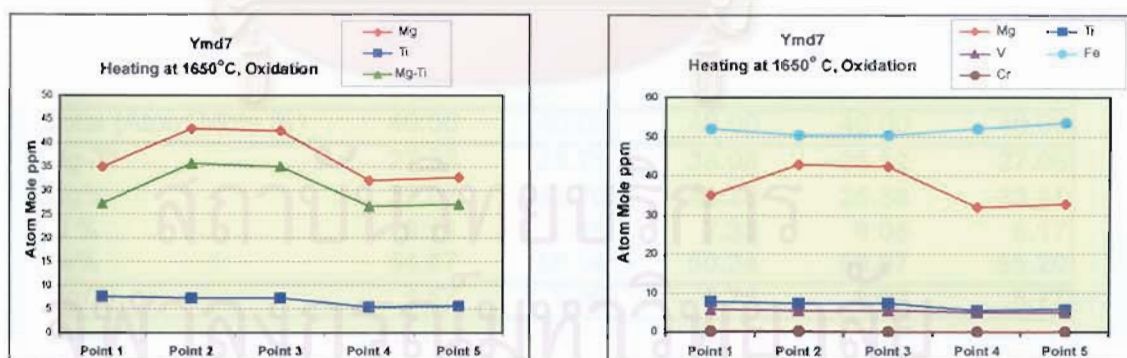
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.40 แสดง Mg -Ti cross plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จำนวน 5 จุดบนพลอยแซปไฟร์แต่ละตัวอย่าง ทั้งหมด 12 ตัวอย่าง จากแหล่งอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ พบว่าผลวิเคราะห์เกือบทุกจุดมี Mg:Ti มากกว่า 1:1 โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่าง Ymd6 และ Ymd7 ซึ่งเป็นพลอยที่มีปริมาณค่าเหล็กต่ำสุดและเผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล มี Mg:Ti มากกว่าประมาณ 2:1 ส่วนตัวอย่างอื่นๆ ที่มี Mg:Ti อยู่ระหว่าง 1:1 และ 2:1 เผาแล้วไม่ได้สีเหลืองที่เด่นชัด แสดงว่าพลอยที่เผาแล้วได้สีเหลืองที่เกิดศูนย์กึ่งแสงสีที่เสถียร น่าจะต้องมี Mg:Ti ratio มากกว่าประมาณ 2:1 จึงได้ผลดี



รูปที่ 5.41 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd7 เผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

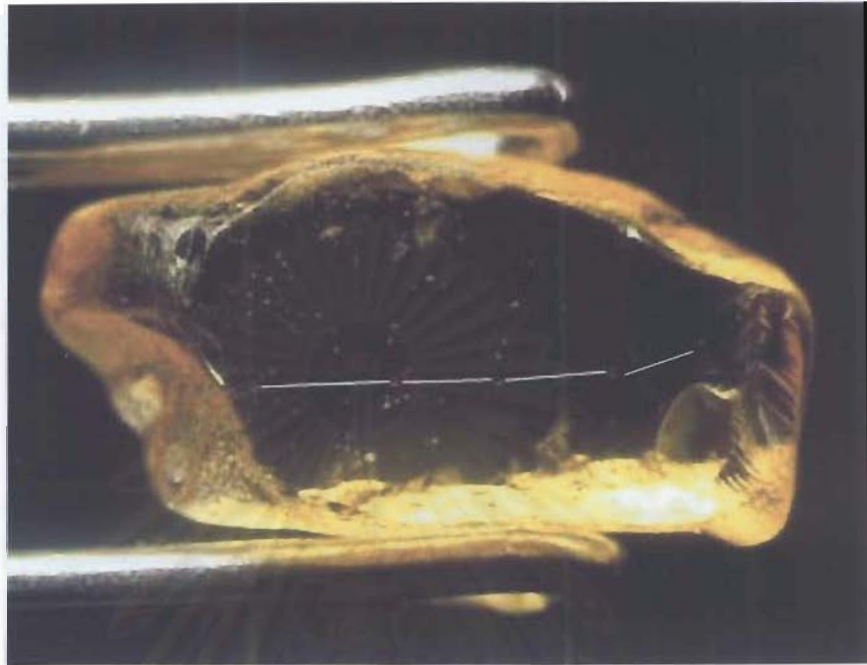


รูปที่ 5.42 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd7 ในรูปที่ 5.41 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ต่ำมาก (เฉลี่ย 51.6 amp) และ Mg>Ti มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (เฉลี่ย 30.4 amp)

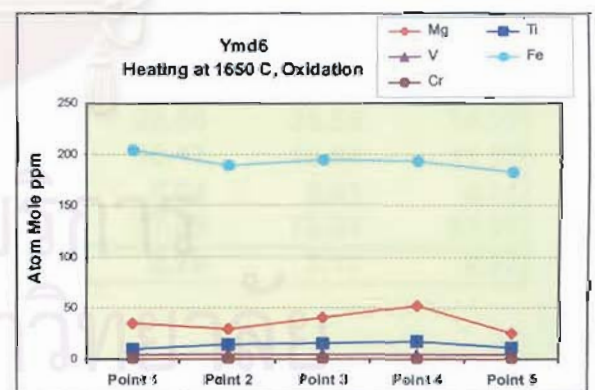
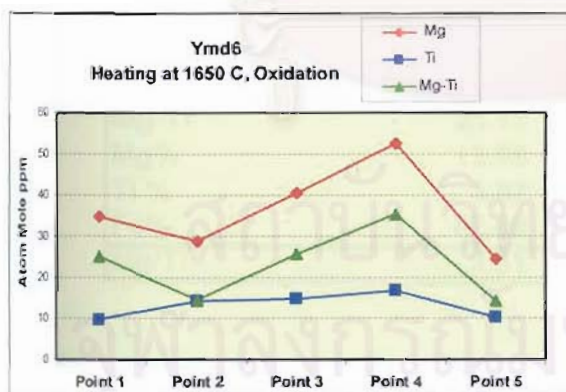
ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd7 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd7	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.162	<0.178	<0.150	<0.164	<0.147
Na	<1.62	<1.83	<1.52	<1.54	<1.31
Mg	41.77	51.15	50.58	38.17	39.03
Al	529250.4	529250.4	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	18.02	16.9	17.26	12.68	13.33
V	5.7	5.56	5.42	4.88	4.98
Cr	0.54	0.6	<0.50	<0.47	<0.40
Mn	<0.134	<0.150	<0.123	<0.123	<0.105
Fe	142.23	138.02	138.21	141.97	146.49
Ga	83.71	87.04	86.01	83.95	83.84
Total %	52.95	52.95	52.95	52.95	52.95
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	35.03	42.90	42.42	32.01	32.74
Al	399878.42	399871.62	399872.47	399884.27	399881.62
Ti	7.67	7.19	7.35	5.40	5.67
V	2.28	2.22	2.17	1.95	1.99
Cr	0.21	0.24	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	51.91	50.38	50.45	51.82	53.47
Ga	24.48	25.45	25.15	24.55	24.51
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	27.36	35.71	35.08	26.62	27.06
Mg%	37.03	42.70	42.33	35.88	35.63
Ti %	8.11	7.16	7.33	6.05	6.17
Fe%	54.87	50.14	50.34	58.07	58.20
Mg/Ti	4.57	5.96	5.78	5.93	5.77

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.43 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd6 เผาแล้วได้สีเหลืองแกมน้ำตาล แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS ตัวอย่างนี้มีความหนามากกว่า Ymd7 จึงปรากฏเหมือนสีเข้มกว่า Ymd7

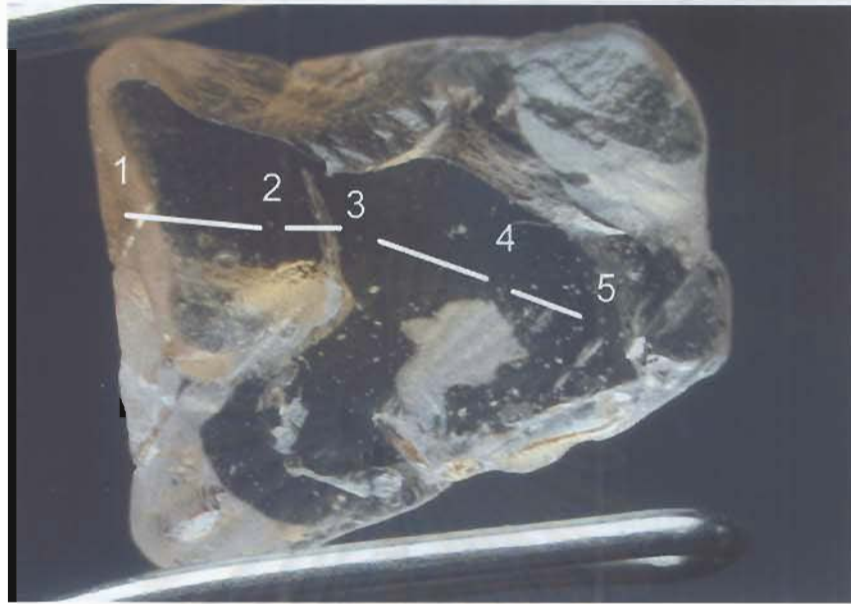


รูปที่ 5.44 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd6 ในรูปที่ 5.43 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ต่ำ (เฉลี่ย 193.2 amp) และ Mg>Ti มากตรงทุกจุดที่ทำการวิเคราะห์ (เฉลี่ย 23.0 amp)

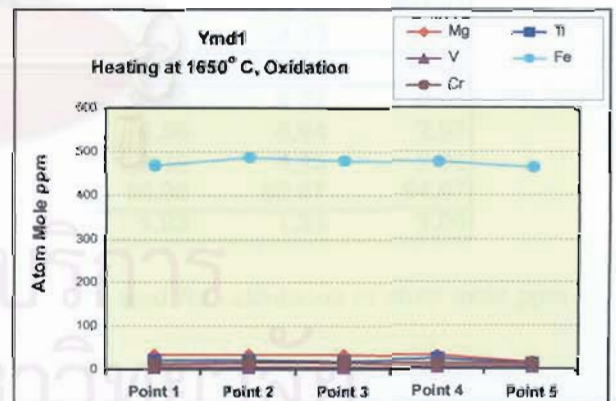
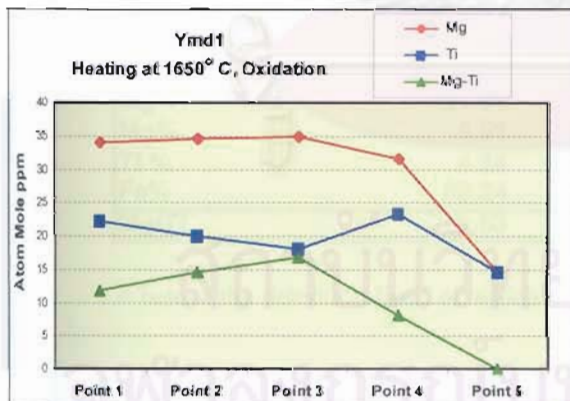
ตารางที่ 5.5 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd6 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่ามากกว่า 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd6	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	0.174	<0.236	<0.207	<0.214	<0.160
Na	<1.37	<2.03	<1.85	<1.64	<1.27
Mg	41.55	34.53	48.24	62.57	29.31
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.4	529250.38
Ti	22.69	33.55	34.95	39.74	24.35
V	3.96	4.25	4.63	4.6	4.69
Cr	<0.39	<0.56	<0.51	<0.47	<0.37
Mn	0.383	<0.149	0.151	<0.122	<0.095
Fe	561.24	520.1	533.92	530.83	501.43
Ga	66.05	67.94	68.77	67.73	69.12
Total %	52.99	52.99	52.99	53.00	52.99
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	34.84	28.95	40.44	52.46	24.58
Al	399729.31	399745.45	399727.88	399715.33	399760.02
Ti	9.65	14.27	14.87	16.91	10.36
V	1.58	1.70	1.85	1.84	1.88
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.14	0.00	0.06	0.00	0.00
Fe	204.77	189.77	194.80	193.67	182.96
Ga	19.30	19.86	20.10	19.79	20.20
Total (Atom Mole %	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	25.18	14.68	25.58	35.55	14.22
Mg%	13.98	12.43	16.17	19.94	11.28
Ti %	3.87	6.13	5.94	6.43	4.75
Fe%	82.02	81.45	77.89	73.63	83.97
Mg/Ti	3.61	2.03	2.72	3.10	2.37

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.45 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd1 เมาแล้ว แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS จุดที่ 1-3 อยู่บนส่วนที่เกิดสีเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผา จุดที่ 4-5 อยู่บนส่วนที่ไร้สีหลังเผา



รูปที่ 5.46 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd1 ในรูปที่ 5.45 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างต่ำ (เฉลี่ย 474.3 amp) และ Mg>Ti มากตรงจุดที่ 1-3 น้อยลงตรงจุดที่ 4 และเกือบเท่ากันตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 10.8 amp)

ตารางที่ 5.6 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd1 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์ โดยที่จุดที่ 1-3 มีค่าใกล้ 2 ส่วนจุดที่ 4 และ 5 มีค่าใกล้ 1

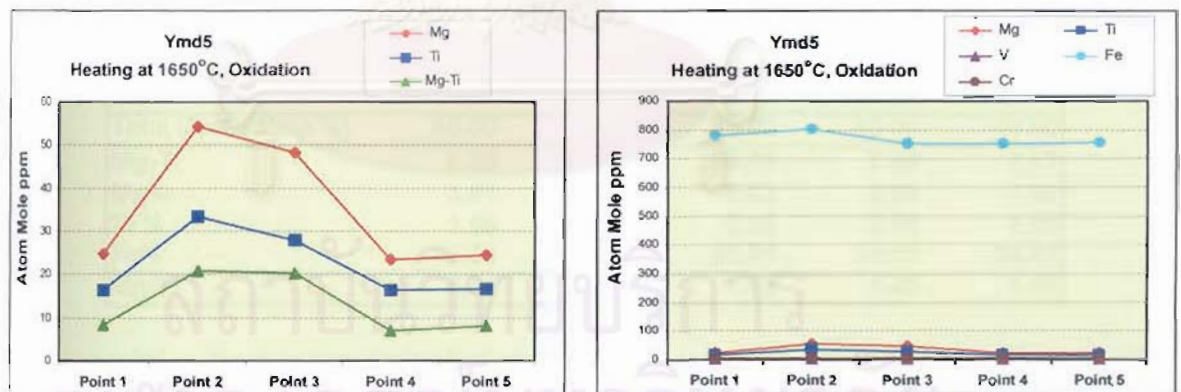
Ymd1	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.146	<0.150	<0.184	<0.165	<0.150
Na	<1.36	1.89	<1.68	<1.52	<1.35
Mg	40.79	41.22	41.67	37.68	17.38
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	52.38	47.03	42.48	54.92	34.18
V	6.1	5.9	6.29	5.9	5.74
Cr	35.51	37.41	37.94	34.7	33.57
Mn	<0.095	<0.098	<0.117	0.161	0.111
Fe	1284.18	1333.14	1314.42	1307.72	1265.44
Ga	76.48	76.1	79.06	77.83	75.71
Total %	53.07	53.08	53.08	53.08	53.07
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	1.67	0.00	0.00	0.00
Mg	34.17	34.53	34.91	31.57	14.56
Al	399436.68	399418.54	399427.36	399429.58	399471.90
Ti	22.27	19.99	18.06	23.35	14.53
V	2.44	2.36	2.51	2.36	2.29
Cr	13.91	14.65	14.86	13.59	13.15
Mn	0.00	0.00	0.00	0.06	0.04
Fe	468.20	486.03	479.21	476.77	461.41
Ga	22.34	22.22	23.09	22.73	22.11
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	11.91	14.54	16.85	8.22	0.03
Mg%	6.51	6.39	6.56	5.94	2.97
Ti %	4.24	3.70	3.39	4.39	2.96
Fe%	89.24	89.91	90.05	89.67	94.07
Mg/Ti	1.53	1.73	1.93	1.35	1.00

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

จุฬาลง



รูปที่ 5.47 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd5 เเผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.48 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd5 ในรูปที่ 5.47 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 768.4 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 12.9 amp)

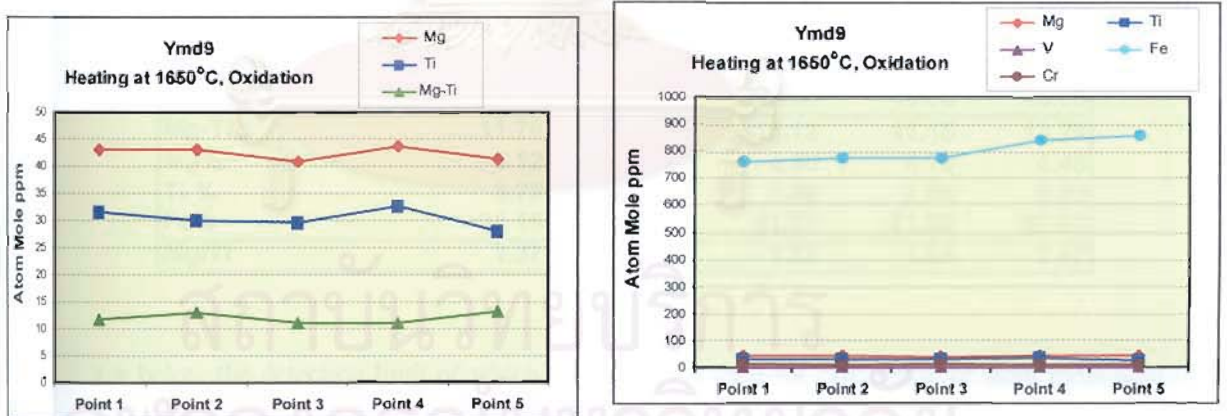
ตารางที่ 5.7 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd5 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd5	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.181	<0.140	<0.152	<0.177	<0.180
Na	<1.44	<1.20	<1.31	<1.39	<1.41
Mg	29.49	64.89	57.61	27.96	29.44
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	38.49	78.9	65.57	38.5	39.25
V	3.71	3.98	3.56	3.79	3.75
Cr	13.85	12.64	12.35	13.27	13.27
Mn	<0.104	<0.085	0.211	<0.101	0.137
Fe	2139.66	2200.49	2064.16	2067.29	2073.6
Ga	83.2	80.54	77.07	79.57	79.82
Total %	53.16	53.17	53.15	53.15	53.15
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	24.69	54.32	48.23	23.41	24.65
Al	399148.24	399080.57	399143.07	399177.08	399173.12
Ti	16.35	33.51	27.85	16.36	16.67
V	1.48	1.59	1.42	1.51	1.50
Cr	5.42	4.95	4.83	5.19	5.19
Mn	0.00	0.00	0.08	0.00	0.05
Fe	779.54	801.56	752.02	753.22	755.52
Ga	24.28	23.50	22.49	23.22	23.30
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	8.34	20.80	20.38	7.05	7.97
Mg%	3.01	6.11	5.82	2.95	3.09
Ti %	1.99	3.77	3.36	2.06	2.09
Fe%	95.00	90.13	90.81	94.99	94.81
Mg/Ti	1.51	1.62	1.73	1.43	1.48

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.49 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd9 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.50 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd9 ในรูปที่ 5.49 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 805.3 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 12.1 amp)

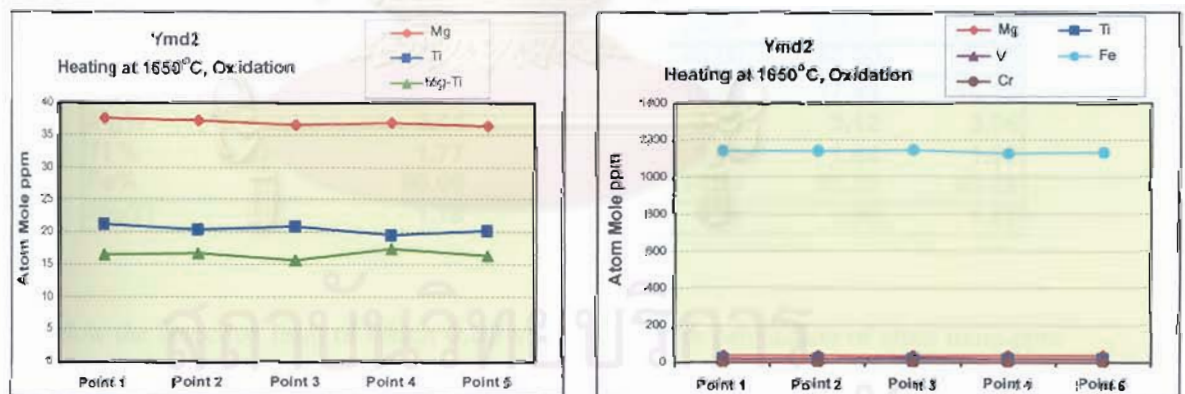
ตารางที่ 5.8 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd9 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd9	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.145	<0.172	<0.137	<0.128	<0.131
Na	<1.36	<1.61	1.80	<1.15	<1.26
Mg	51.50	51.54	48.70	52.30	49.40
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	73.96	70.67	69.81	76.83	66.07
V	0.76	0.76	0.75	0.82	0.72
Cr	29.16	20.02	31.09	25.07	26.81
Mn	0.64	0.73	0.65	0.63	0.67
Fe	2106.99	2134.98	2138.76	2312.64	2359.70
Ga	46.96	47.33	43.31	44.21	44.48
Total %	53.16	53.16	53.16	53.18	53.18
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	43.11	43.15	40.77	43.77	41.35
Al	399132.21	399126.83	399125.07	399057.96	399047.11
Ti	31.42	30.02	29.65	32.63	28.06
V	0.30	0.30	0.30	0.33	0.29
Cr	11.41	7.83	12.17	9.81	10.49
Mn	0.24	0.27	0.24	0.23	0.25
Fe	767.60	777.79	779.16	842.37	859.49
Ga	13.70	13.81	12.64	12.90	12.98
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	11.70	13.13	11.12	11.15	13.29
Mg%	5.12	5.07	4.80	4.76	4.45
Ti %	3.73	3.53	3.49	3.55	3.02
Fe%	91.15	91.40	91.71	91.68	92.53
Mg/Ti	1.37	1.44	1.37	1.34	1.47

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.51 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd2 เเผแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.52 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd2 ในรูปที่ 5.51 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 1137.8 ppm) และ Mg-Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 16.5 ppm)

ตารางที่ 5.9 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd2 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โพรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

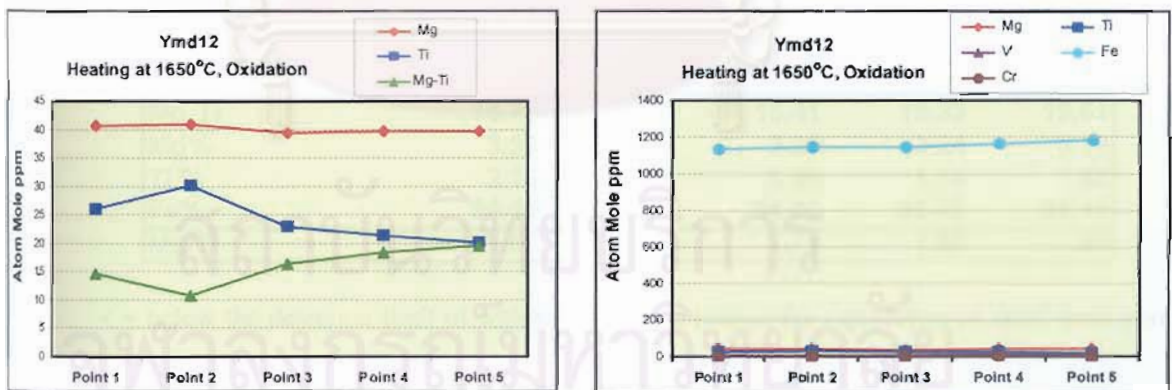
Ymd2	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.135	<0.181	<0.191	0.24	<0.146
Na	<1.18	<1.62	<1.62	<1.20	<1.35
Mg	44.97	44.45	43.60	44.11	43.54
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	49.89	48.06	49.05	45.80	47.42
V	21.11	20.75	21.22	20.26	21.17
Cr	4.89	5.45	5.92	6.03	6.46
Mn	<0.084	<0.115	<0.114	0.15	<0.097
Fe	3127.55	3135.57	3151.01	3097.85	3118.66
Ga	100.27	102.06	101.43	99.50	99.04
Total %	53.26	53.26	53.26	53.26	53.26
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	37.61	37.18	36.47	36.89	36.42
Al	398763.29	398760.99	398755.49	398776.03	398768.48
Ti	21.17	20.40	20.82	19.44	20.12
V	8.42	8.28	8.47	8.09	8.45
Cr	1.91	2.13	2.31	2.36	2.53
Mn	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
Fe	1138.35	1141.27	1146.87	1127.58	1135.13
Ga	29.24	29.76	29.57	29.01	28.88
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	16.44	16.78	15.65	17.46	16.29
Mg%	3.14	3.10	3.03	3.12	3.06
Ti %	1.77	1.70	1.73	1.64	1.69
Fe%	95.09	95.20	95.24	95.20	95.26
Mg/Ti	1.78	1.82	1.75	1.90	1.81

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.53 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd12 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.54 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd12 ในรูปที่ 5.53 สังเกตปริมาณธาตุหลักที่ค่อนข้างสูง (เฉลี่ย 1154.3 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 16.0 amp)

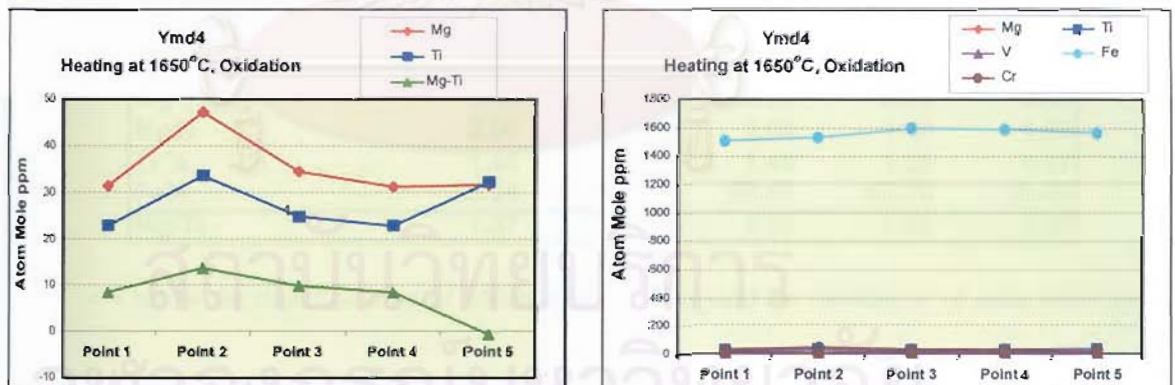
ตารางที่ 5.10 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd12 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd12	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.133	<0.141	<0.155	<0.147	<0.181
Na	<1.19	<1.23	1.63	<1.27	<1.63
Mg	48.65	48.86	47.08	47.40	47.47
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	61.20	70.80	54.11	50.23	47.35
V	8.31	7.99	7.96	9.14	8.41
Cr	21.78	21.46	21.89	22.94	22.23
Mn	0.14	0.25	0.19	0.50	0.16
Fe	3116.92	3138.92	3153.85	3198.01	3250.49
Ga	103.22	103.19	103.67	105.94	107.68
Total %	53.26	53.26	53.26	53.27	53.27
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	40.69	40.86	39.37	39.64	39.70
Al	398756.90	398744.90	398747.75	398731.45	398713.76
Ti	25.97	30.05	22.96	21.32	20.09
V	3.32	3.19	3.18	3.65	3.36
Cr	8.51	8.39	8.56	8.97	8.69
Mn	0.05	0.09	0.07	0.18	0.06
Fe	1134.47	1142.44	1147.88	1163.91	1182.95
Ga	30.10	30.09	30.23	30.89	31.39
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	14.72	10.82	16.41	18.33	19.61
Mg%	3.39	3.37	3.25	3.24	3.19
Ti %	2.16	2.48	1.90	1.74	1.62
Fe%	94.45	94.16	94.85	95.02	95.19
Mg/Ti	1.57	1.36	1.71	1.86	1.98

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.55 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd4 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS

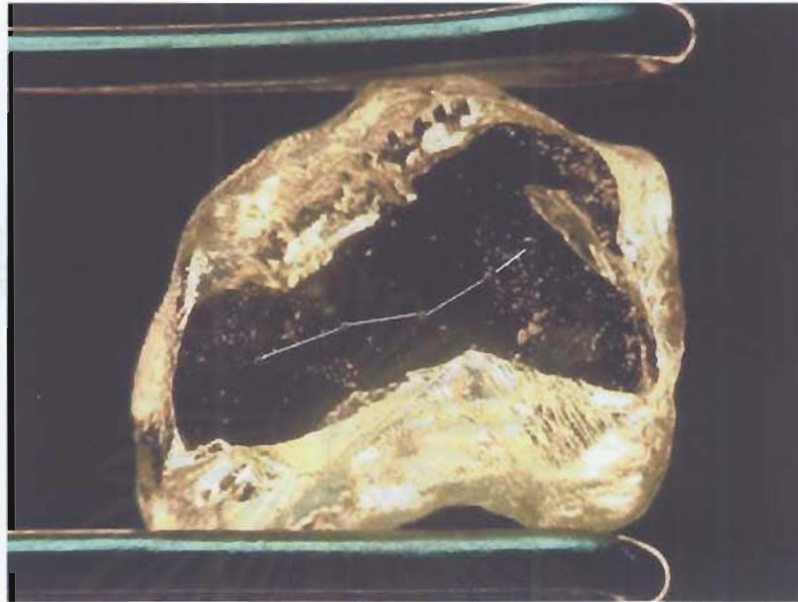


รูปที่ 5.56 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd4 ในรูปที่ 5.55 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูง (เฉลี่ย 1555.3 amp) และ Mg>Ti ที่จุด 1-4 และเกือบเท่ากันตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 7.9 amp)

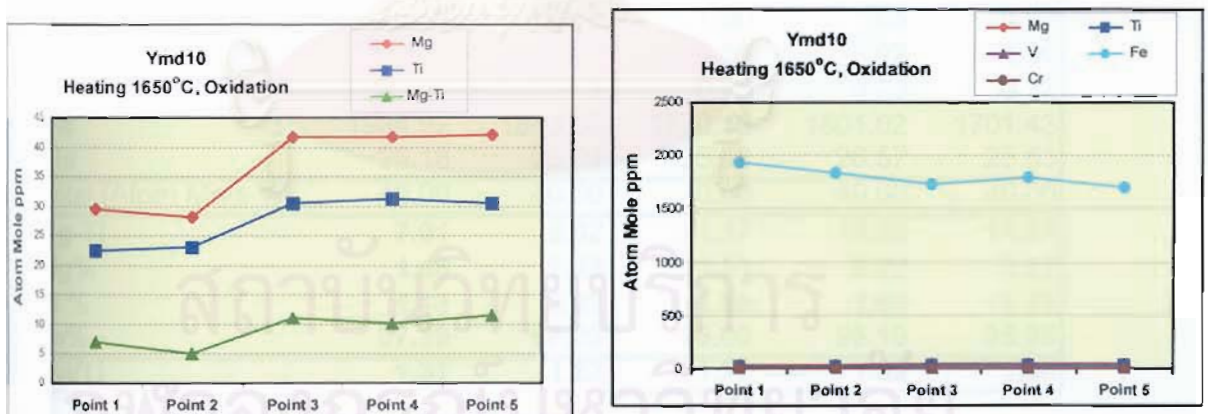
ตารางที่ 5.11 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd4 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โพรตสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd4	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.193	<0.181	<0.180	<0.183	<0.182
Na	<1.66	<1.58	<1.51	<1.62	<1.50
Mg	37.47	56.48	41.21	37.15	37.74
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	53.90	78.81	58.25	53.65	75.92
V	1.72	1.71	1.82	1.79	1.88
Cr	31.92	27.54	31.69	37.96	41.45
Mn	<0.117	0.18	0.20	0.19	0.19
Fe	4158.77	4222.67	4383.99	4367.09	4309.76
Ga	55.48	55.30	57.45	57.88	57.34
Total %	53.36	53.37	53.38	53.38	53.38
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	31.31	47.19	34.43	31.04	31.53
Al	398404.19	398356.40	398317.09	398325.98	398335.61
Ti	22.85	33.41	24.69	22.74	32.18
V	0.68	0.68	0.73	0.71	0.75
Cr	12.47	10.76	12.38	14.82	16.19
Mn	0.00	0.07	0.07	0.07	0.07
Fe	1512.33	1535.38	1593.88	1587.77	1566.97
Ga	16.16	16.11	16.73	16.86	16.70
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	8.46	13.78	9.74	8.29	-0.65
Mg%	2.00	2.92	2.08	1.89	1.93
Ti %	1.46	2.07	1.49	1.39	1.97
Fe%	96.54	95.01	96.42	96.72	96.09
Mg/Ti	1.37	1.41	1.39	1.36	0.98

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.57 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd10 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.58 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd10 ในรูปที่ 5.57 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูง (เฉลี่ย 1802.2 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 9.0 amp)

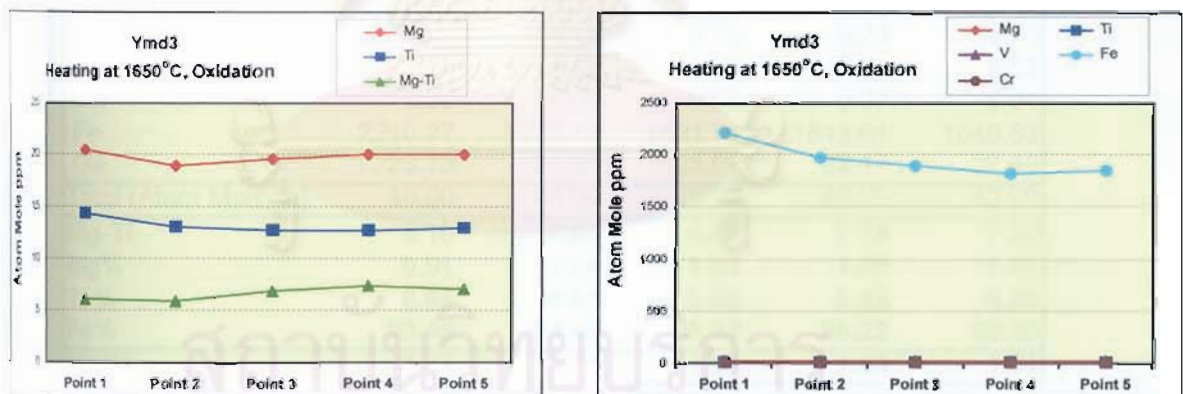
ตารางที่ 5.12 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd10 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โพรตสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd10	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.123	<0.170	<0.156	<0.175	0.18
Na	<1.20	<1.54	<1.36	<1.53	<1.42
Mg	35.31	33.71	49.82	49.87	50.38
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	53.04	54.58	71.83	74.11	72.13
V	2.68	2.68	2.51	2.62	2.32
Cr	13.04	11.45	11.54	10.05	12.71
Mn	0.62	0.58	0.63	0.62	0.61
Fe	5326.51	5073.67	4760.54	4956.49	4681.26
Ga	89.98	92.55	88.22	91.29	87.68
Total %	53.48	53.45	53.42	53.44	53.42
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	29.47	28.15	41.61	41.64	42.08
Al	397980.57	398072.55	398166.41	398094.18	398193.88
Ti	22.47	23.12	30.44	31.40	30.57
V	1.07	1.07	1.00	1.05	0.92
Cr	5.09	4.47	4.50	3.92	4.96
Mn	0.23	0.21	0.23	0.23	0.22
Fe	1934.92	1843.50	1730.13	1801.02	1701.43
Ga	26.18	26.94	25.68	26.57	25.53
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	7.01	5.02	11.17	10.24	11.51
Mg%	1.48	1.49	2.31	2.22	2.37
Ti %	1.13	1.22	1.69	1.68	1.72
Fe%	97.39	97.29	96.00	96.10	95.88
Mg/Ti	1.31	1.22	1.37	1.33	1.38

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.59 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd3 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วย เครื่องมือ LA-ICP-MS

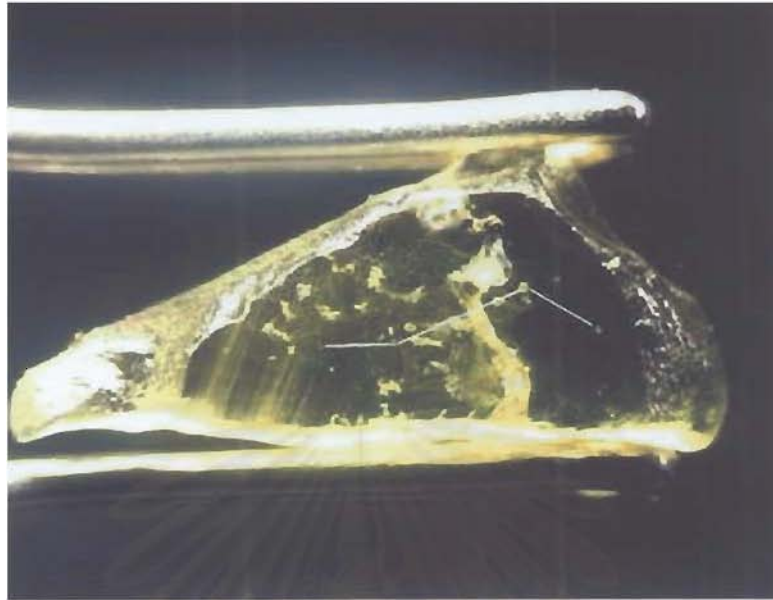


รูปที่ 5.60 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd3 ในรูปที่ 5.59 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูงมาก (เฉลี่ย 1946.9 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 6.6 amp)

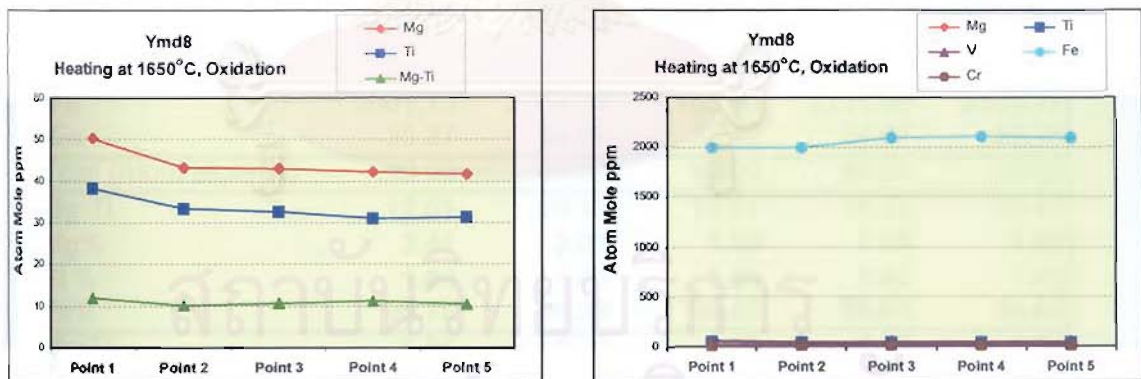
ตารางที่ 5.13 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd3 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โปรดสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd3	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.160	<0.194	<0.202	<0.163	<0.156
Na	<1.26	<1.60	<1.59	<1.53	<1.36
Mg	24.48	22.66	23.42	23.98	23.93
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	33.83	30.82	29.95	29.89	30.59
V	1.95	1.89	1.88	1.84	1.89
Cr	24.69	28.49	29.94	22.05	21.86
Mn	0.24	0.22	0.17	0.18	0.10
Fe	6088.50	5429.32	5206.87	4990.80	5082.10
Ga	81.60	81.27	79.11	76.16	77.23
Total %	53.55	53.48	53.46	53.44	53.45
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	20.42	18.91	19.55	20.02	19.98
Al	397720.76	397960.27	398040.50	398122.12	398088.63
Ti	14.32	13.05	12.69	12.66	12.96
V	0.78	0.75	0.75	0.73	0.75
Cr	9.63	11.12	11.68	8.61	8.53
Mn	0.09	0.08	0.06	0.07	0.04
Fe	2210.27	1972.16	1891.74	1813.61	1846.63
Ga	23.73	23.65	23.02	22.17	22.48
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	6.10	5.86	6.87	7.36	7.02
Mg%	0.91	0.94	1.02	1.08	1.06
Ti %	0.64	0.65	0.66	0.69	0.69
Fe%	98.45	98.40	98.32	98.23	98.25
Mg/Ti	1.43	1.45	1.54	1.58	1.54

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.61 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd8 เผาแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.62 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd8 ในรูปที่ 5.61 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูงมาก (เฉลี่ย 2064.6 amp) และ Mg>Ti ทุกจุด (เฉลี่ย 10.9 amp)

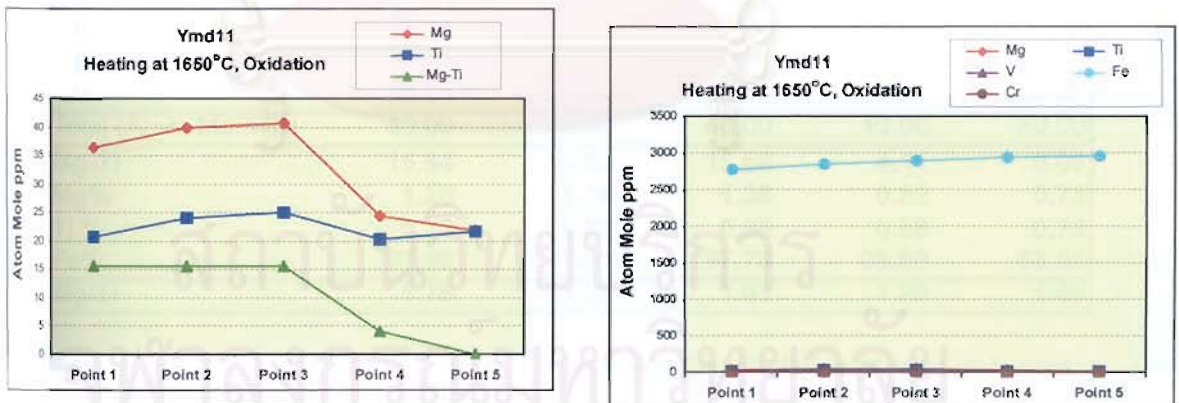
ตารางที่ 5.14 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd8 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โพรตสังเกด Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd8	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.133	0.21	<0.143	<0.133	<0.122
Na	<1.36	<1.22	<1.31	<1.32	<1.20
Mg	60.39	52.00	51.72	50.73	49.96
Al	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38	529250.38
Ti	90.65	78.57	76.86	73.48	73.72
V	2.80	2.58	2.72	2.53	2.49
Cr	40.50	39.93	40.58	39.61	37.73
Mn	1.00	0.81	0.94	0.98	0.79
Fe	5510.48	5519.10	5792.57	5816.05	5792.67
Ga	121.23	119.87	121.78	119.22	110.91
Total %	53.51	53.51	53.53	53.54	53.53
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.46	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	50.39	43.39	43.15	42.32	41.68
Al	397857.55	397866.79	397768.54	397763.49	397775.68
Ti	38.38	33.27	32.54	31.11	31.21
V	1.11	1.03	1.08	1.01	0.99
Cr	15.80	15.58	15.83	15.45	14.71
Mn	0.37	0.30	0.35	0.36	0.29
Fe	2001.13	2004.30	2103.10	2111.60	2103.17
Ga	35.27	34.87	35.42	34.67	32.26
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	12.01	10.12	10.61	11.22	10.47
Mg%	2.41	2.09	1.98	1.94	1.92
Ti %	1.84	1.60	1.49	1.42	1.43
Fe%	95.75	96.29	96.53	96.64	96.65
Mg/Ti	1.31	1.30	1.33	1.36	1.34

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm



รูปที่ 5.63 ภาพขยายของตัวอย่าง Ymd11 เพลแล้วสีเหมือนเดิม แสดงตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ จำนวน 5 จุดด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS



รูปที่ 5.64 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd11 ในรูปที่ 5.63 สังเกตปริมาณธาตุเหล็กที่สูงมาก (เฉลี่ย 2883.5 amp) และ Mg>Ti ตรงจุดที่ 1-3 น้อยลงตรงจุดที่ 4 และเกือบเท่ากันตรงจุดที่ 5 (เฉลี่ย 10.2 amp)

ตารางที่ 5.15 แสดงปริมาณธาตุร่องรอยตรงจุดที่ทำการวิเคราะห์บนตัวอย่าง Ymd11 ด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS โพรตสังเกต Mg/Ti มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ทุกจุดที่วิเคราะห์

Ymd11	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Cations (ppm by weight)					
Be	<0.128	<0.181	<0.161	<0.170	<0.191
Na	<1.17	<1.56	<1.39	<1.51	<1.78
Mg	43.63	47.82	48.88	29.41	26.25
Al	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44	529250.44
Ti	48.97	57.10	59.22	48.24	51.59
V	6.91	7.00	7.17	7.20	6.91
Cr	3.80	3.18	3.04	3.47	5.24
Mn	0.59	0.49	0.56	0.60	0.58
Fe	7663.99	7878.92	7971.51	8113.47	8157.54
Ga	127.22	131.05	134.62	134.75	131.68
Total %	53.71	53.74	53.75	53.76	53.76
Cations (Atom Mole ppm)					
Be	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	36.34	39.82	40.70	24.49	21.86
Al	397123.54	397038.47	397002.34	396971.75	396957.43
Ti	20.70	24.13	25.02	20.38	21.79
V	2.75	2.78	2.85	2.86	2.75
Cr	1.48	1.24	1.18	1.35	2.04
Mn	0.22	0.18	0.21	0.22	0.21
Fe	2778.04	2855.33	2888.63	2939.84	2955.70
Ga	36.94	38.04	39.08	39.11	38.22
Total (Atom Mole %)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
Mg-Ti	15.64	15.69	15.68	4.11	0.06
Mg%	1.28	1.36	1.38	0.82	0.73
Ti %	0.73	0.83	0.85	0.68	0.73
Fe%	97.99	97.81	97.78	98.50	98.54
Mg/Ti	1.76	1.65	1.63	1.20	1.00

< = below the detection limit of which 0.00 value is used for calculation of atom mole ppm

5.8 อภิปรายผล

ผลจากการทดลองเผาผลอยแซปไฟร์อีลาากา ประเทศมาดากัสการ์ ในสภาวะดังกล่าวทั้ง 3 ครั้ง พบว่าได้ผลคล้ายกัน ไม่ว่าจะได้เพิ่มเวลาในการเผาจาก 10 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมง แล้วก็ตาม หรือใช้ทั้งวิธีเผาอบและเผาาก็ได้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก พบว่าผลอย 2 ตัวอย่างแรกที่มีปริมาณค่าเหล็กต่ำสุด (Ymd7 ~51 และ Ymd6 ~193 amp Fe, ตารางที่ 5.3) มีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีสีก่อนเผาเป็นสีเหลืองทอง หรือสีเหลืองแกมน้ำตาลหลังเผา (รูปที่ 5.1 และ 5.2) ในขณะที่ตัวอย่างที่ 3 ที่มีค่าเหล็กสูงชัน (Ymd1 ~474 amp Fe, ตารางที่ 5.3) ผลอยเม็ดนี้แสดงลักษณะที่อยู่กึ่งกลางระหว่างกลุ่มแรกและกลุ่มถัดไป) มีการเปลี่ยนแปลงจากไม่มีสีก่อนเผาเป็นสีเหลืองทองบางบริเวณหลังเผา (รูปที่ 5.3) และสีเหลืองทองที่เกิดขึ้นหลังเผาเป็นสีที่คงทนหลังทำการ fading test สำหรับผลอยตัวอย่างอื่น ๆ ที่เหลืออีก 9 ตัวอย่างที่มีค่าเหล็กปานกลางถึงสูง (Ymd5, 9, 2, 12, 4, 10, 3, 8, 11; Fe ~768 ถึง ~2,863 amp; ตารางที่ 5.3) พบว่าสีแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยหลังเผา (รูปที่ 5.4 ถึง 5.12)

จากการตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของผลอยทั้งสามตัวอย่างแรก ที่มีค่าเหล็กต่ำ และ มีการเปลี่ยนแปลงสีหลังเผาเด่นชัด พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ที่ปรากฏค่อนข้างราบเรียบก่อนทดลอง มีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง หรือไปทาง UV คล้าย ๆ กันหลังเผาทั้งสามครั้ง (รูปที่ 5.13 ถึง 5.18) โดยมีไหล่ที่ประมาณ 460 nm เมื่อทำการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนของผลอยก่อนทดลอง ออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนหลังเผาของแต่ละเม็ด (รูปที่ 5.14, 5.16 และ 5.18) พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้น ที่มีสาเหตุมาจากการเผา เป็นลักษณะการดูดกลืนคลื่นแสง ที่เกิดจากจุดบกพร่อง (defect centres) ของโครงสร้าง Al_2O_3 ที่เรียกว่า ศูนย์กลางสีที่เสถียร ('stable colour centres or trapped hole colour centres') ซึ่งทำให้มีสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลที่เสถียรเพิ่มขึ้นหลังเผา

สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis ของผลอยตัวอย่างอื่น ๆ อีก 9 ตัวอย่าง ที่มีค่าเหล็กปานกลางถึงสูง พบการดูดกลืนคลื่นแสงที่เกิดจาก Fe^{3+} transitions (peaks ที่ ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm) ปรากฏเด่นชัดขึ้นและสูงขึ้นในตัวอย่างผลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กมากขึ้นตามลำดับตั้งแต่ (รูปที่ 5.19, 5.21, 5.23, 5.25, 5.27, 5.29, 5.31, 5.33, 5.35) เมื่อทำการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ของผลอยก่อน และหลังการเผา ของแต่ละตัวอย่าง พบว่า แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังเผาเลย ดังนั้นเมื่อทำการหักลบสเปกตรัมการดูดกลืนของผลอยก่อนทดลอง ออกจากสเปกตรัมการดูดกลืนของผลอยหลังเผาในแต่ละเม็ด พบว่าสเปกตรัมที่เหลือ ที่เกิดจากการเผา ค่อนข้างราบเรียบเป็นเส้นตรง (รูปที่ 5.20, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30, 5.32, 5.34, 5.36) แสดงว่าไม่มีการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis เลย หรือสีไม่เปลี่ยนหลังเผานั้นเอง ถึงแม้ว่าจะเผาผลอยดังกล่าวถึงสามครั้งเป็นเวลา

รวมกันกว่า 44 ชั่วโมงในสภาวะบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม ก็ไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงสี และไม่ปรากฏว่ามีการเปลี่ยนแปลงความสูงของ Fe^{3+} peaks ที่ตำแหน่ง 377, 388, 450 nm ของแต่ละตัวอย่างที่อาจมีสาเหตุมาจากการออกซิเดชันของ Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} เพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงว่าสีเหลืองอ่อนถึงอ่อนมากในตัวอย่างที่มีเหล็กสูงห้าเม็ดสุดท้าย (Ymd4, Ymd10, Ymd3, Ymd8, Ymd11 ในรูปที่ 5.8-5.12) เกิดจาก Fe^{3+} transitions เป็นหลัก และสีเหลืองอ่อนถึงอ่อนมากในตัวอย่างดังกล่าวมีแนวโน้มเข้มข้นสอดคล้องกับปริมาณธาตุเหล็กที่สูงขึ้นตามลำดับ (ดูสีเปรียบเทียบในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.8-5.12 ด้วย)

ผลวิเคราะห์เคมีของตัวอย่างทั้งหมด พบว่ามีปริมาณค่าแมกนีเซียมสูงกว่าไทเทเนียมเกือบทุกจุด ($Mg > Ti$) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง พลอยสองตัวอย่างแรก หรือพลอยกลุ่มแรกที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ (Ymd6 และ Ymd7) พบว่ามี $Mg:Ti$ ratio มากกว่า 2:1 (ดูรูปที่ 5.40) ซึ่งทั้งสองตัวอย่างแรกนี้มีการเปลี่ยนสีหลังเผาที่เด่นชัด แสดงว่ามีธาตุแมกนีเซียมเหลือมากเกินพอที่สามารถทำให้เกิด ศูนย์กลางสีที่เสถียรได้ (stable colour centres or Mg-trapped hole colour centres) จึงเกิดสีเหลืองทองหรือเหลืองแกมน้ำตาลขึ้นหลังเผา

ส่วนตัวอย่าง Ymd1 ที่มีการเปลี่ยนสีหลังเผาเพียงบางส่วน และตัวอย่างอื่นๆที่เหล็กที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูงขึ้นตามลำดับและไม่มีการเปลี่ยนสีหลังเผา พบว่ามี $Mg:Ti$ ratio อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 2:1 (ดูรูปที่ 5.40) แสดงว่าพลอยที่เผาแล้วได้สีเหลืองทองหรือเหลืองแกมน้ำตาลที่เกิดจาก ศูนย์กลางสีที่เสถียรได้ (Mg-trapped hole colour centres) น่าจะต้องมี $Mg:Ti$ ratio มากกว่าประมาณ 2:1 จึงได้ผลดี

โปรดสังเกตในตารางที่ 5.4 - 5.15 จะเห็นว่าผลวิเคราะห์ปริมาณของธาตุเบริลเลียมในพลอยทุกเม็ดมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัดได้ (detection limits) ดังนั้นธาตุเบริลเลียมจึงไม่มีบทบาททำให้เกิด ศูนย์กลางสีที่เสถียร (Be-trapped hole colour centres) ในพลอยเหล่านี้ได้ (Pisutha-Armond et al., 2004, 2006a,b)

จากผลการทดลองเผาพลอยแซปไฟร์ จากแหล่งพลอย อีลากา ประเทศมาดากัสการ์ในครั้งนี้สรุปได้ว่าการเกิดสีเหลืองในพลอยหลังเผาบางเม็ดที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำนั้น มีสาเหตุมาจากการเกิด ศูนย์กลางสีเหลืองที่ตรงโดยธาตุแมกนีเซียม (Mg-trapped hole colour centres) ซึ่ง ต้องมีปริมาณธาตุแมกนีเซียมอิสระ ที่เหลือมากเกินพอในระดับหนึ่ง คือ ต้องมี $Mg:Ti$ ratio มากกว่าประมาณ 2:1 จึงได้ผลดี ซึ่งสอดคล้องกับทั้งที่พบใน “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร” (บทที่ 2) และ “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” (บทที่ 3 และ 4) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานพอ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

จากการศึกษาเรื่องการเกิดสีเหลืองในตัวอย่างพลอยแซปไฟร์ 4 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มแรกเป็นพลอยบุษราคัมจากศรีลังกา กลุ่มที่สองเป็นพลอยบุษราคัมจากแหล่งบางกะจะ จ. จันทบุรีและพลอยไร้สีจากแหล่งบ่อพลอย จ. กาญจนบุรี กลุ่มที่สามเป็นพลอยแซปไฟร์สีเหลืองแกมเขียวถึงสีเขียวแกมเหลือง จากแหล่งบางกะจะ จ. จันทบุรี และกลุ่มที่สี่เป็นพลอยแซปไฟร์ไร้สีถึงสีเหลืองอ่อน จากแหล่งพลอยอิลากา ประเทศมาดากัสการ์ ด้วยการทดลองเผา การตรวจสอบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis-NIR ที่วัดทั้งก่อนและหลังเผา และการศึกษาธาตุร่องรอยในพลอยดังกล่าว สามารถสรุปได้ดังนี้

- 6.1.1 ในตัวอย่างพลอยกลุ่มแรก คือ พลอยบุษราคัมจากศรีลังกา ซึ่งเป็นพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($Fe < 500 \text{ amp}$) หรือเป็น “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร” พบว่าสามารถเผาให้เกิดสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลได้ง่ายด้วยวิธีปกติในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง สีเหลืองทองดังกล่าวมีสาเหตุมาจากความบกพร่องในโครงสร้าง Al_2O_3 ที่ทำให้เสถียรได้ด้วยธาตุแมกนีเซียมที่มากเกินไป โดยพบว่าพลอยส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio มากกว่า 2:1 แต่ทั้งนี้ต้องมีธาตุเหล็กในโครงสร้างมีส่วนร่วมด้วย ประเด็นนี้เรียกความบกพร่องในโครงสร้าง (defect centres) ดังกล่าว่า ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centres) หรือ ศูนย์กลางสีที่ตรงโดยแมกนีเซียม (Mg-trapped hole colour centres) ศูนย์กลางสีเหลืองดังกล่าวสามารถทำลายได้ด้วยการเผาในสภาวะขาดออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง
- 6.1.2 ในตัวอย่างพลอยกลุ่มที่สอง คือ พลอยบุษราคัมสดสีเหลืองอ่อนบางกะจะ และพลอยไร้สีกาญจนบุรี ซึ่งเป็นพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง ($Fe > 1,000 \text{ amp}$) หรือเป็น “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” พบว่าสามารถเผาให้เกิดสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลได้ง่ายเช่นกันด้วยวิธีปกติในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง สีเหลืองทองที่เพิ่มขึ้นหลังเผามีสาเหตุมาจากความบกพร่องในโครงสร้างผลึก Al_2O_3 หรือ ศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรเช่นเดียวกัน โดยพบว่าพลอยส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio ประมาณ 2:1 ดังนั้นพลอยสีเหลืองทองหลังเผาของกลุ่มนี้เป็นผลรวมของสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} transitions ที่มีปริมาณสูงในตัวของมันเองอยู่แล้วส่วนหนึ่ง (ดูใน 6.1.3) ผวกกับ สีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียรที่เพิ่มขึ้นหลังเผาอีกส่วนหนึ่ง แต่ทั้งนี้จะต้องเผาในสภาวะออกซิเจนพอเพียงที่อุณหภูมิสูง

6.1.3 ในตัวอย่างพลอยกลุ่มที่สาม คือ พลอยแซปไฟร์สดสีเหลืองแกมเขียวถึงสีเขียวแกมเหลือง จากบางกะจะ จ. จันทบุรี (เป็นพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง หรือ “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” เช่นกัน) พบว่าไม่สามารถเผาให้เปลี่ยนสีได้ด้วยวิธีปกติถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ $1,650^{\circ}\text{C}$ ถึง 3 ครั้งเป็นเวลารวมกันถึง 44 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุร่องรอยหลังเผา ยืนยันว่ามีปริมาณธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง ($\text{Fe} > 1,000 \text{ amp}$) และพบอีกว่ามี Mg:Ti ratio ประมาณหรือน้อยกว่า 1:1 ทำให้พลอยดังกล่าวไม่มีธาตุแมกนีเซียมเหลือพอที่จะไปทำให้เกิดศูนย์กลางสีที่เสถียรได้ แต่ส่วนใหญ่มีธาตุไทเทเนียมเหลือมากพอที่จะทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียว (Cyan) อันเนื่องมาจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ IVCT และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ดังนั้นสีเหลืองอ่อนที่พบในพลอยกลุ่มนี้เกิดจากจาก Fe^{3+} transitions เป็นหลัก ซึ่งเมื่อรวมกับสีน้ำเงินเขียว (Cyan) ทำให้พลอยดังกล่าวปรากฏเป็นสีเขียว

6.1.4 ในตัวอย่างพลอยกลุ่มที่สี่ คือ พลอยแซปไฟร์สดไร้สีถึงสีเหลืองอ่อนที่มีปริมาณธาตุเหล็กที่แตกต่างกัน จากแหล่งพลอยอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ พบว่าในตัวอย่างพลอยไร้สีกลุ่มนี้ที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($\text{Fe} < 500 \text{ amp}$) พบว่าสีเหลืองทองหรือสีเหลืองแกมน้ำตาลที่เกิดขึ้นหลังเผาที่อุณหภูมิสูงในสภาวะออกซิเจนพอเพียงนั้น เกิดจาก ศูนย์กลางสีที่เสถียรเช่นกัน พบว่าส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio มากกว่า 2:1 ทำให้มีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเหลือมากพอที่จะไปทำหน้าที่ตรึงศูนย์กลางสีให้เสถียรได้

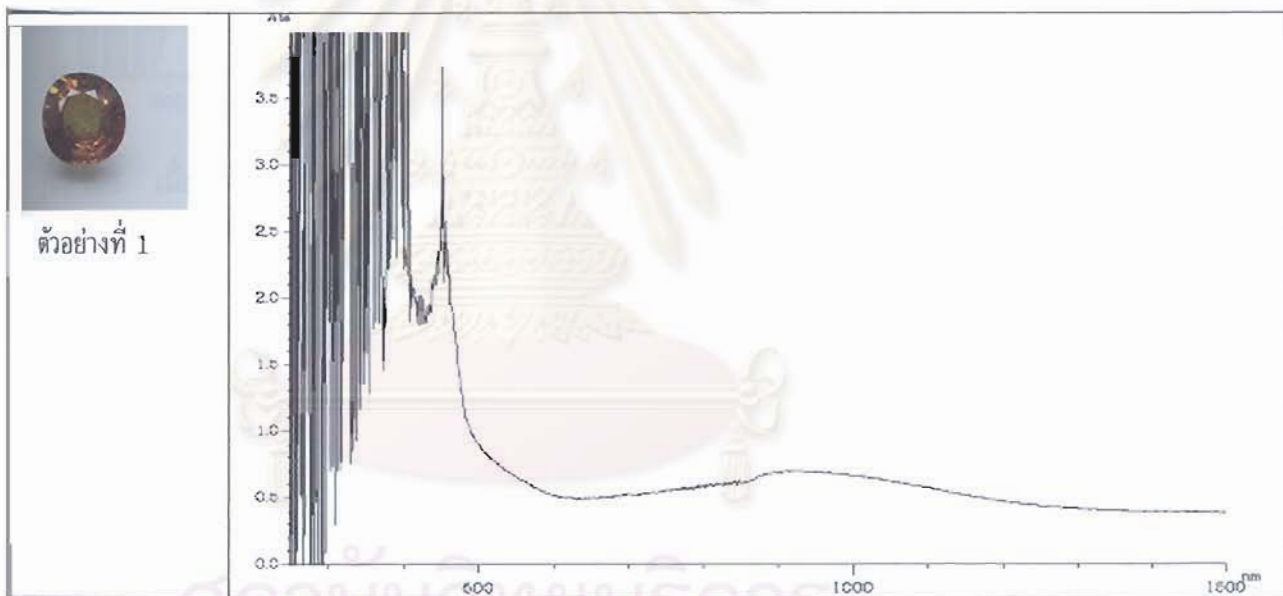
สำหรับตัวอย่างพลอยไร้สีถึงสีเหลืองอ่อนที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลาง ($\text{Fe} \sim 500-1,000 \text{ amp}$) ถึงสูง ($\text{Fe} > 1000 \text{ amp}$) พบว่าสีแทบไม่เปลี่ยนหลังเผาถึงแม้ว่าจะเผาที่อุณหภูมิ 1650°C ถึง 3 ครั้งเป็นเวลารวมกันถึง 44 ชั่วโมง ในบรรยากาศออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ตาม ซึ่งต่างกับพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำในกลุ่มนี้ ในพลอยที่มีปริมาณธาตุเหล็กปานกลางถึงสูงกลุ่มนี้ พบว่าส่วนใหญ่มี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 2:1 ทำให้มีปริมาณธาตุแมกนีเซียมเหลือไม่มากพอที่จะไปทำหน้าที่ตรึงศูนย์กลางสีให้เสถียรได้ ดังนั้นสีเหลืองอ่อนถึงอ่อนมากในพลอยกลุ่มนี้เกิดจาก Fe^{3+} transitions เป็นหลัก

6.1.5 จากการประมวลผลของพลอยทั้งหมดทุกกลุ่ม พอสรุปได้ว่า พลอยแซปไฟร์ที่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้ดั่งนั้น ควรต้องมี Mg:Ti ratio มากกว่าประมาณ 2:1 ในกรณีที่พลอยมี Mg:Ti ratio อยู่ระหว่าง 2:1 และ 1:1 นั้น อาจมีพลอยบางเม็ดโดยเฉพาะเม็ดที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($\text{Fe} < 500 \text{ amp}$) ที่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้บ้าง สำหรับพลอยที่มี Mg:Ti ratio ประมาณ 1:1 นั้น ไม่สามารถเผาให้เป็นสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองได้เลย พลอยดังกล่าวจะไม่มีสีถ้ามีปริมาณธาตุเหล็กต่ำกว่าประมาณ 1500 amp แต่จะมีสีเหลืองอ่อนและเข้มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีปริมาณธาตุเหล็กมากกว่า 1500 amp สำหรับพลอยที่มี Mg:Ti ratio น้อยกว่า 1:1 จะมีสีน้ำเงินเขียว (Cyan) เกิดขึ้นอันเนื่องมาจาก $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และหรือ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ซึ่งถ้าพลอยดังกล่าวมีปริมาณธาตุเหล็กสูงด้วยแล้ว พลอยจะปรากฏเป็นสีเขียว

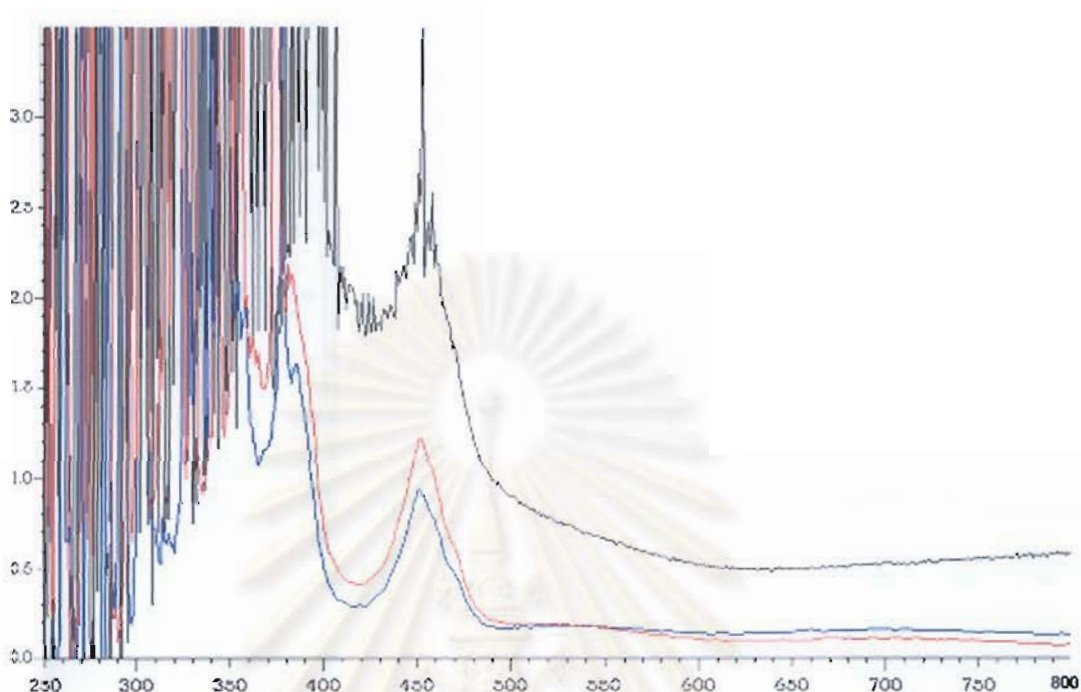
6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ สามารถใช้ ลักษณะสี และ UV-Vis-NIR สเปกตรัมช่วยเสริมการตรวจแยก พลอยบุษราคัมไม่เผาและพลอยเผาได้ ดังนี้

- 6.2.1 ในกรณีของพลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง ($Fe > 1,000 \text{ ppm}$) หรือเป็น“พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์” ถ้าเป็นพลอยไม่เผา มักมีสีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} transitions เท่านั้น แต่ถ้าเป็นพลอยเผาแล้ว มักมีสีเหลืองทอง ที่เป็นผลรวมของ สีเหลืองอ่อนที่เกิดจาก Fe^{3+} ผสมกับ สีเหลืองทอง ที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียรที่เพิ่มขึ้นหลังเผาอีกส่วนหนึ่ง และสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis ของพลอยหลังเผามักมีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี ยกตัวอย่าง เช่น พลอยที่แสดงรูปที่ 6.1 และ 6.2

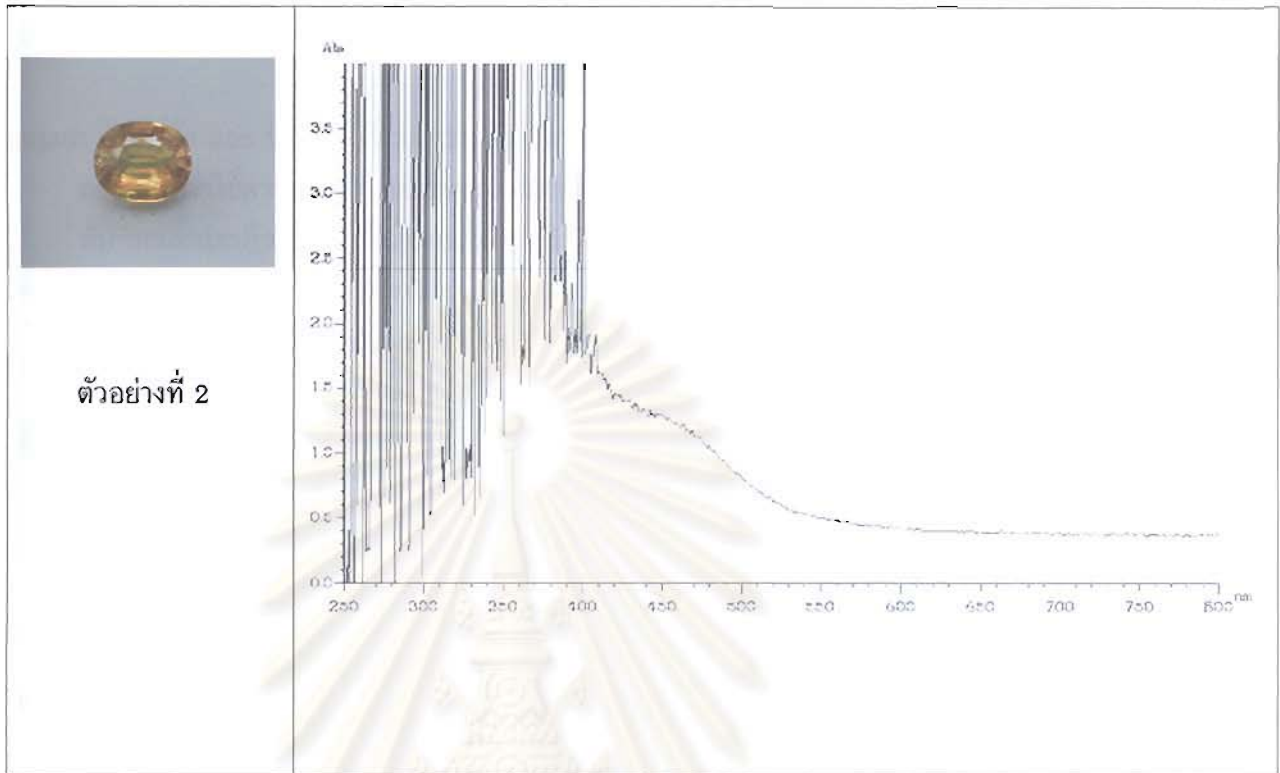


- รูปที่ 6.1 แสดงพลอยบุษราคัมตัวอย่างที่ 1 ที่ส่งมาตรวจที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี ปรากฏว่า มีสีเหลืองทอง และ สเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis ของตัวอย่างพลอยดังกล่าว แสดงการดูดกลืนของ Fe^{3+} transitions ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร และการดูดกลืนที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินเขียวจาก Fe^{2+}/Ti^{4+} และ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT เป็นลักษณะการดูดกลืนของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์



รูปที่ 6.2 เมื่อนำสเปกตรัมของพลอยที่ส่งมาตรวจดังกล่าวมาซ้อนทับ เปรียบเทียบกับสเปกตรัมของพลอยบุษราคัมบางกะจะ 2 ตัวอย่างที่วัดก่อนเผา (ตัวอย่าง YCH1 เส้นสีน้ำเงิน และตัวอย่าง YCH3 เส้นสีแดง ในบทที่ 2) พบว่าพลอยที่ส่งมาตรวจมีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวี ทำให้ทราบว่าพลอยดังกล่าวได้ผ่านการเผา

- 6.2.2 ในกรณีของพลอยบุษราคัมที่มีปริมาณธาตุเหล็กต่ำ ($Fe < 500 \text{ ppm}$) หรือเป็น “พลอยแบบฉบับที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร” ถ้าเป็นพลอยไม่เผา มักมีสีเหลืองอ่อนที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียร แต่ถ้าเป็นพลอยเผาแล้ว มักมีสีเหลืองทองที่เกิดจากศูนย์กลางสีที่เสถียรที่เพิ่มขึ้นหลังเผาอีกส่วนหนึ่ง และสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Vis ของพลอยหลังเผามักมีการยกตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางรังสียูวีที่เด่นมาก และมีไหล่ที่ประมาณ 460 นาโนเมตร ที่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน เช่น พลอยที่แสดงรูปที่ 6.3



ตัวอย่างที่ 2

รูปที่ 6.3 แสดงพลอยบุษราคัมตัวอย่าง 2 ที่ส่งมาตรวจที่ห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี ปรากฏว่า มีสีเหลืองทอง และสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง UV-Vis (o-rays) แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องไปทางคลื่นสั้น และมีไหล่ที่ ประมาณ 460 นาโนเมตร ที่เด่นชัดมาก เป็นลักษณะการดูดกลืนของพลอยที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปรที่น่าเป็นพลอยที่ผ่านการเผามาแล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 เอกสารอ้างอิง (Reference)

- กฤตยา ปัทมาลัย และ รักษ์ หารรรษาเวก, 2548. "การเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์มาดากัสการ์ด้วยกรรมวิธีการใช้ความร้อน" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 22-48
- กฤตยา ปัทมาลัย และ รักษ์ หารรรษาเวก, 2550. "การเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์ภูมิภาคแอฟริกา: มาดากัสการ์ แทนซาเนีย เคนยา และไนจีเรีย" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน" 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 193-204
- จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, วิสุทธิ พิสุทธิอานนท์, วิลาวัณย์ อติชาติ, พรสวาท วัฒนกุล, ทนง ลีลาวัฒนสุข, สมฤดี สักการเวช, จิตินทรีย์ ปวโร ลีลาวัฒนสุข, ชนินยา สมบุญ, สุรีพร พุ่มเพ็ง, มนฤดี ถาวรมงคล, นารีวี สุเสวี, ภัทรา ศรีทุนะโยธิน, 2548 "สิ่งบ่งชี้พลอยทับทิม และแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 77-84
- ชโย สารุกิจชัย, 2548. "การเผาพลอยทับทิมกับประเด็นปัญหาการออกใบรับรอง" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 16-19
- ชโย สารุกิจชัย, 2550. "ปัญหาและอุปสรรคการค้าอัญมณีของไทยกับแนวทางแก้ไข" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน" 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 8-15
- พงศ์ทิพย์ วิโนทัย และ พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ, 2548. "การหาสภาวะเหมาะสมในการเผาทับทิมเวียดนาม" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 61-66
- พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ, 2548. "การพัฒนาเตาเผาอุณหภูมิสูงสำหรับเผาพลอย" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 85-89
- ประจักษ์ อังคะหิรัญ, 2548. "การพัฒนาการเผาพลอยของไทย" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์" 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 20-21
- ประจักษ์ อังคะหิรัญ, 2550. "นวัตกรรมการเผาพลอยของไทย" เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง "เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน" 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 1-2

- ทอง สีสาววัฒนสุข, วิสุทธิ์ พิสุทธอานนท์, วิลาวัณย์ อติชาติ, พรสวาท วัฒนกุล, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, บุญทวี ศรีประเสริฐ, ชนินยา สมบุญ, สุรพร พุ่มเพ็ง, มณฑิ์ ถาวรมงคล, นารีวี สุเสวี, กัทธา ศรีทนะโยธิน, 2550. “เทคนิคการตรวจสอบพลอยทับทิมและแซปไฟร์ที่เผากับสารเบริลเลียม” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีอัญมณีไทย ก้าวไกลอย่างยั่งยืน, 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 103-109
- ธีรพงศ์ ธนสุทธิพิทักษ์, ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์ และ กอบกาญจน์ พรหมสุรินทร์, 2548. “มลทินแร่ในทับทิมจากแหล่งแอนดิลามินา ประเทศมาดากัสการ์ และการเปลี่ยนแปลงสีหลังเผา” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 49-56
- ธวัชชัย สมใจนึก, 2548. “กว่าจะรู้ว่าพลอนเนื้ออ่อนเป็นสาเบริลเลียม” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 6-7
- เมธี จิงสงวนสิทธิ์, 2548. “การล้าหน้าหน้าด้วยเทคโนโลยีการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 8
- เมธี จิงสงวนสิทธิ์, 2550. “นวัตกรรมการเผาพลอยของไทยกับมุมมองด้านการตลาด” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน” 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 3-4
- यरรอง อารีย์พงศา, 2550. “เตาเผาภายใต้สภาวะที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน” 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 115-116
- รัก ธรรมชาติ, 2548. “หลักการเพิ่มคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยความร้อน” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 116-124
- วิสุทธิ์ พิสุทธอานนท์, T. Hager, วิลาวัณย์ อติชาติ, พรสวาท วัฒนกุล, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, ทอง สีสาววัฒนสุข, สมฤดี สักการเวช, รุติณทรีย์ ปวโร สีสาววัฒนสุข, ชนินยา สมบุญ, สุรพร พุ่มเพ็ง, มณฑิ์ ถาวรมงคล, นารีวี สุเสวี, กัทธา ศรีทนะโยธิน 2548. “การปรับปรุงคุณภาพ พลอยคอร์ันดัม กับสาเหตุของการเกิดสี” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรม เดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 67-76
- วิสุทธิ์ พิสุทธอานนท์, ชนินยา สมบุญ, T. Hager, วิลาวัณย์ อติชาติ, จิตริน ณีภูชาชัย, รัก ธรรมชาติ, พรสวาท วัฒนกุล, Tin Tin Win, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์, บุญทวี ศรีประเสริฐ, ทอง สีสาววัฒนสุข. 2550. “การเกิดสีเหลืองของพลอยบุษราคัมโดยกระบวนการเผา” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน” 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชัน กรุงเทพฯ หน้า 85-97

- สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, สุรพล ภัทรนคร, ทิพย์มนต์ ภัทรนคร, สุตจิต สงวนเรือง, นัทธมน คุณแสง, ศุภกิจ อาชีวะวานิช และ เมทินี พรหมสุรินทร์, 2548. “การเผาหีบหีบมอซอด้วยไม้อีสสารเติมแต่ง” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยหีบหีบและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 57-60
- สมเมือง แก้วแหวน, 2548. “ตำนานพลอยจันทบุรี: จุดเริ่มต้นการเผาพลอย” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยหีบหีบและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 1-5
- อนุภาพ ชินอุดมพงศ์, 2548. “วิวัฒนาการการเผาพลอยกับผลกระทบต่อความเครียดของพลอย” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “ก้าวนำโลกอัญมณีด้วยเทคนิคการเผาพลอยหีบหีบและแซปไฟร์” 21 กันยายน 2548 โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 9-15
- อนุภาพ (พิศพงษ์) ชินอุดมพงศ์, 2550. “ความเข้าใจของการเปลี่ยนสีพลอยธรรมชาติด้วยความร้อนสูง” เอกสารประกอบการสัมมนาเรื่อง “เทคโนโลยีอัญมณีไทยก้าวไกลอย่างยั่งยืน” 17 กันยายน 2550 โรงแรมมิราเคิล แกรนด์ คอนเวนชั่น กรุงเทพฯ หน้า 5-7
- Andreev, D.V., Antonov, V.A., Arsenov, P.A. and Farshtendiker V.L., 1976. Dye centres in magnesium doped corundum monocrystal. *Kristall und Technik*, v.11, p.103-108
- Emmett, J.L. and Douthit, T.R., 1993. Heat treating the sapphires of Rock Creek, Montana. *Gems & Gemology*, v.29, p.250-272
- Emmett, J.L., Scarratt, K., McClure, S.F., Moses, T., Douthit, T.R., Hughes, R.W., Novak, S., Shigley, J.E., Wang, W., Bordelon, O., and Kane, R.E. 2003. Beryllium diffusion of ruby and sapphire. *Gems&Gemology*. v.39, no.2, p.84-135
- Ferguson, J., and Fielding, P.E., 1971. The origins of colours of yellow, green and blue sapphires, *Chemical Physics Letters*, v.10, p.262-5
- Ferguson, J., and Fielding, P.E., 1972. The origins of the colours of natural yellow, green and blue sapphires, *Aust. J. Chem.*, v. 25, p.1372-85.
- Häger, T., 1992. Farbgebende und "farbhemmende" Spurenelemente in blauen Saphiren. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft - Beihefte zum European Journal of Mineralogy*, v.4, p.109

- Häger, T., 1993. Stabilisierung der Farbzentren von gelben natürlichen Saphiren. Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft – Beihefte zum European Journal of Mineralogy, v.5, p.188
- Häger, T., 1996. **Farbrelevante Wechselwirkungen von Spurenelementen in Korund. Ph.D. Thesis, University of Mainz, 170 pp**
- Häger, T., 2001. High temperature treatment of natural corundum. In: Hofmeister, E., Dao, N.Q., and Quang V.X. (eds), Proceedings of the International Workshop on Material Characterization by Solid State Spectroscopy: The Minerals of Vietnam, Hanoi, April 4-10, 2001, p.24-37
- Hughes, R.W., 1997. Ruby & Sapphire, RWH Publishing, Colorado, USA, 497p.
- Krebs, J.J., and Maisch, W.G., 1971. Exchange effects in optical absorption spectrum of Fe³⁺ in Al₂O₃, Physical Review B, v.4, p.757-69.
- Kvapil, J., Perner, B., Sítlovský, J., and Kvapil, J., 1973. Colour centre formation in corundum doped with divalent ions. Kristall und Technik, v.8, no.1-3, p.247-251
- Lehmann, G., and Harder, H., 1970. Optical spectra of di- and trivalent iron in corundum, American Mineralogist, v. 55, p.98-105
- Lumthong, P., 2004. **The characteristics of some corundum from Songea, Tanzania: M.Sc. Thesis, Department of Geology, Chulalongkorn University: 93 pp**
- Nassau, K., and Valente, G.K., 1987. The seven types of yellow sapphire and their stability to light, Gems & Gemology, v.23, no. 4, p.222-31
- Nassau, K., 1994. Gemstone Enhancement, 2nd ed, Butterworths, London, 216p.
- Nikolskaya, L.V., Terekhova, V.M., and Somoilovich, M.L., 1978, On the origin of sapphire color, Phys. Chem. Minerals, v.3, p.213-24
- Pisutha-Armond, V., Hager T., Watanakul, P., and Atichai, W., 2004. Yellow and brown coloration in beryllium-treated sapphires, Journal of Gemmology, v.29, no.2, p.77-103.

- Pisutha-Armond, V., Häger T., Atichat, W., and Watanakul, P., 2006a. The role of Be, Mg, Fe and Ti in causing colour in corundum. *Journal of Gemology*, v.30, nos.3-4, p.131-143
- Pisutha-Armond, V., Häger T., Atichat, W., Watanakul, 2006b. Role of beryllium in the coloration of Fe- and Cr-doped synthetic corundum. Presentation at GIA Gemological Research Conference, Aug. 2006, San Diego, USA and Abstract (Gem & Gemology, Fall 2006, p.85)
- Schmetzer, K. Bosshart, G. and Hänni, H.A., 1982. Naturfarbene und behandelte gelbe und orange-braune Sapphire. *Z. Dt. Gemmol. Ges.*, v.31, p.265-279
- Schmetzer, K., Bosshart, G. and Hänni, H.A., 1983. Naturally coloured and treated yellow and orange-brown sapphires. *Journal of Gemmology*, v.18, p.607-622
- Schmetzer, K., and Schwarz, D. 2004. The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pink-orange sapphires a review. *Journal of Gemmology*. v.29, no.3, p.149-182
- Schmetzer, K., and Schwarz, D. 2005. A microscopy based screening system to identify natural and treated sapphires in the yellow to reddish-orange colour orange. *Journal of Gemmology*. v.29, no.7/8: 407-449
- Schmetzer, K., and Schwarz, D. 2007. Colour zoning in heat-treated yellow to yellowish-orange Montana sapphires, *Journal of Gemmology*, v.30. no.5/6, p.268-278
- Themelis, T. 1992. *The Heat Treatment of Ruby and Sapphire: Gemlab Inc.*
- Townsend, M.G., 1968. Visible charge transfer band in blue sapphire. *Solid State Commun.* v.6, p.81-83
- Wang, H. A., Lee, C. H., and Kröger, F. A. 1983. Point defects in $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$: Mg studied by electrical conductivity, optical absorption and ESR. *Physical Review B*. v.27, no.6, p.3821-3841

ภาคผนวก ก.



The role of Be, Mg, Fe and Ti in causing colour in corundum

Dr Visut Pisutha-Arnond^{1,2}, Dr Tobias Häger³,
Wilawan Atichat¹ and Dr Pornsawat Wathanakul^{1,4}

*Gem and Jewelry Institute of Thailand, Faculty of Science,
Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand*

*Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,
Bangkok 10330, Thailand. E-mail: vpisut@gmail.com*

Institute of Gemstone Research, University of Mainz, Germany

*Earth Science, Department of General Science, Faculty of Science, Kasetsart
University, Bangkok 10900, Thailand*

Abstract: *New beryllium-diffusion experiments on pure synthetic and iron-doped synthetic sapphire samples and on natural blue sapphires were undertaken to fully understand how colour is affected by Fe, Ti, Mg and Be in corundum. LA-ICP-MS analyses were carried out on sections through and on the treated surfaces of the sapphires. The results have confirmed that the divalent Be acts essentially in the same way as that of Mg, i.e. as a stabilizer of colour centres.*

Keywords: *beryllium diffusion, blue sapphire, colour centres, heat treatment, LA-ICP-MS analysis, yellow sapphire*

Introduction

Although corundum diffusion-treated with beryllium (Be) has been discussed recently by a number of authors including Clure *et al.* (2002), Peretti and Günther (2002), Peretti *et al.* (2003), Hänni (2002), Hänni and Pettke (2002), Emmett *et al.* (2003), Ritsch *et al.* (2003), Themelis (2003), Pisutha-Arnond *et al.* (2003 and 2004) and Schmetzer and Schwarz (2004, 2005), the role of Be in corundum has not yet been fully understood. Pisutha-Arnond *et al.* (2004) presented studies on UV-Vis-spectroscopy and trace-element chemistry of irradiated and Be-treated synthetic and natural colourless sapphires, yellow and orange yellow Be-treated natural sapphires and some Be-treated natural blue

sapphires, and established that the majority of Be-treated sapphires showed indications of Be diffusion into the corundum lattice from an external source. The chemical analyses obtained by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) consistently showed that there were excess contents of (Be+Mg) over Ti in all of the yellow sapphires which were coloured by stable defect centres. The oxidation and reduction heating experiments also showed that oxidizing conditions were an important factor in the formation of stable colour centres. So, currently it is believed that after combining Mg and Be with any Ti present to form colourless MgTiO₃ and/or

BeTiO₃ clusters, any excess of (Be+Mg), in combination with iron and the heat treatment in an oxidizing atmosphere can produce stable yellow colour centres in yellow Be-treated natural sapphires.

In the previous study, Pisutha-Arnond *et al.* (2004) assumed the divalent Be could have the

same effect in the corundum structure as Mg. However, Mg and many other trace elements are usually present in natural corundum and this makes it difficult to understand the direct relationship of Be and Fe in any natural sapphire treated with Be. Hence in order to prove such an assumption it was necessary

Materials and methods

In order to test whether Be has a comparable effect to Mg in producing brown coloration in an otherwise pure synthetic sapphire (i.e. Be in the Al₂O₃ system), a comparison experiment was performed on a piece of synthetic colourless 'watch glass' sapphire with high purity (THSC501). The piece was cut in half, and one half was heat-treated with ground chrysoberyl in a crucible while the other half was heated in another crucible without chrysoberyl in an electric furnace. Each crucible was held at 1750°C (measured by a thermocouple in which a certain degree of temperature gradient was unavoidable) for 30 hours in an oxidizing atmosphere. After the treatment, both halves of the 'watch glass' were lightly polished, cleaned and their trace element contents determined using LA-ICP-MS at the GEMOC Key Centre, Department of Earth and Planetary Sciences, Macquarie University, Sydney, Australia. The UV-Vis spectrum of the chrysoberyl-treated half was also recorded.

To further confirm that Fe needs to be present to form yellow (rather than brown) defect centres an Fe-doped sapphire was synthesized by a flame-fusion technique, irradiated with X-rays for 30 minutes using a Rh-tube at 60 kV and 53 mA, and then shortly after, subjected to a fading test. The fading was carried out for one hour at a distance of 3 cm from a 100W light bulb. The sample was subsequently heated in a crucible with ground chrysoberyl at 1780°C for 50 hours in an oxidizing atmosphere. This Be-treated sample was then subjected to the fading test again. The sample was photographed and at each step of the experiments, UV-Vis spectra were recorded with E perpendicular to the *c*-axis (o-ray), except where noted otherwise. The sample was then cut in half, lightly polished, cleaned and analysed for trace element contents across the cut surface using LA-ICP-MS.

Additionally, two simply heat-treated natural blue sapphires and one natural blue sapphire Be-treated under unknown conditions were obtained from Thai stone heaters. The samples were cut in half and the cut surface was lightly polished and cleaned. Their trace element contents were obtained using LA-ICP-MS at five positions namely: Rim1, Mid-Point1, Core, Mid-Point2 and Rim2 to yield a profile of analyses.

Detailed descriptions of LA-ICP-MS instrumentation, analytical and calibration procedures are similar to those given by Norman *et al.* (1996). The UV laser ablation microprobe (a New Wave Research 266 nm Nd:YAG) is coupled to an Agilent 7500 ICP-MS. All analyses were done with a pulse rate of 5 Hz and a beam energy of approximately 0.5 mJ per pulse, producing a spatial resolution of 30-50 micrometres in diameter on the samples. Quantitative results for 9 trace elements (Be, Na, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Fe and Ga) were obtained through calibration of relative element sensitivities using the internal standards NIST-610 multi-element glass and pure Al₂O₃ and the external standard BCR2G basaltic glass. The detection limits vary from analysis to analysis and are typically less than 1 ppm for Be, V, Ga; less than 4 ppm for Mg, Ti, Mn; less than 13 ppm for Cr; less than 40 ppm for Na and less than 80 ppm for Fe. The results significant in this study are presented in diagrams and detailed numerical results can be obtained from the senior author.

to carry out more Be-diffusion experiments with pure synthetic and Fe-doped synthetic sapphires without the influence of Mg and other trace elements. In addition, more LA-CP-MS analyses needed to be carried out on natural blue sapphires both untreated and treated with Be to test the assumption of similarity of Be and Mg.

In order to understand the Be-diffusion process and its mechanism, the role of trace elements and the cause of stable yellow colour centres are reviewed briefly. The role or interaction of Mg, Ti and Fe in creating stable yellow colour centres or blue colours is well understood (Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993). The divalent Mg and tetravalent Ti form colourless MgTiO_3 (geikielite) clusters, and after formation of these clusters, any excess Mg could combine with Fe in an oxidizing atmosphere to produce colour-active defect centres or stable yellow colour centres. However, in corundums with rather low Fe

excess of Ti after the calculation of MgTiO_3 , the excess Ti in combination with Fe could form colour-active FeTiO_3 clusters under both reducing and oxidizing conditions. These clusters create $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ inter-valence charge transfer absorption bands near 578 and 735 nm which are responsible for the blue coloration of sapphire (Townsend, 1968; Ferguson and Fielding, 1972; Häger, 1992, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993).

Results

Simple heat-treatment and beryllium-diffusion treatment of a pure synthetic colourless sapphire

After simple heat treatment (i.e. heat treatment that is not accompanied by other minerals or chemicals), the pure synthetic sapphire (THSCS01) remained colourless but it turned brown after Be diffusion treatment (Figure 1). Trace element analyses



Figure 1: A colourless sapphire disc (THSCS01) was cut in half, one half was heat-treated with ground chrysoberyl in a crucible (a, brown) while the other half was heat-treated in another crucible without chrysoberyl (b, colourless). After the treatment, five-points on a traverse were analysed on the polished surface of each half. Photo by C. Somboon.

content such as Mg-doped synthetic stones, stable brown or brownish violet colour centres, rather than yellow, are produced (Wang *et al.*, 1983; Häger, 1996, 2001). The Mg seems to act as a stabilizer of the defect centre. On the other hand, if there is an

of the colourless half show that the original material is relatively pure with only traces of Ti (< 4ppm) and Na (< 200 ppm). The brown half contains about 10 ppm by weight of Be, that is, about 20 atom mole ppm of Be has diffused into the corundum lattice,

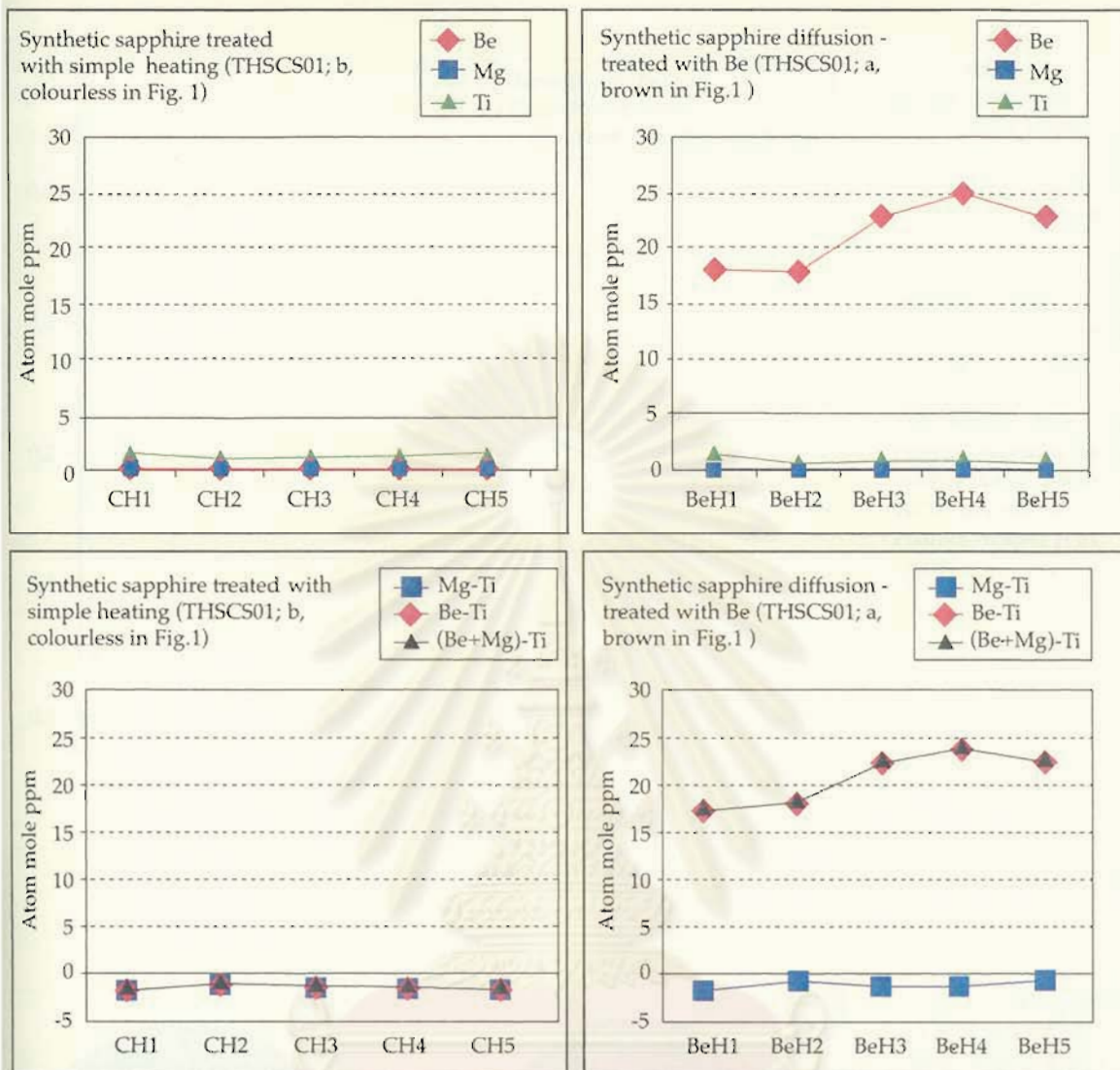


Figure 2: Be, Mg and Ti contents at the surfaces of the simply heat treated (CH numbers) and chrysoberyl-treated (BeH numbers) sections of the sapphire disc (THSCS01) shown in Figure 1. The right-hand diagrams illustrate the positive values of (Be - Ti) in the Be-treated half and Mg points are included in view of discussion later in the paper.

while the presence of any of the other eight trace elements is negligible (Figure 2). The UV-Vis spectrum of the Be-treated brown half shows exactly the same pattern as that of the flame-fusion grown sapphire (PKSCS01) treated under unknown conditions by a Thai heat-treater (Figure 3) with a broad absorption and centred at around 420 nm.

Treatments of an iron-doped synthetic sapphire

An Fe-doped synthetic sapphire was colourless before treatment (Figure 4a) and contained abundant gas bubbles typical of flame-fusion grown material (Figures 4 and 5).

The sample became yellow after irradiation treatment (Figure 4b) and its UV-Vis spectrum shows a continuous increase in absorption towards shorter wavelengths with a shoulder at about 450 nm (Figure 6). After a fading test, this sample became colourless (Figure 4c) but it turned yellow again after treatment with Be and this colour was stable after a fading test (Figure 4d).

The UV-Vis spectrum of the sample treated with Be shows exactly the same pattern as that of the sample irradiated with X-rays (Figure 6), and these spectra are also similar to that of a Sri Lankan yellow sapphire coloured by stable defect centres and to

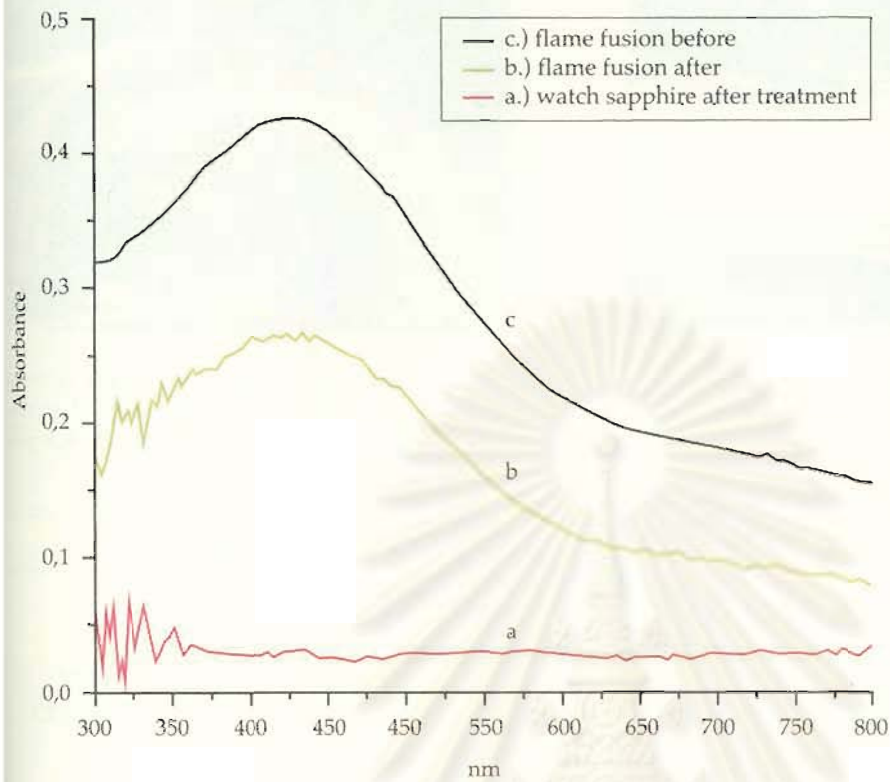


Figure 3: UV-Vis spectra of the flame-fusion-grown sapphire (PKSCS01) before treatment (a, colourless) and after Be-treatment under unknown conditions by a Thai heater (b, brown). Spectrum c was recorded from the brown half (THSCS01) treated with Be in our own experiment, and is the same as that of sample WG02 described by Pisutha-Arnond et al. (2004).

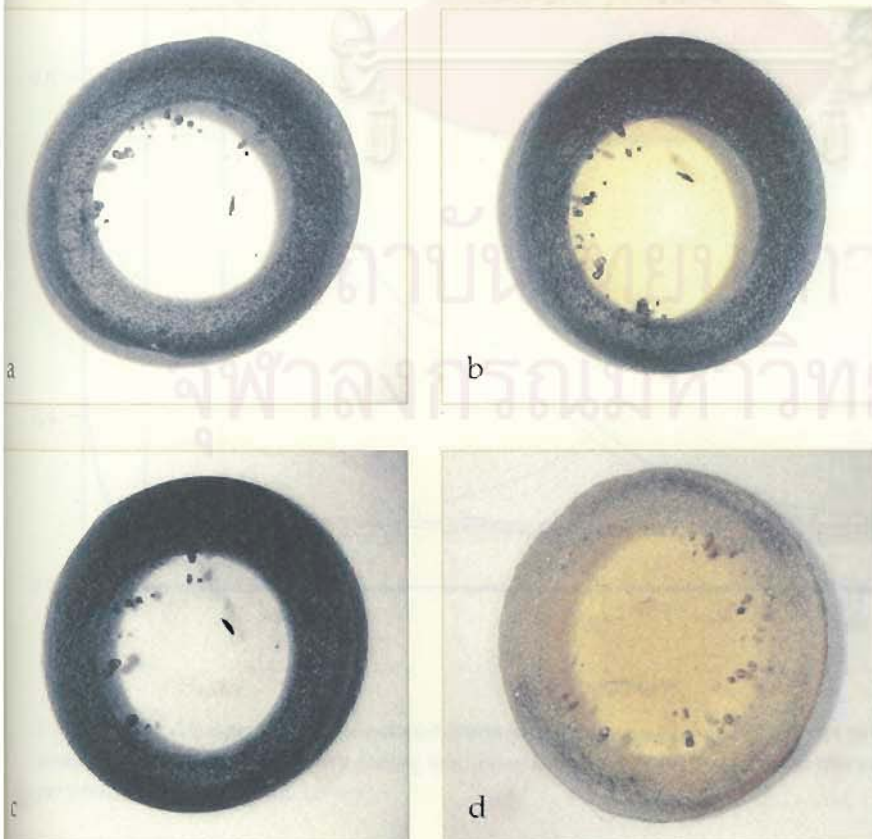


Figure 4: Photographs of an Fe-doped colourless flame-fusion sapphire before treatment (a), yellow after X-ray irradiation treatment (b), colourless after a fading test (c), and yellow again after Be-treatment (d). The final colour was stable under the fading test. Photos by T. Häger.

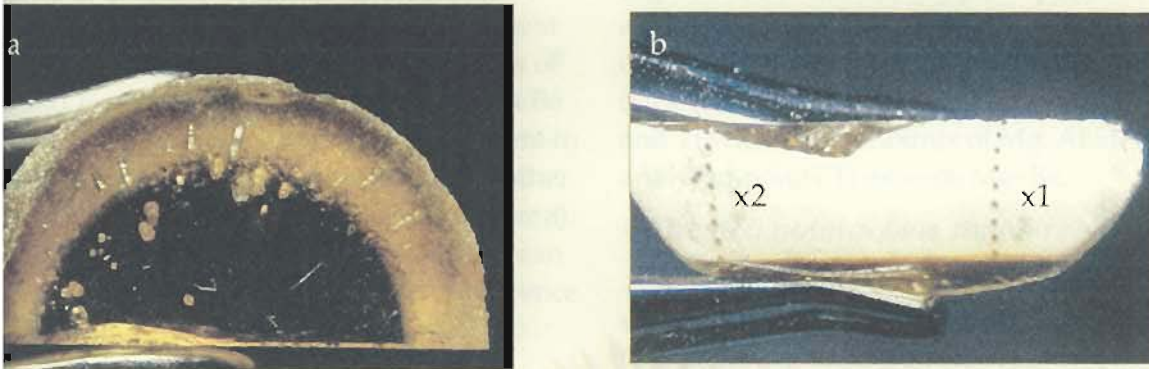


Figure 5: The Fe-doped sapphire described in Figure 4, treated with Be and cut in half (a), with details of abundant gas bubbles. In (b) are shown the positions of two traverses (X1 and X2) on the cut surface where analyses were obtained using LA-ICP-MS. Photos by C. Somboon.

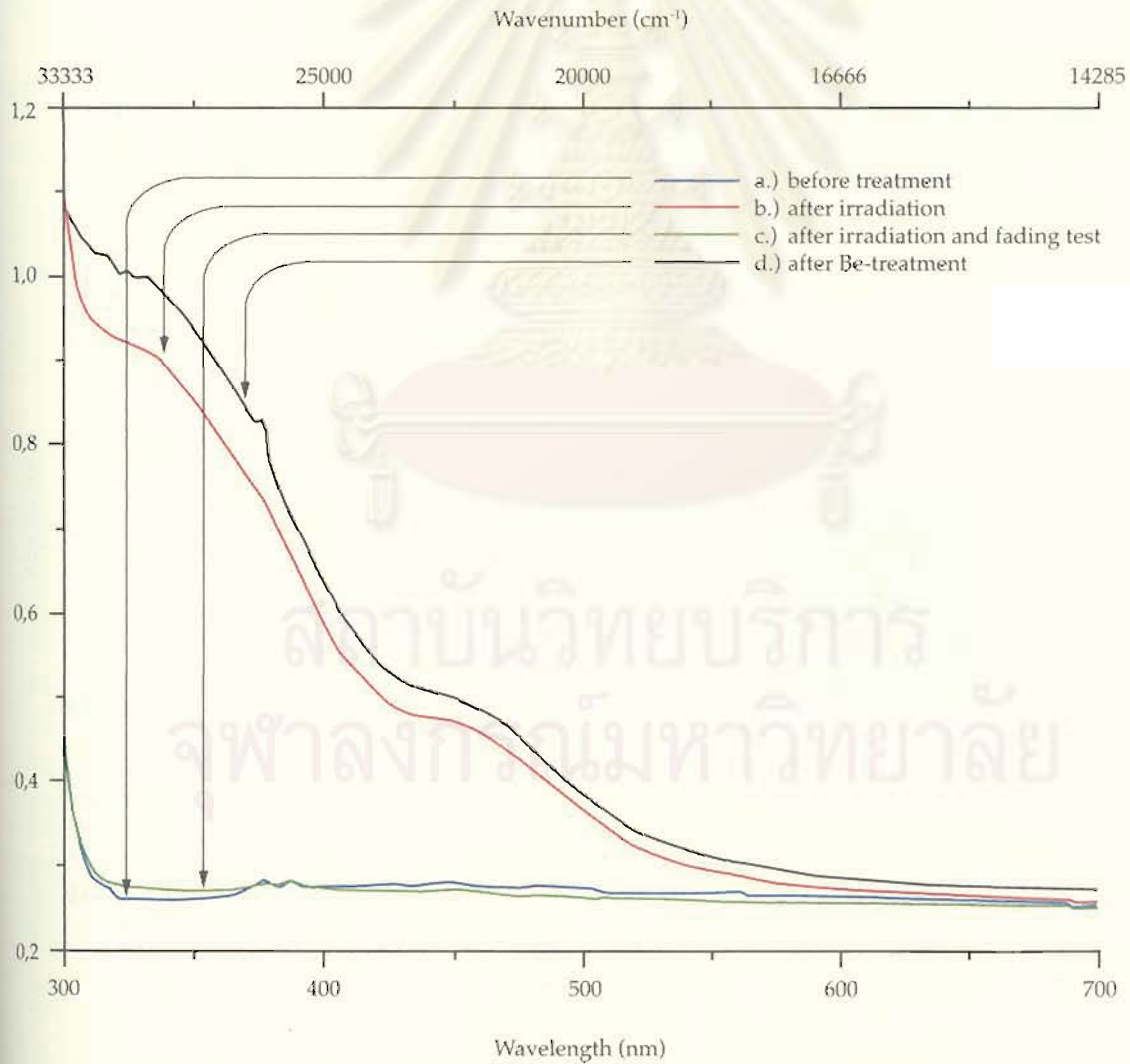


Figure 6: UV-Vis spectra of the Fe-doped flame-fusion-grown sapphire before treatment (a), after X-ray irradiation treatment (b), after a fading test (c), and after Be-treatment (d). All spectra were measured with E perpendicular to the c-axis (o-ray).

that of a synthetic sapphire doubly-doped with Mg and Fe (Figure 7). The trace element analyses confirm that significant contents of Be and Fe (about 25-30 atom mole ppm of Be and 50-60 atom mole ppm of Fe) are present in this sample after Be treatment while the other trace element contents are negligible (Figure 8). Hence it is clear that colour in the sample can be attributed solely to Be+Fe with no influence from other trace elements.

Heat-treated natural blue sapphires

As expected the two simply heat-treated natural blue sapphires, one from Australia (AUS1) and the other from an unknown source, are homogeneous in colour throughout

(Figures 9 and 11). The five point profile analyses across the cut surfaces reveal no detectable Be (below 1 ppm detection limit) (Figures 10 and 12), but show significant Fe and Ti with trace amounts of Mg. At all the analysed points Ti exceeds Mg+Be.

Be-treated natural blue sapphire

A 2.28 ct rectangular cut blue-green sapphire (BG1) reportedly from Bang Kacha (Chanthaburi, Thailand) was heat-treated with Be under unknown conditions by a Thai stone heater. After treatment the sample clearly showed a thin surface-related yellow rim surrounding a blue core with complex zoning (Figure 13a). The sapphire was cut

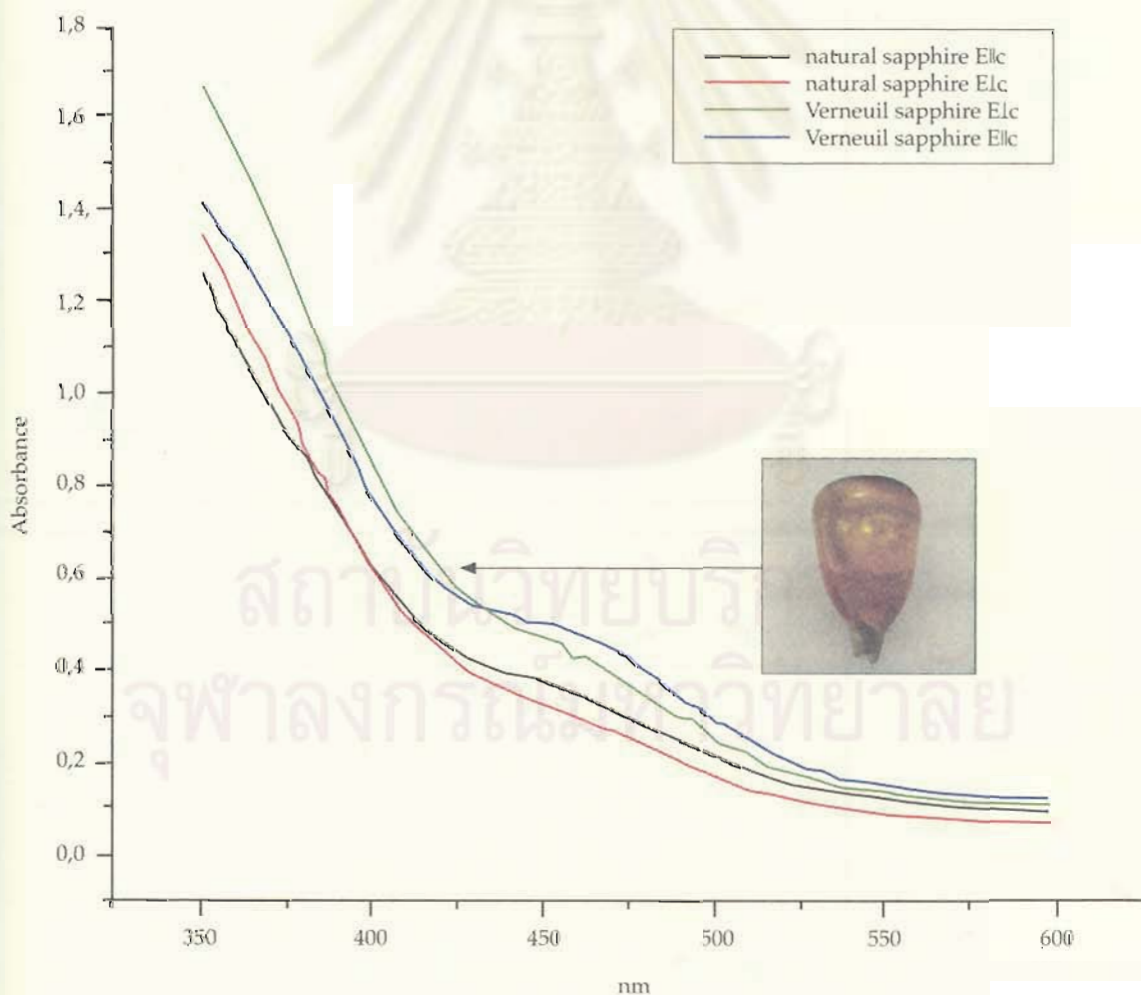


Figure 7: UV-Vis spectra of a natural Sri Lankan yellow sapphire coloured by stable defect centres (red and black curves) with the spectra of a synthetic flame-fusion-grown sapphire doped with 50 ppm Mg and 50 ppm Fe (green and blue) for comparison (Häger, 2001).

into two and the blue core of one piece can be seen in Figures 13b and c. The LA-ICP-MS profile analysis shows negligible Be (< 1 ppm) in the core and elevated Be content towards the yellow rims (Figure 14). All the analysed points in the blue core show an excess of Ti over total Mg+Be content. At the points near each rim, at the blue-yellow boundary, the analyses do show elevated Be contents but the Ti contents still exceed the sum of Be+Mg (Figure 14). However, at all the points analysed on the outer surface of the stone, which are definitely on the yellow rim (Figure 15), there is an excess of Be+Mg over

Ti (Figure 16). Additionally, all analyses indicate a rather high Fe content which is typical of sapphire from a basaltic source.

Discussion

The experiments described above on pure synthetic sapphire with and without Be diffusion indicate that the brown coloration is due to the presence of Be. The Be-diffusion treatment in an oxidizing atmosphere did produce stable brown colour centres similar to those found earlier in the synthetic sapphire doped with Mg. However they

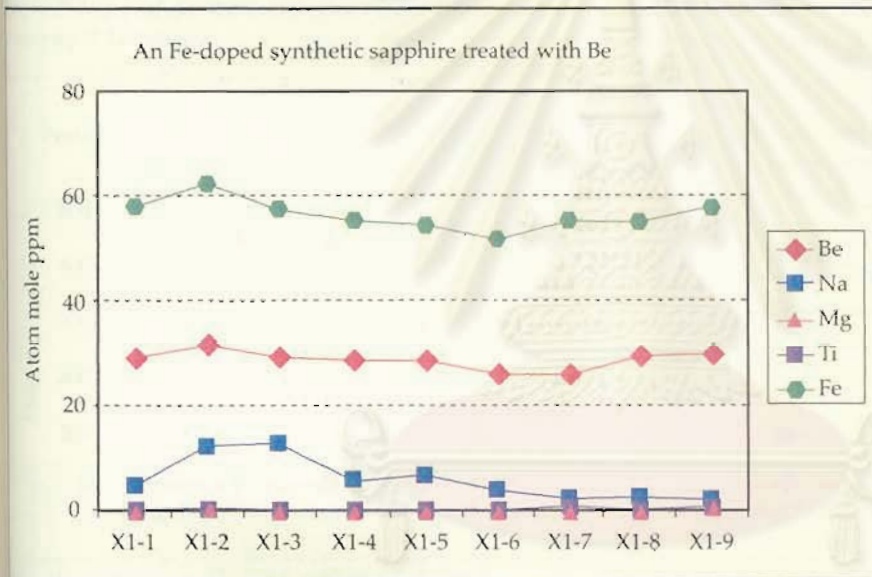


Figure 8: Trace element content along the traverse X1 of the Fe-doped synthetic sapphire treated with Be. The Fe and Be contents are constantly high across the cut surface; Mg and Ti contents are at or below the limits of detection.

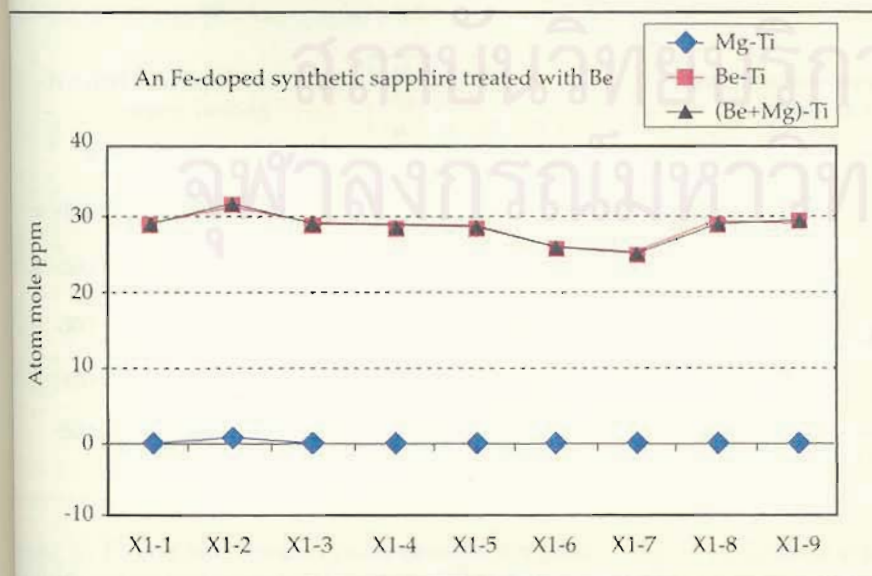




Figure 9: A natural blue sapphire (DIF1), reportedly simply heat-treated, was cut in half and the five points shown where LA-ICP-MS analyses were made (see Figure 10). Photo by P. Lomthong

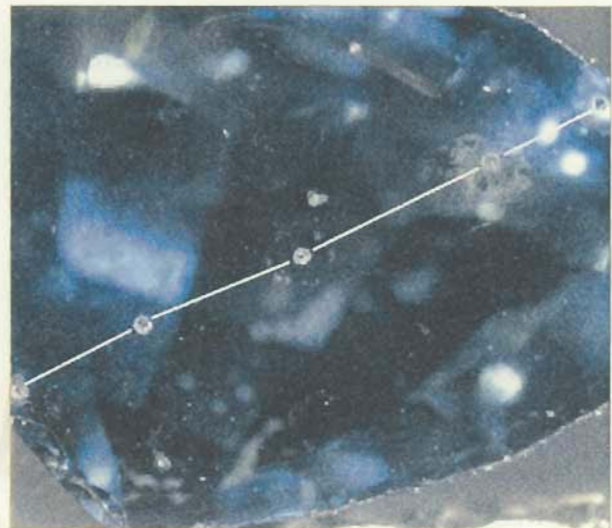


Figure 11: Cut section of an Australian blue sapphire (AUS1) reportedly simply heat-treated. LA-ICP-MS analyses were carried out at the five points marked and data for Be, Mg and Ti shown in Figure 12. Photo by P. Lomthong.

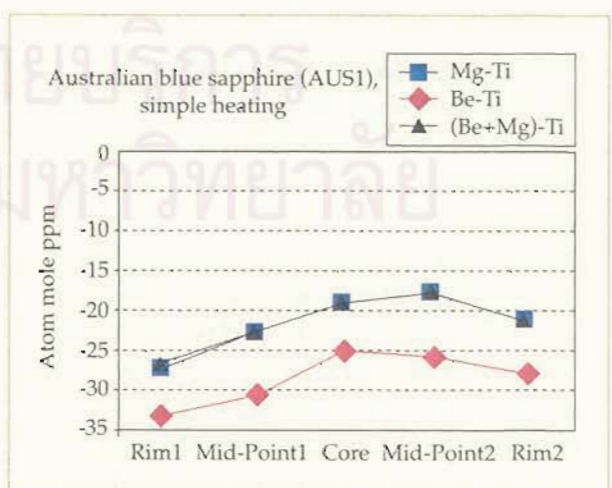
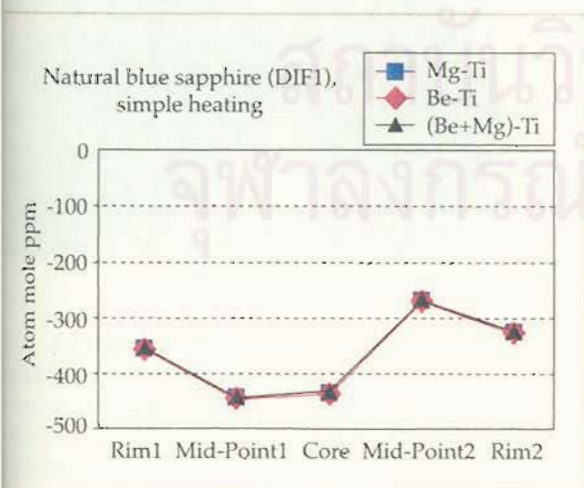
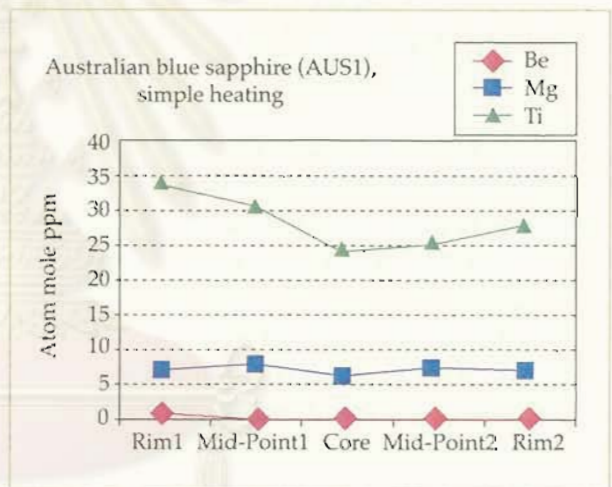
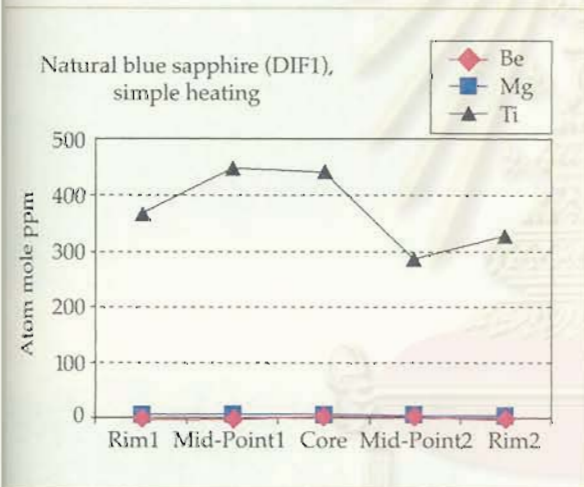


Figure 10: Plots of trace element content variation across the cut surface of the heat-treated blue sapphire (DIF1) shown in Figure 9. The analyses show negligible contents of Be, Mg and Ti > Mg at all points analysed.

Figure 12: Contents of Be, Mg and Ti across the cut surface of the Australian blue sapphire (AUS1) shown in Figure 11. The analyses show negligible contents of Be, and Ti > Mg at all five points analysed.

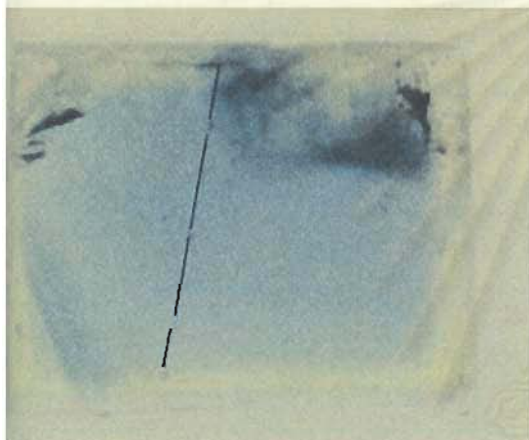


Figure 13: A rectangular block of a natural blue-green sapphire (BG1), heat-treated with Be by a Thai heater, showing surface-related yellow rim surrounding the complex blue core (a, in immersion liquid). After the treatment the sample was cut in half (b, in immersion; c, in air) and analyses were made at five points across the cut surface by LA-ICP-MS. Two points on both rims are very close to the yellow zone (rim) while three points in the middle are only in the blue core. Photos by C. Somboon.

produce different absorption spectra with the main peak centred at around 420 nm for the Be-diffusion-treated sample and at around 450 nm for the Mg-doped sample (see Pisutha-Arnond *et al.*, 2004, Figure 28).

The experiments on the synthetic sapphire doped with Fe and afterwards diffusion-treated with Be indicate that the combination of Be+Fe in the Al_2O_3 system behaves in the same way as Mg+Fe. That is, when divalent Be in combination with Fe in the Al_2O_3 structure is heat-treated in an oxidizing atmosphere stable yellow colour centres are produced that are similar to those in synthetic sapphire double-doped with Fe and Mg. The spectrum produced by sapphire doped with Be+Fe or Mg+Fe might therefore be attributed to 'metal²⁺+Fe-related stable colour centres' while that produced solely by irradiation of Fe-doped sapphire could be referred to 'Fe-related unstable colour centres'.

In the natural blue sapphire subjected to normal heat-treatment described above (Figures 9 to 12), all the analysed points show $\text{Ti} > \text{Mg} + \text{Be}$. After calculation of MgTiO_3 and BeTiO_3 clusters, the excess Ti could form colour-active FeTiO_3 clusters or Fe-Ti intervalence charge transfer, which caused blue coloration of the stones.

In the Be-treated natural blue sapphire, all the analysed points in the blue core show an excess of Ti over Mg+Be content (i.e. after the calculation of MgTiO_3 and BeTiO_3 clusters). At the boundary of the blue core and the yellow rim there are elevated Be contents but the Ti contents still exceed the sum of Be+Mg (Figure 14). The excess Ti could therefore form colour-active FeTiO_3 clusters which cause blue coloration in the core area.

In contrast, at all the points analysed on the outer surface or rim of the stone (Figure 15) there is an excess of Be+Mg over Ti (Figure 16) and the colour is yellow. All the analysed points also indicate the presence of Fe which suggests that the excess of Be+Mg in combination with Fe in an oxidizing atmosphere have led to the formation of stable yellow colour centres. The blue sapphire (BG1) shown in Figures 13 to 16

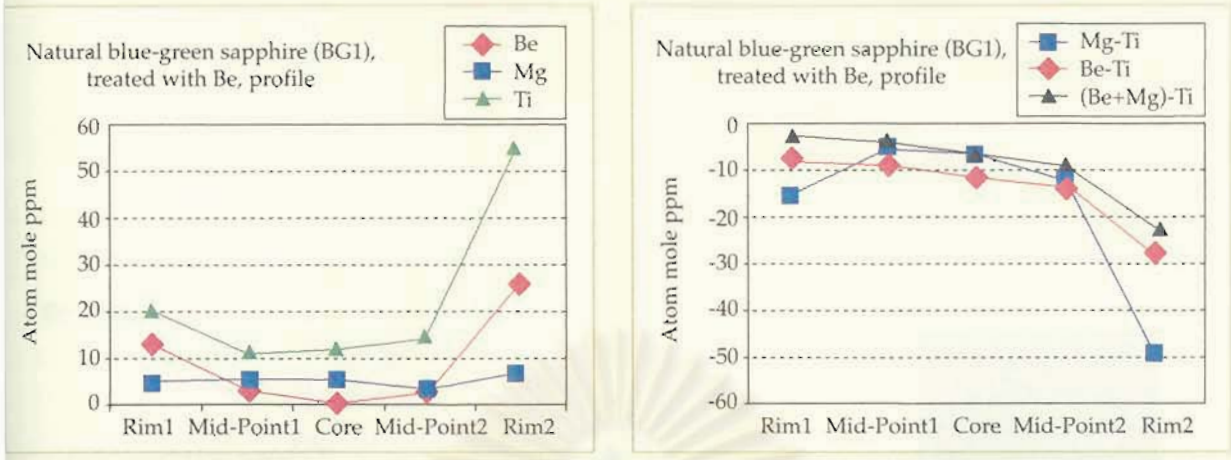


Figure 14: Contents of Be, Mg and Ti at five points across the cut surface of the Be-treated blue-green sapphire (BG1) shown in Figure 13 (b and c). The Be contents are high at the rims and decrease toward the core. The analyses show $Ti > (Be+Mg)$ in all the analysed points which are within the blue area.

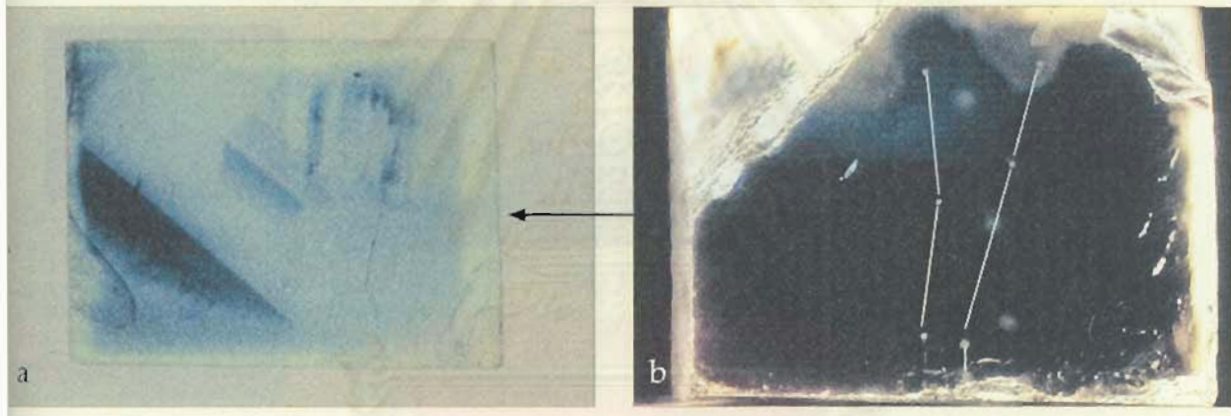


Figure 15: (a) Rectangular block of Be-treated natural blue-green sapphire (BG1) shown in Figure 13(a). (b) is a view of the right face of (a), looking in the direction of the arrow and shows the locations of the seven analyses by LA-ICP-MS, all at the yellow surface of the Be-treated sapphire. Photos by C. Somboon.

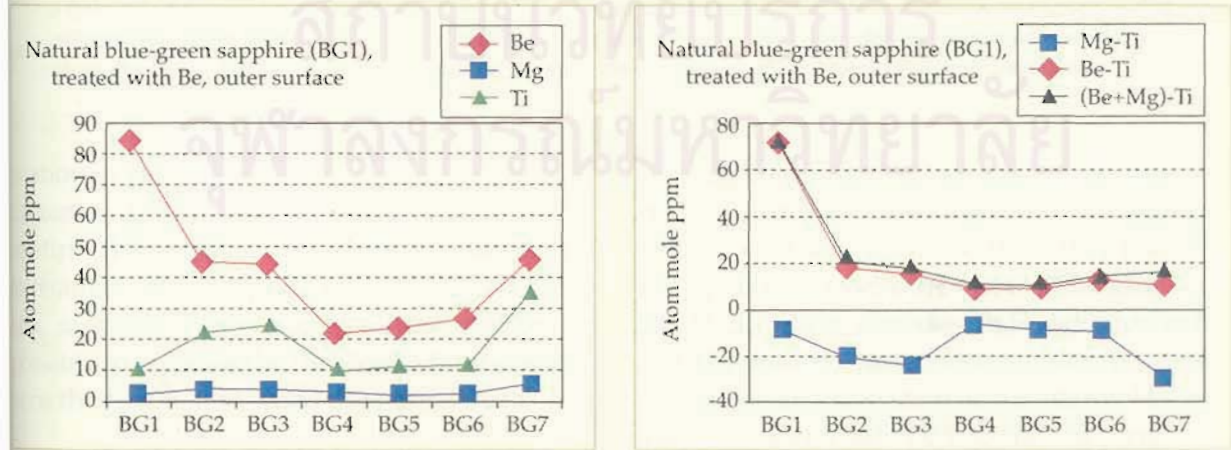


Figure 16: Be, Mg and Ti contents at seven points on the outer surface of the Be-treated blue-green sapphire (BG1) shown in Figure 15. The analyses show variable contents of Be and Ti but Be content is generally high. So $(Be+Mg)$ exceeds Ti at all points in the yellow rim and when plotted, the profile is clearly distinct from the profile of $(Mg-Ti)$ points below the zero line.

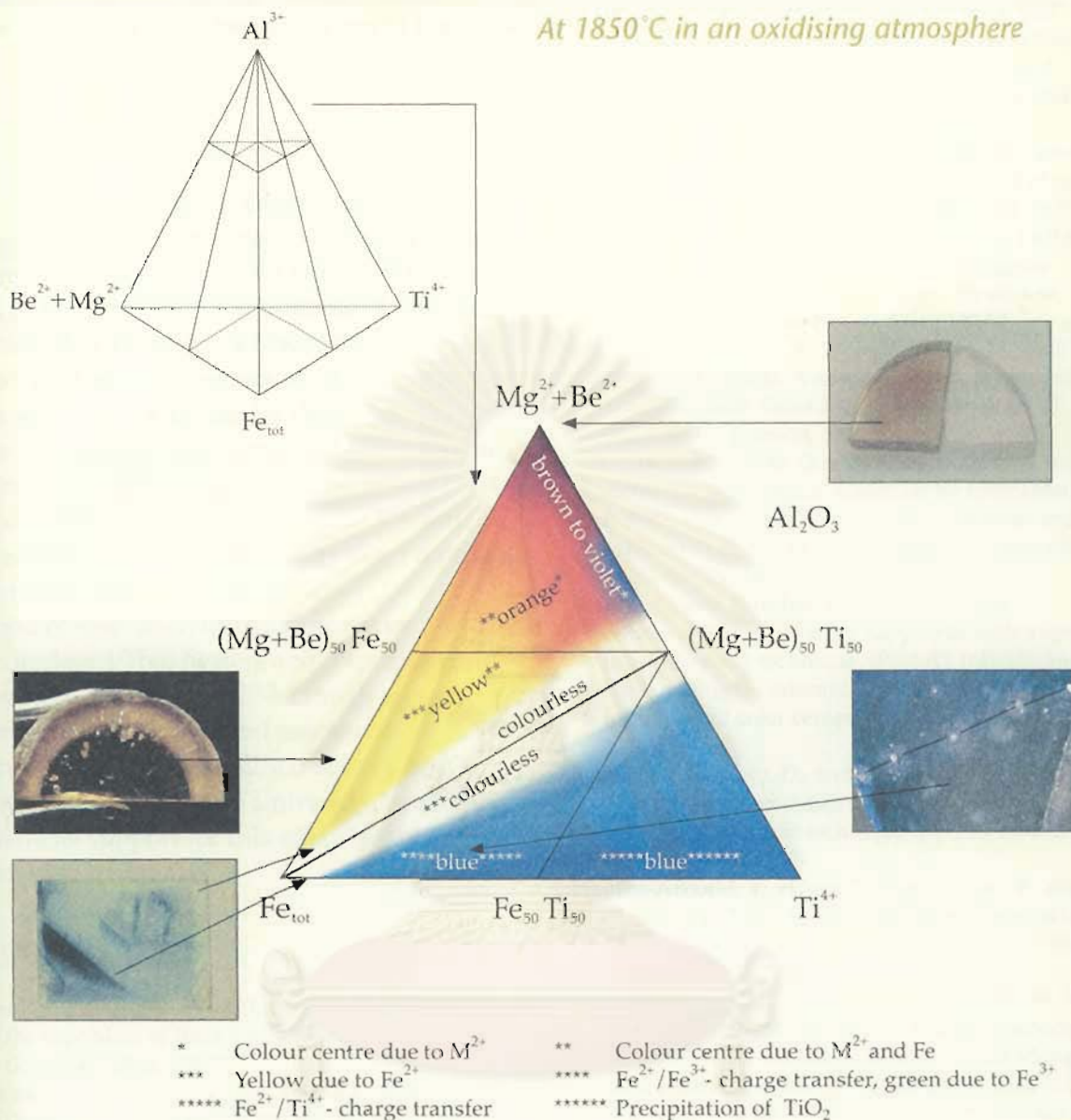


Figure 17: Approximate compositions of some treated sapphires discussed in this paper plotted on the triangular diagram proposed by Häger (1996). This model relates the colours in sapphires to their trace element content in an oxidizing atmosphere. Fe_{tot} Means $Fe^{2+} + Fe^{3+}$ and the field relates to the proportions of trace elements in a corundum host.

is another stone in which Ti exceeds the Mg content at all the analysed points. These data confirm that simple heat-treatment is unlikely to change a blue sapphire to yellow. But if the blue sapphire is subjected to diffusion of Be it is possible to increase the (Be+Mg) /Ti ratio and turn the rim yellow when the ratio exceeds 1.

Conclusion

If the results presented above are combined with those of Pisutha-Arnond *et al.* (2004),

it can be concluded that Be and Mg act in a very similar way in the 'pure' Al_2O_3 system although in the UV-Vis spectrum they produce absorption peaks at different wavelengths. In the Al_2O_3 system doped with Fe, addition of Be and Mg produces essentially similar results, as they do when the system also contains Ti. Thus, it is now valid to add Be into the Mg corner in the triangular diagram model proposed by Häger (1996 and 2001; see also Schmetzer and Schwarz, 2004). In so doing we can plot the approximate compositions of some treated

stones in the diagram as shown in *Figure 17*. The colours of these treated stones fit the model reasonably well.

Acknowledgements

The authors wish to thank Prof. Sakda Siripant, the former Director of the GIT, for continuous support of this study, and Prof. W. Hofmeister from the Institute of Gemstone Research, University of Mainz for his support also. Furthermore we would like to thank the staff of the GIT Lab for their assistance: Mr Thanong Leelawatanasuk, Miss Chaniya Somboon, Miss Somruedee Sakkaravej, Miss Thitinthree Pavaro; and the research staff at Kasetsart University: Miss Pantaree Lomthong and Miss Sermrak Ingavanija. Good co-operation from a number of undisclosed Thai heaters and traders is truly appreciated. The LA-ICP-MS analysis was carried out with the kind assistance of Ms Tin Tin Win and Ms Suzy Elhou at the GEMOC Key Centre, Macquarie University, Australia. Financial support for this study has been provided by the GIT.

References

- Emmett, J.L., and Douthit, T.R., 1993. Heat treating the sapphires of Rock Creek, Montana. *Gems & Gemology*, **29**(4), 250-72
- Emmett, J.L., Scarratt, K., McClure, S.F., Moses, T., Douthit, T.R., Hughes, R.W., Novak, S., Shigley, J.E., Wang, W., Bordelon, O., and Kane, R.E., 2003. Beryllium diffusion of ruby and sapphire. *Gems & Gemology*, **39**(2), 84-135
- Ferguson, J., and Fielding, P.E., 1972. The origins of the colours of natural yellow, green, and blue sapphires. *Aust. J. Chem.*, **25**, 1372-85
- Fritsch, E., Chalain, J.-P., Häner, H.A., Devouard, B., Chazot, G., Giuliani, G., Schwarz, D., Rollion-Bard, C., Garnier, V., Barda, S., Ohnenstetter, D., Notari, F., and Maitrallet, P., 2003. Le nouveau traitement produisant des couleurs orange à jaune dans les saphirs. *Revue de Gemmologie A.F.G.*, **147**, 11-23
- Häger, T., 1992. Fargebende und "farbhemmende" Spurenelemente in blauen Saphiren. *Ber. Dt. Mineral. Ges. Beih. Europ. J. Mineral.*, **4**, 109
- Häger, T., 1993. Stabilisierung der Farbzentren von gelben natürlichen Saphiren. *Ber. Dt. Mineral. Ges. Beih. Europ. J. Mineral.*, **5**, 188
- Häger, T., 1996. *Farbrelevante Wechselwirkungen von Spurenelementen in Korund*: Ph.D. Thesis, University of Mainz, 170 pp
- Häger, T., 2001. High temperature treatment of natural corundum. In: Hofmeister, E., Dao, N.Q., and Quang, V.X. (eds), *Proceedings of the International Workshop on Material Characterization by Solid State Spectroscopy: The Minerals of Vietnam*. Hanoi, Vietnam. April 4-10, 2001, 24-37
- Hänni, H.A., 2002. Orange treated sapphire – towards finding a name for a new product. *Journal of the Gemmological Association of Hong Kong*, **23**, 23-9
- Hänni, H.A., and Pettke, T., 2002. Eine neue Diffusionsbehandlung liefert orangefarbene und gelbe Saphire. *Gemmologie. Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, **51**(4), 137-52
- McClure, S.F., Moses, T., Wang, W., Hall, M., and Koivula, J.L., 2002. A new corundum treatment from Thailand. *Gems & Gemology*, **38**(1), 86-90
- Norman, M.D., Pearson, N.J., Sharma, A., and Griffin, W.L., 1996. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICPMS: instrumental operating conditions and calibration values of NIST glasses. *Geostandards newsletter*, **20**, 247-61
- Peretti, A., and Günther, D., 2002. The color enhancement (E) of fancy sapphires with a new heat-treatment technique. (Part A): Introducing color zoning by internal (I) migration (M) and formation of color centers. *Contributions to Gemology*, **1**, 1-48
- Peretti, A., Günther, D., and Graber, A.L., 2003. The beryllium treatment of fancy sapphires with a new heat-treatment technique (part B). *Contributions to Gemology*, **2**, 21-33
- Pisutha-Arnond, V., Häger, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., 2004. Yellow and brown colouration in beryllium treated sapphires. *Journal of Gemmology*, **29**(2), 77-103
- Pisutha-Arnond, V., Wathanakul, P., Atichat, W., Häger, T., Win, T.T., Leelawatanasuk, T., and Somboon, C., 2003. Beryllium-treated Vietnamese and Mong Hsu rubies. In: Hofmeister W., Quang V.X., Doa N.Q., and Nghi T. (eds), *Proceedings of the 2nd International Workshop on Geo- and Material-Science on Gem-Minerals of Vietnam*. Hanoi, October 1-8, 2003, 171-5
- Schmetzer, K. and Schwarz, D., 2004. The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pinkish-orange sapphires - a review. *Journal of Gemmology*, **29**(3), 149-82
- Schmetzer, K., and Schwarz, D., 2005. A microscopy-based screening system to identify natural and treated sapphires in the yellow to reddish-orange colour range. *Journal of Gemmology*, **29**(7/8), 407-49
- Themelis, T., 2003. *Beryllium-treated rubies and sapphires*. Bangkok, 48 pp
- Townsend, M.G., 1968. Visible charge transfer band in blue sapphire. *Solid State Commun.*, **6**, 81-3
- Wang, H.A., Lee, C.H., Kroger, F.A., and Cox, R.T., 1983. Point defects in Alpha- Al₂O₃: Mg studied by electrical conductivity, optical absorption and ESR. *Physical Review B*, **27**, 6, 3821-41

ภาคผนวก ข.

Heating and Irradiation Experiments on Tinted Yellow Sapphires Containing Different Iron Contents

Visut Pisutha-Arnond^{1,2}, Chaniya Somboon¹, Wilawan Atichat¹, Pornsawat Wathanakul^{1,3}, Chakkaphan Sutthirat^{1,2}, Boontawe Sripasert^{1,4} and Tin Tin Win⁵

¹ The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization), Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand; email: pvisut@gmail.com

² Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

³ Earth Sciences, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

⁴ Department of Mineral Resources, Rama 6 Rd., Bangkok 10400, Thailand

⁵ GEMOC Key Center, Macquarie University, Sydney, Australia

Extended Abstract

The heat treatment of natural corundum by 'traditional' techniques, i.e. heating in differing furnace conditions without addition of any chemical element(s) from an external source, is well accepted in the gem industry. Furthermore, the causes of colour in most heat-treated stones are generally well understood. As has previously been documented (e.g., Nassau and Valente, 1987; Schmetzer et al., 1983; Häger, 2001; Pisutha-Arnond et al., 2004), the causes of colour in untreated and heat-treated yellow sapphires from metamorphic origin with low iron content, such as from Sri Lanka, are mainly due to defect centres in Al_2O_3 structure or known as 'stable colour centres or trapped hole colour centres'. However, the causes of colour in untreated and heat-treated yellow sapphires from basaltic origin with high iron content, such as from Chanthaburi, Thailand, are still not clear whether they are mainly due to spin forbidden transition of Fe^{3+} alone or with the combination of 'stable colour centres'.

To answer such the question, a group of colourless or tinted yellow sapphires from Ilakaka, Madagascar containing differing iron contents (Ymd1-11, 11 samples) were heat-treated and irradiated for the first series of experiments. The heating experiment was carried out at 1,650°C in oxidizing condition for 10 hours. After heating, the samples were also irradiated with X-rays (80 kV, 4 mA) for 16 hours, then faded for 4 hours with a 100 W light bulb. At each stage of the experiments, the samples were photographed and UV-Vis absorption spectra were recorded. After the experiments, the samples were analyzed for the trace element concentrations, such as Be, Mg, Ti, V, Cr, Fe and Ga, by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS).


As usually expected in the heat treatment of samples containing low Fe contents (two samples, ~50 and ~200 atom mole ppm Fe), the colour did change from colourless or tinted yellow before treatment into stronger yellow after heat treatment and it was stable after fading test. The UV-Vis spectra, which appear almost flat without any absorption before treatment, show a continuous increase of the absorption to UV-part of spectrum with small shoulder at 460 nm after heat treatment. As such, the residue spectra (obtained by subtraction of spectrum measured after heating from that of the before treatment of each individual sample) show the absorption of 'colour centres' pattern. This means that the yellow coloration of low Fe-type (or metamorphic-type) sapphires created during the heating process is caused by defect centres which are stabilized by Mg in the Al_2O_3 structure or the so-called 'stable colour centres or trapped hole colour centres'. To confirm this assumption, the trace element analyses reveal a large excess of Mg over Ti in those samples (Mg-Ti > ~25 atom mole ppm).

The yellow coloration in the heated yellow (low Fe) sapphires was further intensified after irradiation but it was unstable and quickly faded into the original colour before irradiation. The spectra measured after irradiation show a similar pattern to that of the heated condition but appear to increase to higher absorption toward the UV-part of the spectrum. Therefore the residue spectra (obtained by subtraction of spectrum measured after heating from that of irradiation of each individual sample) show a continuous increase of the absorption to the UV-part of the spectrum with small shoulder at 460 nm which is known to be due to 'unstable defect centres'.

In the heating experiments of colourless to very light yellow samples containing higher Fe contents (9 samples, ~750 to ~3,000 atom mole ppm Fe), the colour of most samples did not show any change after heat treatment. The yellow coloration of the heated (high Fe) sapphires can only be intensified very slightly (or almost no change for those having very high Fe content) after irradiation, and the colour was unstable and quickly faded into the original colour before irradiation. Similar results were also obtained by irradiation of high Fe sapphires from other sources, such as (7) pale yellowish green sapphires from Chanthaburi, Thailand, and (5) pale greenish yellow sapphires from Songea, Tanzania. The UV-Vis spectra show absorption peaks due to Fe^{3+} at 450, 388 and 377 nm in which the absorption intensities tend to increase as the concentrations of Fe increase. Oxidation heating however did not change the intensity of those peaks in each individual sample (as shown by the subtraction of the spectra). The trace element analyses reveal smaller excess of Mg over Ti in most samples (Mg-Ti < ~20 atom mole ppm). These data suggest that there are not enough excess Mg to stabilize the yellow 'colour centres'. Hence the light yellow hues of those high Fe samples are mainly due to spin forbidden transition of Fe^{3+} . Furthermore the presence of large substitution of Fe in the Al_2O_3 structure tends to reduce the formation of 'unstable defect centres' induced by irradiation. Further experiment is required on the high Fe samples containing large excess of Mg over Ti to verify the possibility of the presence of 'stable colour centres' after high temperature heating.

References

- Häger, T., 2001, High temperature treatment of natural corundum. In: Proceedings of the International Workshop on Material Characterization by Solid State Spectroscopy: The Minerals of Vietnam, Hanoi, Vietnam, April 4-10, 2001.
- Nassau, K. and Valente, K., 1987, The seven types of yellow sapphire and their stability to Light, *Gems and Gemology*, Vol. 23, p.222-231.
- Pisutha-Arnond, V., Häger, T., Wathanakul, P. and Atichat, W., 2004, Yellow and brown coloration in beryllium treated sapphires. *Journal of Gemmology*, Vol.29, No.2, p.77-103.
- Schmetzer, K., Bosshart, G. and Hänni, H.A., 1983, Naturally coloured and treated yellow and orange-brown sapphires. *Journal of Gemmology*, V.18, p.607-622.



ภาคผนวก ค.

treatments. At elevated temperatures, the nitrogen impurity atoms common to most diamonds become mobile and aggregate into defects containing two or more nitrogen atoms. The relatively low temperature allied with geologic time scales ensures that in nature the forward aggregation reaction dominates. However, HPHT treatments (for example to remove brown color) are by necessity carried out over very much shorter time scales (minutes to a few hours), and significantly higher temperatures are required to achieve the desired reaction: The higher temperature also substantially raises the probability of the reverse aggregation reaction (i.e., breaking up nitrogen aggregates). The single substitutional nitrogen defect center (often referred to as the C center) produced in this process is a relatively willing electron donor, and its presence often controls the charge state of other defects. The observation of negatively charged versions of defects (e.g., the negatively charged nitrogen-vacancy defect observed at 637 nm and the negatively charged nitrogen-vacancy-nitrogen defect known as the H2 center) is often key for the identification of treated diamonds. However, it is typically the defect combinations not observed in nature that enable conclusive identification of a treated diamond rather than the spectroscopic identification of a single type of defect.

Role of Beryllium in the Coloration of Fe- and Cr-doped Synthetic Corundum

Visut Pisutha-Armond (pvisut@gmail.com)^{1,2}, Tobias Häger³, Pornsawat Wathanakul^{1,4}, Wilawan Atichar¹, Jirin Natrachai¹, Tin Win⁵, Chakkaphant Suthirar^{1,2}, and Boontawe Sripasert^{1,6}

¹Gem and Jewelry Institute of Thailand, Bangkok; ²Department of Geology, Chulalongkorn University, Bangkok; ³Institute of Gemstone Research, University of Mainz, Germany; ⁴Department of Earth Science, Kasetsart University, Bangkok; ⁵GEMOC Key Center, Macquarie University, Sydney, Australia; ⁶Department of Mineral Resources, Bangkok

X-ray irradiation and Be-diffusion heating experiments were performed on an iron-doped (colorless) synthetic corundum and a chromium-doped (pink) synthetic corundum to evaluate the role of beryllium in causing color in the Be-Fe-Al₂O₃ and Be-Cr-Al₂O₃ systems.

The iron-doped corundum, containing around 140–170 ppm by weight of Fe with negligible concentrations of other trace elements, was irradiated with X-rays (60 kV, 53 mA) for 30 minutes, then the color was faded for one hour with a 100-watt light bulb, and finally the sample was heat treated in a crucible with ground chrysoberyl in an electric furnace at 1780°C in an oxidizing atmosphere for 50 hours. The chromium-doped corundum, containing around 160–210 ppm by weight of Cr with negligible concentrations of other trace elements, was also irradiated with X-rays (80 kV, 4 mA) for 4 hours, then faded for 4 hours with a 100-watt light bulb, and subsequently heat treated with ground chrysoberyl at unspecified conditions by a Thai treamer. At each stage of the experiments, the samples were photographed and UV-Vis absorption spectra were recorded.

Both the irradiation and Be-diffusion experiments on the iron-doped synthetic corundum created defect centers that had similar UV-Vis absorption curves and produced yellow

coloration. The yellow color was unstable when induced by irradiation, but was stable after Be diffusion.

Experiments on the chromium-doped synthetic corundum produced orange coloration (and similar UV-Vis absorption patterns) by both irradiation and Be-diffusion heating methods. Again, the orange color was unstable when induced by irradiation (and quickly faded to pink), but remained stable after Be diffusion. These results confirm that divalent Be acts as a stabilizer of defect centers or color centers in iron-doped and chromium-doped synthetic corundum. Hence, the spectrum produced by the irradiation of Fe-doped or Cr-doped synthetic corundum was attributed to “metal-related unstable color centers,” while that produced in synthetic corundum doped with Be+Fe or Be+Cr was caused by “Be²⁺ + metal-related stable color centers.”

The Treatment of Ruby and Sapphire, with Implications for Gem Identification and the Integrity of the Product

Kenneth Scarratt (ken.scarratt@gia.edu)

GIA Research (Thailand), Bangkok

Corundum treatments include impregnating fractures with oils, heating to a variety of temperatures to clarify and change color, sealing fractures through “flux-assisted healing,” overgrowing with synthetic corundum, diffusing foreign elements to change color (e.g., Ti for blue and Be for yellow to orange), and the filling of fractures and cavities with glass. While some of these treatments have been carried out in a rudimentary manner for a long time (see figure), in line with advancements in technology they have become highly developed over the last four decades. The latest evolution has resulted in the availability of beryllium-diffused blue sapphires.

With advanced treatment technology, it is now possible to transform large volumes of previously unsalable opaque or

The “blowpipe technique” as originally used in Sri Lanka will slightly alter the color of some corundum. Photo by Kenneth Scarratt.





ภาคผนวก ง.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

An invited paper in The 4th AOGS Annual Meeting (AOGS2007), Bangkok,
31 July- 4 Aug 2007 (SE08-D1-AM2-BR4-009)

Heat Treatment of Yellow 'Basaltic' Sapphires from Chanthaburi Province, Eastern Thailand

VISUT PISUTHA-ARNOND^{1,2}, CHANIYA SOMBOON¹, RAK HANSAWEK³, WILAWAN ATICHAT¹,
PORNSAWAT WATHANAKUL^{1,4}, CHAKKAPHAN SUTTHIRAT^{1,2} and TIN TIN WIN⁵

¹ Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT), Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok10330, Thailand;
Email: pvisut@gmail.com

² Department of Geology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok10330, Thailand

³ Department of Mineral Resources, Rama 6 Rd., Bangkok10400, Thailand

⁴ Department of General Science, Faculty of Science, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

⁵ GEMOC Key Center, Macquarie University, Sydney, Australia

The causes of colour in untreated and heat-treated yellow sapphires from 'basaltic' origin with high iron content are still not clear whether they are mainly due to Fe³⁺ spin forbidden transition alone or with the combination of 'stable colour centres' [1],[2],[3],[4],[5],[6]. In this study therefore two sets of untreated yellow sapphires, one is light greenish yellow to yellowish green and the other is yellow, from Bang Kracha area, Chanthaburi Province, Eastern Thailand were used for the heat treatment experiments.

The first set of samples (seven untreated sapphires of light greenish yellow to yellowish green variety) was heated at 1,650°C in pure O₂ atmosphere for 24 hours. After the treatment the colour of most samples did not show any obvious change. The UV-Vis spectra recorded both before and after the treatment show similar absorption peaks due to Fe³⁺ at 450, 388 and 377 nm and additional absorption bands due to Fe²⁺ - Ti⁴⁺ and Fe²⁺ - Fe³⁺ charge transfers in the samples containing blue zones or patches. The residue spectra (obtained by subtraction of spectra measured before from that after the treatment at the same position) show a flat line without absorption. It is apparent that the oxidation heating in this experiment could not have any noticeable effect on the intensity of the absorption peaks due to Fe³⁺ at 450, 388 and 377 nm as well as the intensity of the absorption bands due to Fe²⁺ - Ti⁴⁺ and Fe²⁺ - Fe³⁺ charge transfers in each individual sample. The trace element analyses by LA-ICP-MS show rather high Fe contents in all the seven samples (~1000 to ~3,300 atom mole ppm Fe) and five of those have Ti > Mg contents while two have only minor excess contents of Mg over Ti (<~5 atom mole ppm) in all the points analyzed. These data seem to suggest that there is not enough excess Mg to stabilize the yellow 'colour centres'. Hence the light yellow hues present in those high Fe samples are mainly due to Fe³⁺ spin forbidden transition.

In the second set of samples, two untreated sapphires of pale yellow variety from Bang Kracha area were reportedly heat-treated at high temperature in an oxidizing atmosphere; the colour of the samples did change from pale yellow before treatment to brownish yellow after the heat treatment. The brownish yellow coloration after treatment was stable after a fading test. The UV-Vis absorption spectra measured before and after the treatment again show strong absorption peak due to Fe³⁺ at 450 nm and the spectrum after treatment shows a continuously elevated absorption towards the shorter wavelengths. The residue spectrum (obtained by subtraction of the absorption measured before treatment from that of after heating) shows a continuous increase in absorption towards the UV part of the spectrum with a small shoulder or hump at around 450 nm. This spectral pattern is similar to those observed in both untreated and heat-treated yellow metamorphic sapphires with low iron contents such as from Sri Lankan. This data therefore seem to suggest that the brownish yellow coloration induced by heat treatment of these 'basaltic' sapphires is mainly caused by defect center in the corundum lattice or the so-called 'color centres'. The trace element concentration by LA-ICP-MS show rather higher Fe contents (two samples, ~2700 to ~3300 atom mole ppm Fe) and Mg > Ti contents (> ~8 atom mole ppm) at all the points analyzed across the polished surface. These data reveal that the excess Mg is able to stabilize the yellow 'colour centres'. Therefore based on this preliminary result, the brownish yellow colour appearance of the heat-treated 'basaltic' sapphires is mainly caused by the combination of Fe³⁺ spin forbidden transition and the 'stable colour centres'.

References

- [1] G. Lehmann and H. Harder, *Am. Min.* 55, 98-105 (1970).
- [2] J. Ferguson and P.E. Fielding, *Chem. Phys. Lett.* 10, 262-5 (1971).
- [3] J. Ferguson and P.E. Fielding, *Aust. J. Chem.* 25, 1372-1385 (1972).
- [4] J.J. Krebs and W.G. Maisch, *Phys. Rev. (B)* 4, 757-69 (1971).
- [5] L.V. Nikolskaya, V.M. Terekhova and M.L. Samoilovich, *Phys. Chem. Min.* 3, 213-224 (1978).
- [6] K. Nassau and K. Valente, *Gems and Gemology*, 23, 222-231 (1987).



ภาคผนวก จ.

การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ กับสาเหตุของการเกิดสี

ศ.ดร.วิสุทธิ พิสุทธิอาบหนอ^{1,2} Dr. T. Häger³ วิลาวัฒน์ อดิชาติ¹ ดร.พรสวาท วัฒนกุล⁴
ผศ.ดร.จักรพันธ์ สุทธิรัตน์^{1,2} ทนง สีลาวัฒนสุข¹ สมฤดี สักการเวช¹
จิตินทรีย์ ปวโร สีลาวัฒนสุข¹ ชนินยา สมบุญ¹ สุริพร พุ่มเพ็ง¹
มนฤดี ดาวรมงคล¹ นารี สุเสวี¹ ภัทธา ศรีทุณโยธิน¹

1. สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
2. ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
3. Institute for Gemstone Research, University of Mainz
Germany
4. ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ถ.พหลโยธิน เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10900

บทนำ

พลอยทับทิมและแซปไฟร์ หรือ พลอยคอร์ันดัม เป็นพลอยที่มีความแข็งสูงเป็นลำดับสองรองจากเพชร เป็นที่รู้จักกันทั่วไปในตลาดพลอยว่า เป็นพลอยเนื้อแข็งที่มีความสวยงาม และสีสรรที่หลากหลาย จึงเป็นพลอยที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับต้น ๆ ในบรรดาพลอยสีทั้งหลาย เนื่องจากพลอยทับทิมและแซปไฟร์ที่สวยงามตามธรรมชาตินั้น หาได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นวิธีการปรับปรุงพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ขึ้นมา ให้เป็นพลอยที่สวยงามขึ้น เป็นที่ยอมรับได้ในตลาด ในบรรดากรรมวิธีการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ที่นิยมทำกันมากที่สุดได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ความร้อน ซึ่งมีเทคนิคและกระบวนการที่หลากหลาย ที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาเป็นลำดับ เริ่มด้วยการหุงหรือการเผาแบบดั้งเดิม โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว ต่อมามีการพัฒนาเป็นการเผาแบบใส่สารเชื่อมประสาน การเผาแบบแพร่สีระดับต้น การเผาด้วยวิธีเติมธาตุเบริลเลียม เป็นต้น สำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ด้วยวิธีการอื่น ๆ นั้น ก็มีบ้าง แต่ไม่นิยมทำกันมากนัก เนื่องจากยังไม่เป็นที่ยอมรับของตลาดพลอย การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์

ด้วยวิธีการอื่น ๆ ได้แก่ การฉายรังสี การย้อมสี การเคลือบผิวด้วยวัสดุบาง ๆ การใส่น้ำมันในรอยแตก พลอยปะ และล่าสุดคือ วิธีการอุดรอยแตกด้วยแก้วตะกั่ว ซึ่งอาจจะมีการใช้ความร้อนระดับต่ำด้วยก็ได้ รายละเอียดของวิธีที่พบบ่อยจะนำเสนอในบทต่อไป

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

การเผาแบบดั้งเดิม

เป็นการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวในเตาอุณหภูมิสูงที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและสภาวะบรรยากาศในท้องเผาได้ เป็นวิธีที่ใช้กันในระยะแรก ๆ และนิยมทำกันมาจนถึงปัจจุบัน เพราะเป็นวิธีที่ยอมรับได้ในตลาดพลอย เตาที่ใช้ในการหุงหรือเผาโดยนักเผาพลอยไทย รวมทั้งเทคนิค การดูพลอยก่อนดิบหรือพลอยก่อนสด และขั้นตอนของกระบวนการเผา ได้มีการพัฒนาโดยใช้ภูมิปัญญาท้องถิ่น การลองผัดลองดู และความเพียรพยายามอย่างต่อเนื่อง จนได้เตาเผาหลายประเภทและวิธีการที่หลากหลาย เหมาะสำหรับเผาพลอยจากแหล่งต่าง ๆ ที่มีธาตุมลทินที่

ทำให้เกิดสี หรือที่เรียกขานกันว่า เซ็สหรือหมา ที่แตกต่างกันได้ดี เตาเผาที่ได้พัฒนาขึ้นมา นอกจากใช้ ได้ผลดีในทางปฏิบัติแล้ว ยังเป็นเตาที่มีต้นทุนที่ต่ำ สามารถซ่อมแซมแก้ไข หรือดัดแปลงได้โดยง่าย ดังนั้นจึงนับว่า เตาเผา รวมทั้งเทคนิคการดูแลก่อน และกรรมวิธีการเผาที่นักเผาพลอยไทย ได้ประดิษฐ์ คิดค้นและพัฒนาขึ้นมา เป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เหมาะสม และมีความคุ้มค่าในเชิงธุรกิจสูง สามารถแข่งขันกับ ต่างประเทศได้ เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญประการหนึ่ง ที่ทำให้ประเทศไทยยังคงรักษาความเป็นผู้นำในการ เผาพลอย และเป็นตลาดพลอยเนื้อแข็งที่สำคัญที่สุด ของโลก สมควรที่จะยกย่องและรักษาไว้ต่อไป

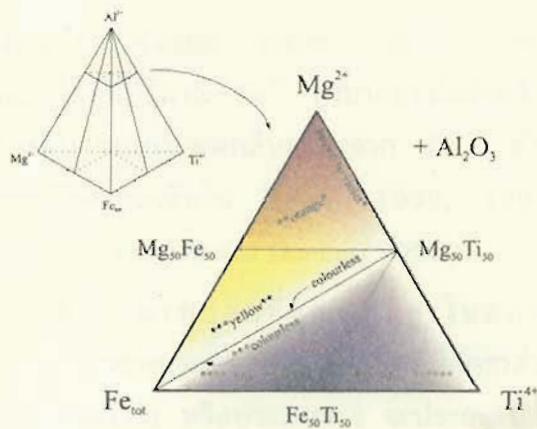
เตาเผาที่นักเผาพลอยไทยได้ประดิษฐ์คิดค้น และพัฒนาขึ้นมา นั้น มีทั้งเตาถ่านโค้กและเตาน้ำมัน ที่มีสภาพบรรยากาศในเตาเป็นแบบขาดออกซิเจน เหมาะสำหรับเผาพลอยให้ได้สีน้ำเงินที่สวยงาม สำหรับเตาไฟฟ้าที่ใช้ลดอุณหภูมิและความชื้นและควบคุม บรรยากาศโดยแก๊สที่ส่งเข้าไปในห้องเผา และเตาแก๊ส ที่ใช้แก๊สหุงต้มกับออกซิเจนบริสุทธิ์ เตาสองประเภท หลังนี้สามารถควบคุมสภาพบรรยากาศให้เป็นแบบ ออกซิเจนพอเพียง หรือขาดออกซิเจนแบบอ่อน ๆ ได้ จึงเป็นเตาที่เหมาะสมสำหรับเผาพลอยแดง เพื่อถอยสี อมม่วงหรือน้ำเงินที่มักพบในพลอยทับทิมไม่เผา ทำให้ได้พลอยทับทิมที่มีสีแดงสดใสขึ้น เพราะสีอมม่วง และหมาหายไป อีกทั้งยังเหมาะสำหรับเผาถอยสีใน พลอยสีน้ำเงินที่เข้มเกินไป และเหมาะสำหรับเผา พลอยบุษราคัมให้ได้สีเหลืองสดใสสวยงามอีกด้วย

การเผาพลอยทับทิมและแซปไฟร์แบบดั้งเดิม ที่อุณหภูมิสูง ในสภาพบรรยากาศแบบต่าง ๆ ให้ได้สี สันที่สวยงามนั้น ปริมาณเซ็สหรือปริมาณธาตุมลทิน ที่ทำให้เกิดสีที่มีในโครงสร้างพลอยอยู่ก่อนนั้น มีความ สำคัญต่อการเกิดสีเป็นอย่างมาก ถ้าพลอยเม็ดไหนไม่มี เซ็สหรือมีน้อยเกินไป จะเผาพลอยเม็ดดังกล่าวด้วย วิธีดั้งเดิมอย่างไรก็ไม่สามารถจะทำให้เกิดสีขึ้นได้ ถึงตรงนี้อาจมีคำถามขึ้นมาได้ว่า ก็พลอยมีเซ็สอยู่ ก่อนแล้ว การเผาแบบดั้งเดิมทำไมได้เป็นการเพิ่มหรือ

ลดปริมาณเซ็สแต่อย่างไร ทำไมจึงไม่เกิดสีสันที่สวยงามในพลอยที่ไม่ได้เผา ทำไมจึงต้องนำพลอยไปเผา ก่อนจึงได้สีที่สวยงาม คำตอบตรงนี้สามารถอธิบายได้ โดยอาศัยความรู้ทางแร่วิทยาของแร่ทับทิมและแซปไฟร์ แบบง่ายว่า ธาตุมลทินที่มีอยู่ในโครงสร้างพลอยตาม ธรรมชาตินั้น ไม่ได้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงแล้วได้สีที่ดีที่สุด การเผาเป็นการไปปรับสภาพออกซิเดชันและตำแหน่งธาตุของ มลทินในโครงสร้างให้เหมาะสม ทำให้มีการดูดกลืน แสงแล้วปรากฏสีที่ดีที่สุด

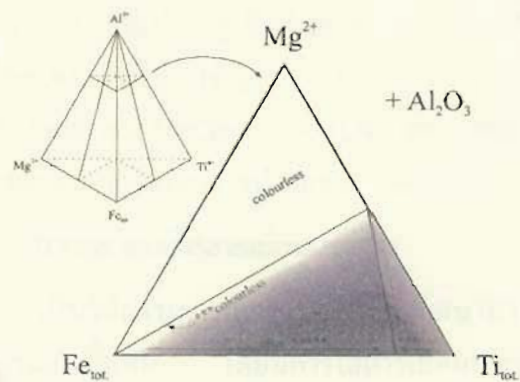
พลอยเผาที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศ แบบออกซิเจนพอเพียง อาจปรากฏเป็นสีเหลือง หรือ ไม่มีสี หรือสีน้ำเงิน ก็ได้ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก ปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก ไททานเนียม และ แมกนีเซียม ที่เข้าไปแทนที่ธาตุอะลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 สีที่เห็นสามารถอธิบายได้โดยรูปสามเหลี่ยมที่ แสดงในรูปที่ 1

พลอยเม็ดที่มีปริมาณธาตุไททานเนียม (Ti) และแมกนีเซียม (Mg) ใกล้เคียงกัน หรือมีอัตราส่วน Mg/Ti ประมาณ 1 จะไม่มีสีหลังเผา เพราะ Mg^{2+} และ Ti^{4+} ทั้งหมดจะไปจับเป็นกลุ่มโครงสร้างย่อย $MgTiO_3$ (Geikielite clusters) ซึ่งไม่มีสี สำหรับ พลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti น้อยกว่า 1 จะได้สี น้ำเงินหลังเผา เพราะหลังจากที่ Mg^{2+} และ Ti^{4+} ไป จับเป็นกลุ่มโครงสร้างย่อย $MgTiO_3$ แล้ว ยังมี Ti^{4+} เหลืออยู่อีก ดังนั้น Ti^{4+} ที่เหลือจึงสามารถไปจับเป็น กลุ่มโครงสร้างย่อย $FeTiO_3$ ได้ ทั้งนี้ภายในกลุ่ม โครงสร้างย่อย $FeTiO_3$ จะมีการแลกเปลี่ยนระหว่าง Fe^{2+} และ Ti^{4+} เกิดขึ้น (Fe^{2+}/Ti^{4+} intervalence charge transfer) ทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนช่วงคลื่น บางช่วงคลื่น ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็คือ เกิดสีน้ำเงินนั่นเอง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Townsen 1968; Ferguson and Fielding, 1972; Häger, 1992, 1996 and 2001; Emmett and Douthit, 1993) ส่วนพลอยเม็ด ที่มีอัตราส่วน Mg/Ti มากกว่า 1 จะได้สีเหลืองหลังเผา เพราะ Mg^{2+} กับ Fe^{3+} จะไปทำให้เกิดศูนย์กลางสี



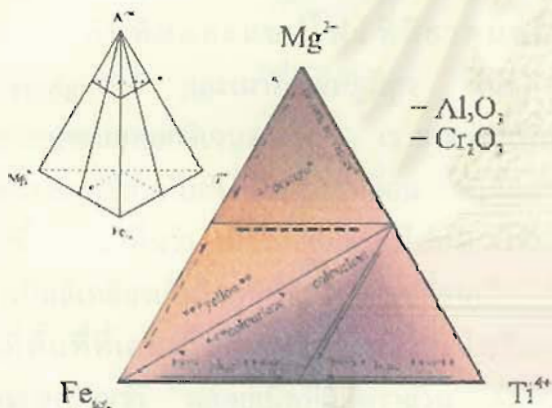
รูปที่ 1 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก โทเทเนียม และแมกนีเซียม ในทับทิมและแซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ 1850°C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (Häger, 1992 and 2001)

- * colour centre due to Mg
- ** colour centre due to Mg and Fe
- *** yellow due to Fe³⁺
- **** Fe²⁺/Fe³⁺-charge transfer green due to Fe³⁺

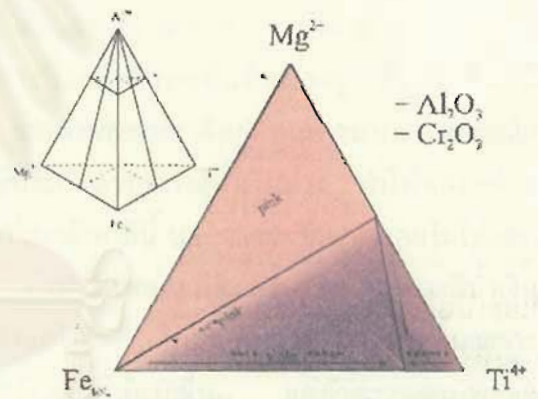


รูปที่ 2 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก โทเทเนียม และแมกนีเซียม ในทับทิมและแซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ 1750°C ในสภาวะขาดออกซิเจน (Häger, 1992 and 2001)

- ***** Fe²⁺/Ti⁴⁺-charge transfer
- ***** precipitation of TiO₂



รูปที่ 3 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก โทเทเนียม แมกนีเซียม และ โครเมียมในทับทิมและ แซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ 1850°C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (Häger, 1992 and 2001)



รูปที่ 4 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก โทเทเนียม แมกนีเซียม และโครเมียม ในทับทิมและ แซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ 1750°C ในสภาวะขาดออกซิเจน (Häger, 1992 and 2001)



รูปที่ 5 ลักษณะรอยแตกเกิดการหลอมและสมานด้วยสารเชื่อมประสาน สังเกตฟองอากาศด้านล่าง (ถ่ายภาพโดย ทนง ลีลาวัดนสุข)



รูปที่ 6 ลักษณะช่องว่างที่อุดด้วยสารเชื่อมประสานที่มีความวาวน้อยกว่าพลอยทับทิม (ถ่ายภาพโดยทนง ลีลาวัดนสุข)

เหลืองที่เสถียร (stable yellow colour centre) ในพลอยเม็ดที่มีปริมาณ Fe^{3+} สูงมากอาจได้สีเหลืองที่มีสาเหตุมาจากการดูดกลืนเนื่องจาก Fe^{3+} ด้วย (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Häger, 1992, 1993, 1996, 2001; Emmett and Douthit, 1993)

แต่ถ้าเผาพลอยที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน พลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti น้อยกว่า 1 หรือประมาณ 1 จะปรากฏเป็นสีน้ำเงินหลังเผา เพราะเกิดกลุ่มโครงสร้างย่อย $FeTiO_3$ โดยที่ Fe^{3+} บางส่วนอาจถูกรีดิวซ์ไปเป็น Fe^{2+} เพิ่มขึ้นด้วย ส่วนพลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti มากกว่า 1 จะไม่มีสี เพราะศูนย์กลางสีเหลืองถูกทำลาย

สำหรับพลอยที่มีธาตุมลทิน โครเมียม อยู่ด้วย ธาตุโครเมียมจะทำให้เกิดการเลือกดูดกลืนช่วงคลื่นที่ทำให้สีที่ปรากฏออกมาเป็นสีแดง หรือสีชมพู ดังนั้นในพลอยทับทิมและแซปไฟร์ ที่มีธาตุมลทิน $Fe+Ti+Mg+Cr$ และเผาที่อุณหภูมิสูง ในสภาพบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง เราสามารถเพิ่มสีแดงหรือชมพูซ้อนทับลงไปสามเหลี่ยม ดังที่แสดงในรูปที่ 3 จะเห็นว่า เมื่อใส่สีชมพูเข้าไปบริเวณพื้นที่ที่เคยเป็นสีเหลืองเดิมในรูปที่ 1 จะเปลี่ยนเป็นสีส้ม และที่พื้นที่ที่เคยเป็นสีน้ำเงินจะกลายเป็นสีม่วง นั่นหมายความว่า พลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti ประมาณ 1 จะปรากฏเป็นสีแดงหรือชมพูหลังเผา พลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti น้อยกว่า 1 จะปรากฏเป็นสีแดงอมม่วงหลังเผา ส่วนพลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti มากกว่า 1 จะปรากฏเป็นสีแดงอมส้มหลังเผา

สำหรับพลอยที่มีธาตุมลทิน $Fe+Ti+Mg+Cr$ และเผาที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศแบบขาดออกซิเจน บริเวณพื้นที่ที่ไม่มีสีในสามเหลี่ยมรูปที่ 2 ก็จะเปลี่ยนเป็นสีแดงหรือชมพู และที่พื้นที่ที่เคยเป็นสีน้ำเงินก็จะกลายเป็นสีม่วงในสามเหลี่ยมรูปที่ 4 นั่นหมายความว่า พลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti น้อยกว่า 1 หรือประมาณ 1 จะปรากฏเป็นสีแดงอมม่วงหลังเผา เพราะ Fe^{3+} บางส่วนอาจถูกรีดิวซ์ไปเป็น

Fe^{2+} เพิ่มขึ้น ส่วนพลอยเม็ดที่มีอัตราส่วน Mg/Ti มากกว่า 1 จะปรากฏเป็นสีแดงหรือชมพู (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Hughes, 1997; Themelis, 1992; Smith and McClure, 2002; จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ 2548 ในเอกสารประกอบการสัมมนา)

การเผาแบบใส่สารเชื่อมประสาน

เป็นวิธีการเผาพลอยเนื้อแข็งที่พัฒนามาจากการเผาแบบดั้งเดิม โดยมีการใส่สารเชื่อมประสานพวกบอแรกซ์ และ/หรือซิลิกา แล้วเผาที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง สารเชื่อมประสานจะหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมตัวของพลอย จึงทำหน้าที่ช่วยสมานรอยแตก ร้าว และช่วยอุดช่องว่างไม่ให้พลอยแตกในขณะเผาและภายหลังเผา นอกจากนี้สารเชื่อมประสาน ยังช่วยบดบังรอยแตกให้เห็นด้วยตาเปล่าได้ยากขึ้น เพราะสารเชื่อมประสานมีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าอากาศ การเผาด้วยวิธีนี้ เดิมทีพัฒนามาเพื่อเผาพลอยทับทิมมวง ซึ่งปรกติมักมีรอยแตก ร้าวตามธรรมชาติอยู่ค่อนข้างมาก และผลึกพลอยมักมีแกนตรงกลางสีน้ำเงินมวง ทำให้พลอยด้อยคุณภาพที่เผาด้วยวิธีนี้ นอกจากจะรักษาพลอยไม่ให้แตก ร้าวแล้ว ยังทำให้พลอยมีสีแดงสดขึ้น เพราะสีน้ำเงินมวงถูกกำจัดไป และพลอยจะดูสะอาดขึ้นเพราะรอยแตก ร้าวเห็นได้ยากขึ้น แต่ถ้าตรวจสอบพลอยภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี มักจะเห็นรอยแตกที่ถูกสมานเสมอ (ดูรูปที่ 5 และ 6) วิธีการนี้ต่อมาได้มีการนำไปใช้กับพลอยเนื้อแข็งจากแหล่งอื่น ๆ อีกด้วย (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Hughes, 1997; Smith and McClure, 2002; Themelis, 1992; Themelis, 2004; LMHC Information Sheet No.1, 2004; จักรพันธ์ สุทธิรัตน์และคณะ 2548 ในเอกสารประกอบการสัมมนา)

การเผาแบบแพร่สีระดับต้น

เป็นวิธีการเผาที่ใช้กับ พลอยเนื้อแข็งที่ไม่มีสีรวมทั้งพลอยเผาด้วยวิธีดั้งเดิมแล้วไม่เกิดสีหรือสีอ่อนไปให้มีสีน้ำเงิน หรือแดง โดยเผาพร้อมกับสารที่ทำให้เกิดสี

สำหรับพลอยที่ต้องการเผาให้ได้สีน้ำเงินมักใช้สารประกอบของธาตุโทเทเนียม ส่วนพลอยที่ต้องการเผาให้ได้สีแดงมักใช้สารประกอบของธาตุโครเมียม การเผาด้วยวิธีนี้จะทำให้ธาตุที่ทำให้เกิดสีแพร่ผ่านผิวเข้าไปในโครงสร้างพลอยจากภายนอก เนื่องจากธาตุดังกล่าวมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับโครงสร้าง Al_2O_3 ดังนั้น การแพร่ของธาตุเหล่านี้เข้าสู่เม็ดพลอย จึงเป็นไปได้ด้วยอัตราที่ค่อนข้างช้ามาก ถึงแม้จะเผาที่อุณหภูมิสูง และใช้เวลาเผาที่ยาวนาน พลอยที่เผาด้วยวิธีดังกล่าว จึงปรากฏว่ามีขอบสีบาง ๆ บริเวณผิวเท่านั้น (ดูรูปที่ 7 และ 8) เมื่อจุ่มพลอยดังกล่าว ลงในของเหลวความหนาแน่นสูง มักเห็นสีเข้มเฉพาะบริเวณขอบเท่านั้น (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Hughes, 1997; Smith and McClure, 2002; จักรพันธ์ สุทธิรัตน์และคณะ 2548 ในเอกสารประกอบการสัมมนา)

การเผาด้วยวิธีการเติมธาตุเบริลเลียม

หรือเรียกสั้น ๆ ว่า การเผากับเบริลเลียม เป็นวิธีการเผาพลอยเนื้อแข็งโดยการแพร่ธาตุเบริลเลียมเข้าไปในโครงสร้างพลอยจากภายนอก ได้มีการพิสูจน์แล้วว่า ธาตุเบริลเลียมกับเหล็ก สามารถทำให้เกิดศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียรที่อุณหภูมิสูงในสภาพบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียงได้ เช่นเดียวกับธาตุแมกนีเซียม ดังที่จะกล่าวสรุปในย่อหน้าถัดไป ดังนั้นจึงสามารถเพิ่ม Be^{2+} เข้าไปตรงมุม Mg^{2+} ในสามเหลี่ยมที่แสดงในรูปที่ 9 และ 10

จากการศึกษาพลอยทับทิมและแซปไฟร์ธรรมชาติ และพลอยสังเคราะห์ชนิดไรสี สีน้ำเงิน และสีชมพูจำนวนหนึ่ง ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีเติมธาตุเบริลเลียม (Pisutha-Amund and others, 2002, 2003, 2004a, 2004b) โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์และวัดผลขั้นสูงเช่น เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุร่องรอยในระดับหนึ่งส่วนในล้านส่วนที่เรียกว่า LA-ICP-MS เครื่องมือวัดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็น (UV-Vis

Spectrophotometer) และการฉายรังสีเอกซ์ สามารถสรุปสั้น ๆ ได้ดังนี้

จากผลวิเคราะห์ธาตุร่องรอยในพลอยที่ผาดครั้ง พบว่ามีธาตุเบริลเลียมแพร่เข้าไปในเนื้อพลอยจากภายนอก จากการเปรียบเทียบแถบการดูดกลืนคลื่นแสง และผลวิเคราะห์ทางเคมีของธาตุร่องรอยทั้งหมด ผนวกกับการทดลองเผาในห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 11 ถึง 17) พบว่าธาตุเบริลเลียม ไม่ได้เป็นตัวทำให้เกิดสีด้วยตัวมันเอง แต่ธาตุเบริลเลียมมีส่วนร่วมในกลไกของการเกิดสีเหลือง โดยร่วมกับธาตุที่มีอยู่แล้วในตัวพลอยได้แก่ ธาตุเหล็ก แมกนีเซียม และโทเทเนียม ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความบกพร่องของโครงสร้างผลึกภายในเนื้อพลอยและสภาวะบรรยากาศการเผาที่ต้องมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ

ยังพบอีกว่าธาตุเบริลเลียมและแมกนีเซียมทำหน้าที่เช่นเดียวกัน คือไปจับเป็นกลุ่มโครงสร้างย่อย $BeTiO_3$ และ $MgTiO_3$ ที่ไม่มีสีก่อน หลังจากนั้นถ้ามีธาตุเบริลเลียมและ/หรือแมกนีเซียมเหลืออยู่อีก (หรือกล่าวง่าย ๆ ว่า ถ้าในเม็ดพลอยนั้นมีอัตราส่วน $(Be+Mg)/Ti$ มากกว่า 1) ธาตุทั้งสองดังกล่าวที่เหลือจะไปทำหน้าที่ยึดศูนย์กลางสีเหลือง (หรือ Yellow color center ที่เกิดจากความบกพร่องของโครงสร้างผลึกร่วมกับธาตุเหล็กในสภาวะการเผาที่มีออกซิเจนพอเพียง) ให้เสถียรหรือคงที่ไม่หายไป (รูปที่ 9) สีเหลืองที่เกิดขึ้นเมื่อไปผสมกับสีชมพูหรือแดงที่เกิดจากธาตุโครเมียมในเนื้อพลอย ทำให้เกิดเป็นสีส้ม หรือสีชมพูอมส้มขึ้น (รูปที่ 10) พบว่าสีดังกล่าวมีความคงทนไม่ซีดจางเมื่อเวลาผ่านไป แต่ถ้าเผากับเบริลเลียมแล้ว ปริมาณของธาตุเบริลเลียมรวมกับแมกนีเซียมในเนื้อพลอย ยังน้อยกว่าหรือเท่ากับธาตุโทเทเนียม พลอยก็ยังคงเป็นสีน้ำเงิน หรือไม่มีสี หรือสีชมพูหรือแดงเหมือนเดิม จนกว่าธาตุเบริลเลียมที่แพร่เข้าไปจากภายนอกรวมกับธาตุแมกนีเซียมแล้ว มีปริมาณมากกว่าธาตุโทเทเนียมอยู่จำนวนหนึ่ง สีเหลืองหรือสีส้มจึงเกิดขึ้นได้ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติม

ใน Pisutha-Armond and others, 2002, 2003, 2004a, 2004b)

การเผาผลายด้วยวิธีการเติมธาตุเบริลเลียม ทำให้พลอยไม่มีสีหรือสีน้ำเงินเขียวที่ไม่สามารถเผาเป็นสีเหลืองด้วยวิธีดั้งเดิมได้ สามารถเผาเป็นสีเหลืองได้ (รูปที่ 11 และ 12) และทำให้พลอยสีชมพูเผาเป็นพลอยสีส้มได้ (รูปที่ 15) เพราะการเผาแบบนี้เป็นการเพิ่มอัตราส่วน (Mg+Be)/Ti ในโครงสร้างพลอย เนื่องจากธาตุเบริลเลียมมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้าง Al_2O_3 ได้โดยง่าย ทำให้สีที่เกิดขึ้นสามารถซึมเข้าไปได้ค่อนข้างลึกหรือซึมเข้าไปทั่วทั้งเม็ดพลอยได้ (ดูรายละเอียดอื่น ๆ เพิ่มเติมใน Emmett and others, 2003; Peretti and Günther, 2002; Peretti and others, 2003; Themelis, 2003; Schmetzer and Schwartz, 2004, Atichat and others, 2004; LMHC Information Sheet No.2, 2004; Hanni and others, 2004; จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ 2548 ในเอกสารประกอบการสัมมนา)

การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีอื่น ๆ

การฉายรังสี

พลอยแซปไฟร์ไร้สีและทับทิม อาจฉายรังสีให้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือสีส้มได้ พบว่าสีเหลืองที่ได้จากการฉายรังสี เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองที่ไม่เสถียร (unstable yellow colour centre) ที่มีรูปแบบการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกับรูปแบบดูดกลืนที่เกิดจากศูนย์กลางสีเหลืองที่เสถียร แต่สีเหลืองที่เกิดจากการฉายรังสีจะซีดจางลงอย่างรวดเร็ว เมื่อพลอยสัมผัสกับความร้อนและแสงสว่างเพียงแค่ว่าจากหลอดไฟชนิดไส้หลอด 100 แสงเทียนเท่านั้น (fading test) เนื่องจากสีพลอยชนิดนี้ซีดลงได้ง่าย วิธีการนี้จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Pisutha-Armond and others, 2004a; Schmetzer and others, 1983)

การย้อมสี

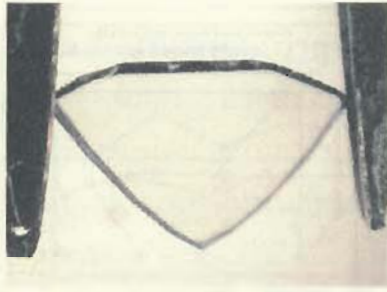
ทับทิม บางครั้งใช้น้ำมันที่มีสีแดงใส่ให้มีสีแดงสวยขึ้น สีนํ้ามันนี้จะซึมเข้าไปในรอยแตกและช่องว่างที่ผิว ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความเข้มของสีให้ทับทิมแลดูมีสีสวยขึ้น

การอุดรอยแตกด้วยแก้วตะกั่ว

เป็นวิธีปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมและแซปไฟร์ โดยเฉพาะทับทิมและแซปไฟร์สีส้มชมพูที่มาจากแหล่ง Ruby Star ในประเทศมาดากัสการ์ ที่พบเมื่อประมาณต้นปี 2547 วิธีนี้ไม่ใช่วิธีใหม่ แต่เป็นวิธีที่เคยใช้กับเพชรมาก่อน เป็นวิธีการอุดรอยแตกและช่องว่างในทับทิม ด้วยแก้วที่ผสมสารตะกั่วหรือบิสมัท เพื่อช่วยเพิ่มค่าดัชนีหักเหของแก้วให้ใกล้เคียงกับทับทิม มีผลทำให้ไม่เห็นรอยแตกหรือช่องว่าง ทำให้พลอยดูมีสีสวยและใสสะอาดขึ้น วิธีปรับปรุงคุณภาพนี้จะแตกต่างจากการอุดรอยแตกด้วยวิธีการเผาแบบใส่สารเชื่อมประสาน เพราะวิธีนี้จะทำที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นรอยแตกจะไม่เกิดการหลอมและเชื่อมประสานเหมือนกับการเผาที่กล่าวมา เพียงแต่รอยแตกถูกปิดบังด้วยแก้วที่อุดเข้าไป ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อัญมณี และด้วยเครื่องมือขั้นสูง (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมใน Kitawaki, 2004; Rockwell and Breeding, 2004; GIT Lab Notes, 2004; LMHC Information Sheet No.3, 2005; จักรพันธ์ สุทธิรัตน์ และคณะ 2548 ในเอกสารประกอบการสัมมนา)

การตลาด

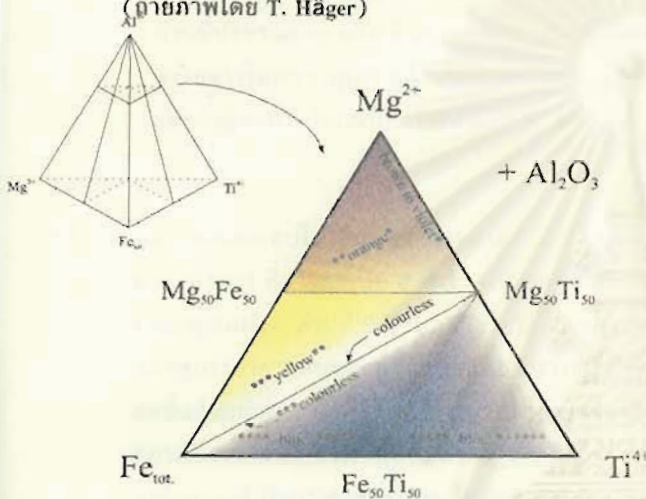
การปรับปรุงพลอยทับทิมและแซปไฟร์ หรือพลอยอื่น ๆ ที่มีคุณภาพด้อยด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ขึ้นมาให้เป็นพลอยที่สวยงาม เป็นที่ยอมรับในตลาดพลอยได้นั้น เป็นเรื่องที่ต้องอาศัยไม่เพียงแต่ความรู้ความสามารถ ความเพียรพยายาม และประสบการณ์ของผู้เผาเป็นอย่างมาก ยังต้องอาศัยเงินทุนในการแสวงหาวัตถุดิบมาป้อนอุตสาหกรรม และเงินลงทุนในการประดิษฐ์



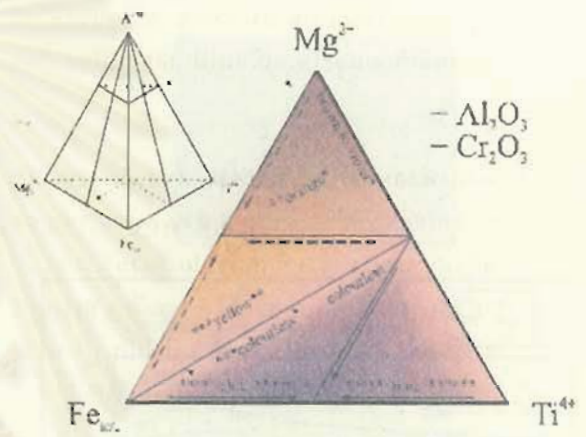
รูปที่ 7 พลอยเฒาแบบแพร์สีระดับต้นที่ตัดเป็นแผ่นบาง ๆ
สังเกตขอบน้ำเงินบริเวณขอบหนาประมาณ 0.09 มม.
ที่เกิดจากการแพร์ธาตุไทเทเนียม จากภายนอก
(ถ่ายภาพโดย T. Häger)



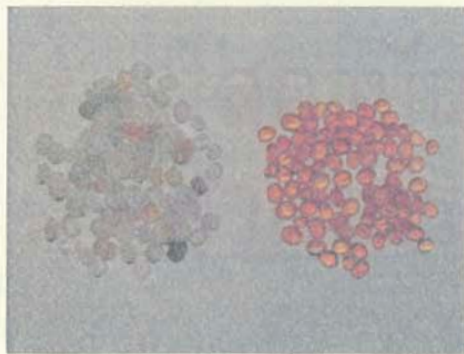
รูปที่ 8 พลอยเฒาแบบแพร์สีระดับต้นสังเกตสีน้ำเงิน
บริเวณขอบ ที่เกิดจากการแพร์ธาตุไทเทเนียม
จากภายนอก (ถ่ายภาพโดยชนิชา สมบุญ)



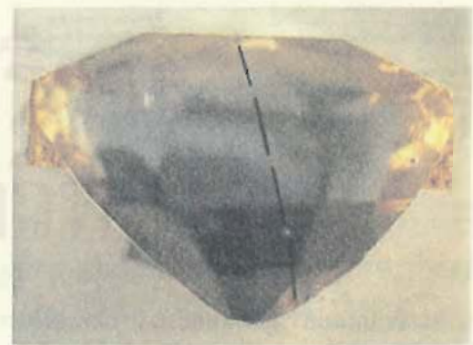
รูปที่ 9 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุเหล็ก
ไทเทเนียม แมกนีเซียม และเบริลเลียม ในทับทิมและ
แซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ 1850°C ในสภาวะออกซิเจน
พอเพียง (ดัดแปลงจาก Häger, 1992 and 2001)



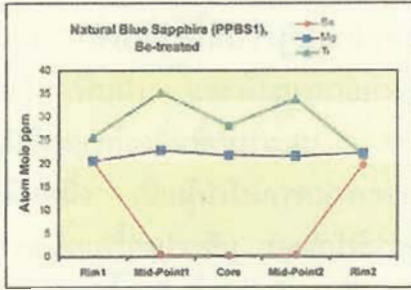
รูปที่ 10 สามเหลี่ยมแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมลทินธาตุ
เหล็ก ไทเทเนียม แมกนีเซียม โครเมียม และ
เบริลเลียม ในทับทิมและแซปไฟร์ เเผที่อุณหภูมิ
1850°C ในสภาวะออกซิเจนพอเพียง (ดัดแปลง
จาก Häger, 1992 and 2001)



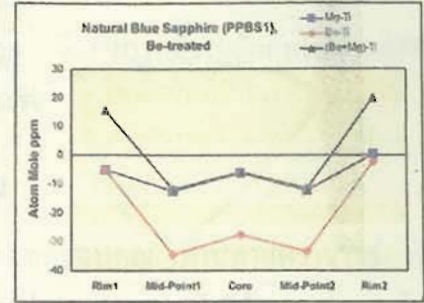
รูปที่ 11 เปรียบเทียบพลอยธรรมชาติก่อนเผากับ
พลอยที่เผด้วยวิธีเติมธาตุเบริลเลียม
(ถ่ายภาพโดยสุกัศ สิงห์บำรุง)



รูปที่ 12 แสดงลักษณะขอบสีเหลืองในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน
ธรรมชาติที่เผด้วยวิธีเติมธาตุเบริลเลียม แล้วผ่าครึ่ง
(ตัวอย่าง PPBS1) จุดบนเส้นสีดำจำนวน 5 จุดคือ
ตำแหน่งที่ได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอยด้วย
เครื่องมือ LA-ICP-MS จุดตรงขอบ 2 จุดอยู่ในขอบ
สีเหลือง จุดตรงกลาง 3 จุดอยู่ในบริเวณสีน้ำเงิน
(ถ่ายภาพโดย ชนิชา สมบุญ และปณิธิร์ย์ ล้อมทอง)

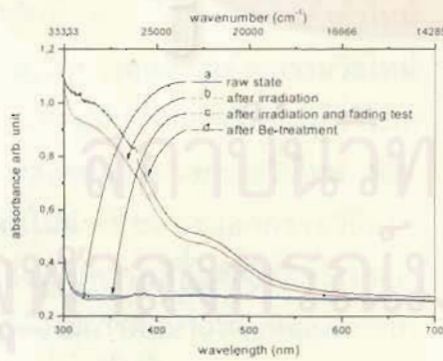


รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณธาตุร่องรอยจากขอบด้านหนึ่งไปยังขอบอีกด้านหนึ่งของตัวอย่างในรูปที่ 12 (ตัวอย่าง PPBS1) พบว่าบริเวณขอบสีเหลืองทั้งสองด้านมีปริมาณธาตุเบริลเลียมสูง ส่วนบริเวณสีน้ำเงินตรงกลางไม่พบธาตุเบริลเลียม สำหรับปริมาณธาตุแมกนีเซียมและไทเทเนียมไม่เปลี่ยนแปลงเด่นชัด



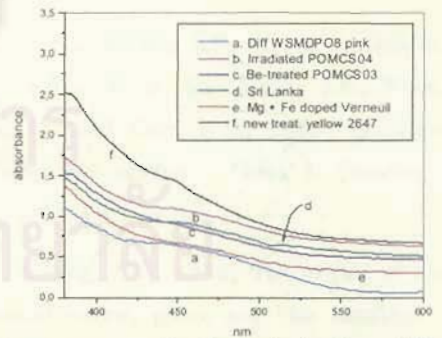
รูปที่ 14 ตัวอย่างในรูปที่ 12 (ตัวอย่าง PPBS1) ยังพบว่าบริเวณขอบทั้งสองด้าน มีปริมาณ (Be+Mg) มากกว่า Ti ในขณะที่บริเวณสีน้ำเงินตรงกลางมีปริมาณ (Be+Mg) น้อยกว่า Ti

รูปที่ 15 แสดงพลอยแซปไฟร์สีชมพูจากแหล่งอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ที่ผ่าออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนก่อนเผา มีสีชมพูอมม่วง ส่วนที่ 2 นำไปเผาด้วยวิธีแบบดั้งเดิมในสภาพบรรยากาศแบบออกซิเจนพอเพียง ปรากฏเป็นสีชมพูสดขึ้นสีอมม่วงหายไป ส่วนที่ 3 นำไปเผากับเบริลเลียมในสภาพบรรยากาศอย่างเดียวกัน ปรากฏเป็นสีส้ม ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอย ไม่พบธาตุเบริลเลียมในเนื้อพลอยสีชมพูที่เผาแบบดั้งเดิม แต่พบปริมาณธาตุเบริลเลียมสูงในเนื้อพลอยสีส้มที่เผากับเบริลเลียม สำหรับปริมาณธาตุแมกนีเซียม และ ไทเทเนียมไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัด



รูปที่ 16

การเปรียบเทียบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและตามองเห็น วัดจากพลอยแซปไฟร์สีชมพูจากแหล่งอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ ที่ใส่เฉพาะธาตุเหล็ก แล้วนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการดั้งเดิม (a) แถบการดูดกลืนคลื่นแสงก่อนการปรับปรุงคุณภาพของพลอยซึ่งไม่มีสี (b) หลังนำไปฉายรังสีเอกซ์ปรากฏเป็นสีเหลือง (c) หลังการทำ fading test สีเหลืองซีดจางหายไป (d) หลังการเผากับเบริลเลียมปรากฏเป็นสีเหลืองอีกครั้งและไม่ซีดจางหลังจากทำ fading test แถบการดูดกลืนทั้งหมดทำการวัดโดยให้ระนาบการสั่นของคลื่นแสงตั้งฉากกับแกนแสง (o-ray) โปรดสังเกตลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันของสีเหลืองที่เกิดจากการฉายรังสีและที่เผากับเบริลเลียม



รูปที่ 17

การเปรียบเทียบแถบการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและตามองเห็น วัดจากพลอยแซปไฟร์สีเหลืองที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการดั้งเดิม (b) แสดงแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของแซปไฟร์ธรรมชาติไร้สีที่เป็นสีเหลืองหลังฉายรังสีเอกซ์ (c และ f) แซปไฟร์ธรรมชาติไร้สีก่อนเผาเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหลังเผากับเบริลเลียม (d) แซปไฟร์ธรรมชาติสีเหลืองจากศรีลังกา (a) แถบการดูดกลืนที่เหลืองจากการนำแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของแซปไฟร์ธรรมชาติสีชมพูอ่อนก่อนเผา หักลบจากแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพลอยที่เผากับเบริลเลียมที่ปรากฏเป็นสีส้มหลังเผา (e) แซปไฟร์สีชมพูจากแหล่งอิลากากา ประเทศมาดากัสการ์ที่ใส่เฉพาะธาตุเหล็กและแมกนีเซียม โปรดสังเกตลักษณะการดูดกลืนที่คล้ายคลึงกันของสีเหลืองที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีต่าง ๆ และคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 16 ด้วย

คิดค้นเตาเผา สิ่งเหล่านี้นับว่าผู้ประกอบการไทย ได้ทำการต่อสู้ ฟืนฝ่า และพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง โดยอาศัยภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เหมาะสม จนเป็นผล สำเร็จได้ระดับหนึ่ง เป็นผู้นำในการเผาพลอย การ เจียรระไน การผลิตเครื่องประดับ และทำให้ประเทศไทย เป็นตลาดค้าพลอยเนื้อแข็งที่สำคัญในระดับสากล

อย่างไรก็ตาม การแข่งขันในตลาดอัญมณี ได้ทวีความรุนแรง ยุ่งยาก และซับซ้อน ขึ้นเป็นลำดับ การที่จะดำรงไว้ซึ่งความเป็นผู้นำในตลาดพลอยเนื้อแข็ง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำทุกวิถีทาง ในการ สร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคในสินค้าพลอยเนื้อ แข็งของไทยให้คงอยู่และเพิ่มมากขึ้นต่อไป เนื่องจาก สินค้าอัญมณีเป็นสินค้าฟุ่มเฟือย ถ้าผู้บริโภคขาด ความเชื่อมั่นในพลอยทับทิมและแซปไฟร์ของไทยแล้ว เขาอาจจะไปเลือกใช้พลอยชนิดอื่นหรือเพชรแทน ก็เป็นไปได้ การสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคใน สินค้าของเราเท่านั้น จะเป็นหนทางเดียวที่จะสามารถ แข่งขันและขายสินค้าของเราได้ นอกเหนือจากความ พยายามที่จะสร้าง Brand Name เช่น การใช้สโลแกนว่า “พลอยไทย” การประชาสัมพันธ์ การหาตลาดใหม่ ๆ ในเชิงรุกแล้ว สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งในการสร้าง ความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภค ก็คือเมื่อมีสินค้าตัวใหม่ หรือมีพลอยที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรรมวิธีใหม่ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการชี้แจงให้กับผู้บริโภค ทราบก่อนว่า เป็นพลอยที่ผลิตด้วยกรรมวิธีใหม่ ที่ไม่ เหมือนเดิม โดยไม่จำเป็นต้องบอกกรรมวิธีและ กระบวนการผลิตซึ่งเป็นความลับและลิขสิทธิ์เฉพาะ ของผู้เผา อีกทั้งต้องมีการศึกษาถึงสาเหตุและกลไก การเกิดสีว่าเป็นอย่างไร เพื่อที่จะสามารถทำการตรวจสอบ แยกพลอยดังกล่าวออกจากพลอยอื่น ๆ ได้ รวมทั้งต้องมีการกำหนดคำจำกัดความและการเรียกชื่อ พลอยดังกล่าวได้อย่างถูกต้องอีกด้วย เพื่อไม่ให้เกิด ความสับสน และสร้างความมั่นใจ ความเชื่อถือให้กับ ผู้บริโภค ดังนั้นความร่วมมือสร้างสรรค์อย่างบูรณาการ ทั้งจากภาครัฐ สมาคม และภาคเอกชนทั้งผู้ประกอบการ

และผู้เผาพลอย จึงสามารถที่จะผลักดันไปสู่จุดมุ่งหมาย ดังกล่าวได้สำเร็จ

คำขอบคุณ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ท่านศาสตราจารย์ ศักดา ศิริพันธ์ อดีตผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณี และเครื่องประดับแห่งชาติ (สวอ) ที่ได้ส่งเสริมและ สนับสนุนการวิจัยนี้มาอย่างต่อเนื่อง ขอขอบคุณ นักเผาพลอยและผู้ค้าพลอยหลายรายที่ได้ให้ตัวอย่าง พลอยมาทำการวิจัย ขอขอบคุณ Ms Tin Tin Win, Ms Suzy Elhlou จาก GEMOC Key centre, Macquarie University, Australia ที่ได้ช่วยวิเคราะห์ ตัวอย่างด้วยเครื่องมือ LA-ICP-MS งานวิจัยนี้ได้รับ การสนับสนุนทางการเงินจาก สวอ..

บรรณานุกรม

- Atichat, W., Sriprasert, B., Wathanakul, P., Pisutha-Armond, V., Sun, T.T., Puttarat, T., and Leelawatanasuk, T., 2004, Characteristics of “Beryllium” Heat-treated Yellow Sapphires in Proceedings of the 29th IGC, Wuhan, China, p.207-214,
- Emmett, J.L., and Douthit, T.R., 1993. Heat treating the sapphires of Rock Creek, Montana : Gems & Gemology, Vol.29, p.250-272.
- Emmett, J.L., Scarratt, K., McClure, S.F., Moses, T., Douthit, T.R., Hughes, R.W., Novak, S., Shigley, J.E., Wang, W., Bordelon, O., and Kane, R.E., 2003, Beryllium diffusion of ruby and sapphire : Gems & Gemology, Vol.39, No.2, p.84-135.
- Ferguson, J., and Fielding, P.E., 1972, The origins of the colours of natural yellow, green, and blue sapphires : Aust. J. Chem, Vol.25, p.1372-1385.
- Häger, T., 2001, High temperature treatment of natural corundum in Proceedings of the International Workshop on Material Characterization by Solid State Spectroscopy: The Minerals of Vietnam, 4-10 April 2001, Hanoi, p1-10.
- Häger, T., 1996, Farbrelevante Wechselwirkungen von Spurenelementen in Korund : Ph.D. Thesis , University of Mainz

- Häger, T., 1993, Stabilisierung der Farbzentren von gelben natürlichen Saphiren : Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft – Beihefte zum Europ. Jour. of Mineralogy, Vol.5, p.188.
- Häger, T., 1992, Farbgebende und "farbhemmende" Spurenelemente in blauen Saphiren : Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft – Beihefte zum Europ. Jour. of Mineralogy, Vol.4, p.109.
- Hänni, H.A., Krzemnicki, M.S., Kiefert, L., and Chalain, J.P., 2004, A new tool in analytical gemmology : LIBS. in Proceedings of the 29th IGC, Wuhan, China, Vol.63
- Hughes, R.W., 1997, Ruby and Sapphire, RWH Publishing, Boulder, 511p
- GIT Lab Notes, 2004, New treatment on ruby: lead glass filling <http://www.git.or.th>
- Kitawaki, H., 2004, Lead-glass impregnated ruby. Gemmology, Laboratory report of the month of May 2004, GAAJ, Vol.35, No.416, (in Japanese with English translation)
- LMHC, 2004a, Laboratory Manual Harmonization Committee (LMHC) Information Sheet no.1, <http://www.git.or.th>
- LMHC, 2004b, Laboratory Manual Harmonization Committee (LMHC) Information Sheet no. 2, <http://www.git.or.th>
- LMHC, 2005, Laboratory Manual Harmonization Committee (LMHC) Information Sheet no.3, <http://www.git.or.th>
- Peretti, A., and Günther, D., 2002, Colour enhancement of natural fancy sapphires with a new heat-treatment technique (part A) : Contribution to Gemology, Vol.1, p.1-48.
- Peretti, A., Günther, D., and Graber, A.L., 2003, The beryllium treatment of fancy sapphires with a new heat-treatment technique (part B) : Contributions to Gemology, Vol.2, p.21-33
- Pisutha-Armond, V., Häger, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., 2002, A brief summary on a cause of colour in pink-orange, orange and yellow sapphires produced by the "new" heating technique : Journal of Gem and Jewelry, Gem and Jewelry Institute of Thailand (GIT), Vol.3, No.18, p.11-12.
- Pisutha-Armond, V., Häger, T., Wathanakul, P., and Atichat, W., 2004a, Yellow and brown colouration in beryllium treated sapphires : Journal of Gemmology, Vol.29, No.2, p.77-103.
- Pisutha-Armond, V., Haeger, T., Wathanakul, P., Atichat, W., Win, T.T., Leelawatanasuk, T., Somboon, C., and Suthirat, C., 2004b, Chemical Characteristic of "Classical" versus "Beryllium" Heat-Treated Ruby and Sapphire in Proceedings of the 29th IGC, Wuhan, China, p.92-94.
- Pisutha-Armond, V., Wathanakul, P., Atichat, W., Haeger, T., Win, T.T., Leelawatanasuk, T., and Somboon, C., 2003, Beryllium-treated Vietnamese and Mong Hsu rubies, In: Hofmeister, W., Quang, V.X., Doa, N.Q., and Nghi, T., (eds) in Proceedings of the 2nd International Workshop on Geo- and Material-Science on Gem-Minerals of Vietnam, 1-8 October 2003, Hanoi, p.171-5.
- Rockwell, K.M., and Breeding, C.M., 2004. Rubies, clarity enhanced with a lead glass filler. Gems & Gemology, Vol.40, No.3, p.247-249.
- Schmetzer, K., Bosshard, G., and Hänni, H.A., 1983, Naturally coloured and treated yellow and orange-brown sapphires : Journal of Gemmology, Vol.18, p.607-622.
- Schmetzer, K., and Schwarz, D., 2004, The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pinkish orange sapphires – a review. Journal of Gemmology, Vol.29, No.3, p.129-162.
- Smith, C.P., and McClure, S.F., 2002. Chart of commercially available gem treatments : Gems & Gemology, Vol.38, No.4, p.294-300.
- Themelis, T., 1992, The heat treatment of ruby and sapphire : GemLab Inc., RWHL Publishing, 244p.
- Themelis, T., 2003, Beryllium-treated rubies and sapphires, 48p., printed in Thailand.
- Themelis, T., 2004, Flux-enhanced rubies and sapphires, 48p., printed in Thailand.
- Townsend, M.G., 1968, Solid State Communication, Vol.6, p.81.



UNIVERSITY OF MICHIGAN LIBRARY