



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคโนโลยีของการเผาทับทิม และพลอยแซปไฟร์

โดย รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ ชนสุทธิพิทักษ์ และคณะ

กันยายน 2547

สัญญาเลขที่ RDG4550029

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคโนโลยีของการเผาถับทิม และพลอยแซปไฟร์

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. รศ.ดร.ธีรพงศ์ ธนสุทธิพิทักษ์	ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ผศ.ดร.ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์	ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. นางสาว ศศิประภา ต่อขุนกุล (1 ต.ค. 2544 ถึง 30 ก.ย. 2546)	-
4. นางสาว จิรวดี พงศ์นิลภัทร์ (1 ต.ค. 2546 ถึง 30 ก.ย. 2547)	-

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยร่วมกับสำนักงาน
เศรษฐกิจอุตสาหกรรม

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเทคโนโลยีของการเผาไหม้และพลอยแซปไฟร์” ได้รับทุนสนับสนุนจากแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2 (โดยมีสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นหน่วยงานรับผิดชอบ) เป็นเงินสองล้านบาท ในระยะเวลา 36 เดือน ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2544 มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพพลอยตระกูลออร์นดัมจากประเทศมาดากัสการ์ด้วยความร้อนหรือการเผาตามหลักวิทยาศาสตร์ เพื่อให้ทราบเงื่อนไขตั้งแต่ต้นที่จะบ่งชี้ว่าพลอยเม็ดหนึ่งๆ จะนำมาเผาแล้วได้ผลหรือไม่ โดยเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์เคมีกับลักษณะปรากฏทางกายภาพของพลอย และเพื่อทำคู่มือแนะนำขั้นตอนการเผาพลอยออร์นดัม

ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการวิจัยเป็นพลอยตระกูลออร์นดัมทั้งทับทิม และแซปไฟร์สีต่างๆ จากแหล่งพลอย 5 แหล่งของมาดากัสการ์ โดยทับทิมมาจาก 2 แหล่งทางตอนกลางด้านตะวันออกของประเทศ (Andilamena และ Vatomandry) รวม 461 เม็ด 462.36 กะรัต แซปไฟร์สีน้ำเงิน และน้ำเงินปนเหลืองมาจากแหล่งทางตอนเหนือ และตะวันออกเฉียงใต้ (Diego และ Andranondambo) รวม 147 เม็ด 146.04 กะรัต และแซปไฟร์หลากสีจากแหล่งทางตะวันตกเฉียงใต้ (Ilakaka) รวม 5,242 เม็ด 5,961.17 กะรัต โดยใช้วิธีการศึกษาดังนี้

1. ก่อนทดลองเผาตัวอย่างพลอยเหล่านี้ นำมาศึกษา / ตรวจวิเคราะห์ ลักษณะสมบัติทางกายภาพ สมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา ตรวจวัดแถบการดูดกลืนแสง (absorption spectra) โดยเทคนิค UV-Vis-NIR Spectrometry ศึกษาแร่ธาตุในเนื้อพลอยด้วยเทคนิค SEM-EDX และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค electronprobe microanalysis (EPMA) ทั้งนี้ตัวอย่างพลอยที่มีขนาดโตพอจะนำมาตัดออกเป็น 2 ซีก เพื่อใช้เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงก่อนเผาและหลังเผา

2. ทดลองเผาโดยใช้เตา 3 ชนิดคือ เตาไฟฟ้า (ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 1,850 °C) เตาน้ำมัน (ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 1,650 °C) และเตาแก๊ส (ทำอุณหภูมิได้สูงสุด 1,900 °C) โดยใช้ข้อกำหนดต่างๆ

3. ตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างหลังการเผา โดยการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสี ลักษณะปรากฏ มลทินภายใน ความใส องค์ประกอบทางเคมี และแถบการดูดกลืนแสง

สรุปวิธีการศึกษาต่างๆ ต่อตัวอย่างพลอยแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตัวอย่างพลอย / แหล่ง		ทับทิม		แซปไฟร์สีน้ำเงิน		แซปไฟร์หลากสี จาก Ilk
		Anm	Vam	Dig	Anb	
ก่อนเผา	จำนวนตัวอย่าง / กระรัต	368 / 369.02	93 / 66.34	99 / 118.36	48 / 27.68	5,242 / 5961.17
	สมบัติพื้นฐาน	302	93	99	48	261
	UV-Vis-NIR Spectrum	195	53	77	30	234
	SEM-EDX มลทิน	24	7	2	-	2
	EPMA จำนวนตัวอย่าง/จำนวนวิเคราะห์ (Al, Si, Mg, Cr, Fe, Ti, Ga, V)	31 / 95	8 / 14	34 / 221	14 / 88	112 / 406
	ตัวอย่างที่ผ่าเป็นสองส่วน เพื่อ เปรียบเทียบ ก่อน/หลังเผา	40	16	-	-	29

การทดลองเผาพลอย		ครั้งที่	Anm	Vam	Dig	Anb	Ilk
		1	12	-	-	-	-
	เตาไฟฟ้า	2	10	10	-	-	20
		3, 4, 5	20	8	-	-	-
		6, 7, 8	20	8	-	-	-
		9	15	-	-	-	17
		10, 11, 12	7	-	-	-	25
		13	23	-	-	-	25
		14, 15	20	-	-	-	-
		16	13	-	-	-	-
		17	8	-	-	-	14
	เตาน้ำมัน	1	-	-	10	-	-
		2	-	-	-	-	8
		3	-	-	-	-	12
		4, 5	-	-	34	14	30
		6	-	-	2	1	21
		7	-	-	1	1	34
		8	-	-	9	6	23
	เตาแก๊ส	1	-	-	-	-	29
		2	-	-	-	-	50
		3	-	-	-	-	59
		4	-	-	-	-	78
		5	16	-	-	-	47

หลังเผา		Anm	Vam	Dig	Anb	Ilk
	การเปลี่ยนแปลงสี	ตรวจวัดทุกตัวอย่าง ทุกครั้งหลังเผา				
	+ UV-Vis-NIR					
	SEM-EDX	24	7	8	1	24
	EPMA					111
		30 / 139	8 / 16	34 / 275	14 / 103	/446

ผลการทดลองเผาพลอยคอร์ันดัมและตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยทั้งก่อนและหลังเผา สรุปได้ว่า

1. สีตั้งต้นของพลอยจะเป็นเครื่องบ่งชี้ดีที่สุดว่าควรเผาพลอยเพื่อให้เป็นสีอะไร กล่าวคือควรตั้งวัตถุดิบประสงค์ของการเผาเพื่อเพิ่มสี หรือลดสีเป็นสำคัญ

2. พลอยสีเขียว เขียวอมเหลือง หรือเหลืองอมเขียว อาจเผาเพื่อให้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงินก็ได้

3. พลอยดิบที่ไม่มีสี ถ้าเป็นพลอยหมา กล่าวคือเนื้อพลอยแสดงลักษณะขุนขาว ขาวอมเหลือง หรือเหลืองน้ำตาล สามารถเผาให้เป็นสีฟ้าหรือน้ำเงินได้ง่าย ลักษณะหมาหรือเนื้อขุนขาวจะสอดคล้องกับปริมาณ TiO_2 ซึ่งสัมพันธ์กับการแสดงสีน้ำเงิน

4. ถ้าสามารถควบคุมภาวะบรรยากาศในการเผาได้แน่นอน จะใช้เตาเผาชนิดใดก็ได้ที่สามารถทำอุณหภูมิได้สูงและเหมาะสม อย่างไรก็ตาม เตาแต่ละลูกควรใช้เผาในบรรยากาศแบบเดียวกันเท่านั้น กล่าวคือเตาไฟฟ้าเหมาะสำหรับเผาบรรยากาศออกซิโดซิงใช้กับทับทิม และแซปไฟร์สีชมพู ม่วง หรือเหลือง เตาน้ำมันเหมาะสำหรับเผาบรรยากาศรีดิวซิง ใช้เผาแซปไฟร์สีน้ำเงิน และเตาแก๊สเหมาะสำหรับบรรยากาศออกซิโดซิง ใช้เผาแซปไฟร์สีเหลือง หรือเผาทับทิมให้หายขุน

5. ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการเผาพลอย ได้แก่

5.1 ปัจจัยตั้งต้น คือ องค์ประกอบของพลอย หรือปริมาณธาตุร่องรอย ที่สำคัญที่สุดสำหรับพลอยธรรมชาติคือ Cr ให้สีแดง / ชมพู Fe ให้สีเหลือง เขียว หรือน้ำเงิน (ร่วมกับ Ti) และ Ti ให้สีน้ำเงิน (ร่วมกับ Fe) ปริมาณและชนิดของมลทินในเนื้อพลอย รวมทั้งรอยแตกร้าวในพลอย (ส่วนใหญ่จะเป็นปัจจัยลบ)

5.2 อุณหภูมิสูงสุด และระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิระหว่างเผา ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณธาตุร่องรอยที่ให้สี โดยทั่วไปพลอยที่มีปริมาณธาตุให้สีค่อนข้างสูง จะใช้อุณหภูมิ และเวลาในการเผาดำกว่าพลอยที่มีธาตุเหล่านี้น้อย

5.3 บรรยากาศในการเผา ซึ่งมีสองแบบคือ ออกซิไดซิง (ซึ่งเหมาะกับการเผาทั้งปฏิกิริยา และเผาไพโรไลซิส) และรีดิวซิง (ซึ่งเหมาะกับการเผาเผาไพโรไลซิส) ปริมาณ O_2 ในบรรยากาศเผา จะสัมพันธ์กับปริมาณธาตุให้สสาร อุณหภูมิ และระยะเวลาเผา

5.4 การเ็นตัวของพลอยหลังเผา เ็นตัวเร็วเหมาะสำหรับการเผาให้หายน้มน้ำ เ็นตัวช้าเหมาะกับการเผาให้สสารเพิ่มขึ้น โดยไม่กังวลกับความใสของเนื้อพลอย

6. นอกจากการเปรียบเทียบสสารโดยตรงก่อน และหลังเผา การวัด absorption spectrum แสดงการเปลี่ยนแปลงสสารก่อน-หลังเผาได้ดีที่สุด

7. องค์ประกอบทางเคมีของพลอย ก่อนและหลังเผา ไม่แสดงความแตกต่างนี้มากนักทางสถิติ

8. เ็นมลทินในเนื้อพลอย แสดงการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาอย่างชัดเจน

9. วิธีการเผาพลอยเชิงพาณิชย์ ควรเผาราวละหลายๆ เริ่มจากอุณหภูมิต่ำ และเวลาน้อยก่อนแล้วเลือกพลอยที่เผาได้แล้วออก ก่อนที่จะเพิ่มภาวะการเผาสูงขึ้นต่อไปเป็นขั้นๆ โดยควรคัดเลือกพลอยที่เผาได้ที่แล้วออกทุกครั้ง

10. วิธีการตรวจสอบลักษณะปรากฏของพลอยก่อนเผา ที่เหมาะสมที่สุดคือวิธีที่ผู้ประกอบการชาวไทยใช้ คือ ส่องดูด้วยไฟฉาย เพื่อพิจารณาการกระจายตัวของสี หม่า มลทิน ร่องรอยต่างๆในเนื้อพลอย เพราะการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของพลอย โดยไม่ทำให้พลอยเสียหาย จะทราบข้อมูลเฉพาะบริเวณพื้นผิวพลอย และที่สำคัญคือ ไม่คุ้มค่าใช้จ่าย

บทคัดย่อ

ตัวอย่างพลอยตระกูลคอร์นดัมที่ใช้ในการศึกษา เป็นพลอยก้อน (ยังไม่ได้เจียรไน) ที่ยังไม่ผ่านการเพิ่มคุณภาพด้วยวิธีการใดๆ (พลอยดิบ) จากแหล่งพลอยต่างๆ ของประเทศมาดากัสการ์ ประกอบด้วยทับทิมจากแหล่งแอนดิลามีน่า และวาโตแมนดรี แชนไพร์สีน้ำเงิน-เขียว-เหลือง จากแหล่งคิเอโก ชูอาเรช แชนไพร์สีน้ำเงินจากแหล่งแอนดราอนแดมโบ และแชนไพร์หลากสีจากแหล่งอิลากากา โดยศึกษาสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา และวัดแถบการดูดกลืนแสงของตัวอย่างรวม 803 ตัวอย่าง วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างรวม 201 ตัวอย่าง และทดลองเผารวม 339 ตัวอย่าง

ผลการศึกษา สรุปได้ว่า (1) สีและลักษณะปรากฏทางกายภาพของพลอยคอร์นดัม มีความสัมพันธ์โดยตรงกับชนิดและปริมาณธาตุร่องรอย โดยเฉพาะ Cr, Fe และ Ti (2) ลักษณะภายในเนื้อพลอยที่ปรากฏเป็นลักษณะขุนขาว ที่เรียกว่า “หม่า” มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณ Ti ในพลอย (3) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคขั้นสูง เพื่อประกอบการพิจารณาว่าตัวอย่างพลอยเม็ดใดจะเผาได้ผลหรือไม่ อย่างไร ไม่อาจเทียบได้กับภูมิปัญญาของผู้ประกอบการไทยที่ใช้เพียงกระบอกไฟฉายส่อง และแว่นขยายดูพลอย ทั้งในด้านความคุ้มค่า และความเหมาะสมในเชิงปฏิบัติ (4) การเผาเพื่อเพิ่มคุณภาพพลอยต้องพิจารณาปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อผลต่างๆ อย่างรอบคอบ เช่น สีหลัก/สีเดิมของพลอยดิบ ชนิดและปริมาณของมลทิน และรอยแตกร้าวในเนื้อพลอย และลักษณะภายในเนื้อพลอย เช่น หม่า เหลือบ และเชื้อสี เพื่อกำหนดวัตถุประสงค์ของการเผา และกรรมวิธีที่จะใช้ในการเผาพลอยแต่ละกลุ่ม (5) หลักการเผาพลอยที่ควรยึดเป็นแนวปฏิบัติ คือ เริ่มต้นเผาด้วยเงื่อนไขขั้นต่ำ (อุณหภูมิและเวลา) แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยคัดเลือกพลอยที่เผาได้ที่แล้วออก ก่อนที่จะเริ่มขั้นต่อไป (6) พลอยหม่า เผาออกได้ง่ายที่สุด โดยใช้เตาน้ำมัน บรรยากาศแบบบริควิง และอุณหภูมิสูงสุดขั้นต่ำเพียง 1,450 °C ก็จะได้สีน้ำเงินสวย (7) การเผาทับทิมทำได้เฉพาะการเผาเพื่อลดสีสดแทรกอื่นๆ และ/หรือ เผาใส ควรใช้เตาไฟฟ้าในบรรยากาศออกซิไดส์ เริ่มตั้งแต่ 1,000 °C หรือ 1,200 °C (ในกรณีที่มีหม่า) หรือ 1,350 °C (สำหรับพลอยที่ไม่มีหม่า) โดยใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน ถึงนาน (3-5 ชั่วโมงขึ้นไป) ถ้าต้องการเผาใส อาจต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,800 °C หรือ 1,900 °C และให้พลอยเย็นตัวเร็ว (เผายก) (8) การเผาแชนไพร์ที่มีสีเดิมเป็นสีชมพู ส้ม หรือม่วง ควรใช้หลักการเกี่ยวกับการเผาทับทิม (9) การเผาแชนไพร์สีน้ำเงิน-เขียว-เหลืองในหลักการสามารถเผาเปลี่ยนสีไปมาได้ โดยเผาในภาวะรีดิวซิง หากต้องการสีสุดท้ายเป็นสีน้ำเงิน และใช้ภาวะออกซิไดส์ หากต้องการสีสุดท้ายเป็นสีเหลือง แต่การเปลี่ยนสีจะยากง่ายเพียงใด ขึ้นกับปริมาณของ Fe และ Ti ที่มีอยู่ในเนื้อพลอย ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ/เวลาที่เผา และความเข้มข้นของภาวะออกซิไดส์หรือรีดิวซิง (10) การเผาพลอยทุกครั้งต้องถือเสมือนเป็นการทดลองแต่ละครั้งผู้ที่ประสบความสำเร็จในการเผาพลอย ต้องช่างสังเกตและจดจำลักษณะปรากฏต่างๆ ของพลอยดิบ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นหลังการเผาที่ภาวะต่างๆ แต่ละครั้ง

Abstract

Rough and unheated gem corundum samples from various gem fields of Madagascar were used in this study. The samples include ruby from Andilamena and Vatomandry, blue-green-yellow sapphire from Diego Suarez, blue sapphire from Andranondambo, and varied-coloured sapphire from Ilakaka. A total of 803 corundum samples were measured for basic gemmological properties and absorption spectrum using UV-Vis-NIR technique, 201 samples were analysed for major and trace element contents, and 339 samples were heat-treated.

It can be concluded from this study that (1) Colour and physical appearances of corundum are directly related to type and concentration of trace elements, especially Cr, Fe and Ti. (2) Milkiness or cloudiness in the gem samples reflect the distribution and concentration of Ti in the stone. (3) Advanced techniques of chemical analysis to help determining which samples are suitable for heat treatment and how, are not as effective as the much simpler technique using only a torch light and loupe or magnifying glasses employed by most Thai gem dealers, both in terms of cost effectiveness and practicality. (4) In conducting heat treatment of corundum, attention must be paid to all factors that might affect the stones, for examples, the original colour, type and amount of inclusions and fractures, and internal features/textures of the stones such as milkiness, silkiness, or coloured patches present. (5) In principle, the practical procedure recommended for heat treatment of gemstone is to start with minimum heating conditions (esp. temperature and soaking time) and extract the stones that response satisfactorily to the treatment before reheating with stronger setting step-by-step. (6) Stones with cloudy/milky appearances (Geuda) are the best responsive to heat treatment. Heating in an oil furnace under reducing condition up to 1,450 °C will produce nice blue stones. (7) Ruby should be heat-treated to get rid of other interference colours, i.e. blue, violet, or brownish tints, or to increase clarity, using electric furnace under oxidizing condition starting at 1,000 °C or 1,200 °C (if the stones are cloudy) or at 1,350 °C (if the stones are clear), for a long soaking time (at least 3–5 hours). If heating to enhance clarity the maximum temperature may be as high as 1,800-1,900 °C and rapid cooling. (8) Heating sapphires of pink, orange, purple, or violet colours is similar to heating ruby. (9) Heating sapphire of blue-green-yellow suite can be aimed at getting any shade of colour between blue and yellow. If blue is the colour wanted, the stones should be heated under reducing conditions. On the other hand oxidizing conditions are favoured for heating of yellow sapphire. The ease or difficulty in getting the blue or yellow depend on the amount and proportion of Fe and Ti contents, temperature and soaking time, and the intensity of oxidizing or reducing conditions during heating. (10) Each heat treatment should be

considered a separated scientific experiment. Successful heat treaters should be very observant especially regarding the physical appearances of the stones before heating and the changes thereafter in correspondent which each heating conditions used.

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัย โครงการ “การพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้และแชปไฟร์” ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และกระทรวงอุตสาหกรรม โดยสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ในส่วนที่ดูแลรับผิดชอบ ‘แผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม’ ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ ขอขอบคุณ สาขาวิชาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อนุญาตให้ใช้สถานที่และเครื่องมืออุปกรณ์ทำงานวิจัย ขอขอบคุณเครือข่ายการวิจัย (CRN) สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ และโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาเพื่อพัฒนาอุตสาหกรรมไทย ในโครงการหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต ร่วมกับมหาวิทยาลัยต่างประเทศ สาขาวิชาธรณีวิทยา ที่สนับสนุนงบประมาณในการเดินทางไปปฏิบัติงานวิจัย (เพื่อวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยด้วยเทคนิคขั้นสูง) ณ ต่างประเทศ

ขอขอบคุณคณะผู้ทรงคุณวุฒิ (ดร.ไพยม อรรถกานนท์ รศ.ดร. ชัยยุทธ จันทร์ปราบ คุณรัก หรรษาเวก และรศ. สุวิน บุศราคำ) ที่เสนอแนะและให้ข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณที่ปรึกษาโครงการวิจัย คุณประจักษ์ อังคะหิรัญ และคุณอนุภาพ ชินอุดมพงศ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและคำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งเกี่ยวกับการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางกายภาพของพลอยก่อน เทคนิคและกรรมวิธีเกี่ยวกับเตาเผาและขั้นตอนการเผาพลอยชนิดต่างๆ และขอขอบคุณบุคคลต่างๆต่อไปนี้

ศ.ดร. ทวีป สิริรัศมี และคุณสุกกร ลิมคุณธรรมโม จากสำนักงานประสานงานชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ที่ช่วยประสานงานและแนะนำข้อปฏิบัติในงานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณวิลาวัลย์ อดิชาติ จากกรมทรัพยากรธรณี และรศ.ดร. กาญจนา ชูวงศ์ จากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่อำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ห่มลทินด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

Dr. John William Gaskart จาก University of Birmingham, UK. Dr. Chris J Stanley, Dr. Terry Williams และ Mr. John Spratt จาก Department of Mineralogy, Natural History Museum, London, UK ที่อำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษา แนะนำระหว่างการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีในสหราชอาณาจักร

Prof. Tang Seung Mun จาก National University of Singapore และ Mr. Tay Thye Sun จาก Far East Gemological Laboratory ประเทศสิงคโปร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ระหว่างการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีด้วยเทคนิค PIXE

นักศึกษบัณฑิตทั้งระดับมหาบัณฑิตและดุษฎีบัณฑิต จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วย คุณสุรินทร์ อินทะยศ คุณสุทัส สิงห์บำรุง คุณยงยุทธ ชันแก้ว คุณกอบกาญจน์ เพชรภู่ คุณนันทรัตน์ บุนนาค และคุณภาวดี วรวิทย์รัตนกุล ที่ช่วยเหลือและดำเนินงานต่างๆ เกี่ยวกับโครงการวิจัยนี้ ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่าง การวิเคราะห์ การทดลองเผา และการจัดทำรายงานการวิจัยในวาระต่างๆ

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
1. บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 สถานภาพปัจจุบันของเทคโนโลยีการเผาผลาย	2
1.3 หลักการ	4
1.4 วัตถุประสงค์	6
1.5 ขอบเขตการวิจัย	6
2. วิธีการวิจัยและผลการศึกษา	8
2.1 ตัวอย่างพลอย	8
2.2 ธรณีวิทยาแหล่งพลอยคอร์ันดัมของประเทศมาดากัสการ์	8
(1) แหล่งพลอยทางตอนเหนือของประเทศ	8
(2) แหล่งพลอยทางตอนกลางของประเทศ	15
- แหล่ง Andilamena	17
- แหล่ง Vatomandry	17
(3) แหล่งพลอยทางตอนใต้ของประเทศ	17
- แหล่ง Andranondambo	19
- แหล่ง Ilakaka	20
2.3 วิธีการที่ใช้ในการศึกษา	21
(1) การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา	21
(2) การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โดยเครื่องมือขั้นสูง	39
ก. ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer	39
ข. ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี	41
ข.1 การวิเคราะห์ชุดแรก	41
ข.2 การวิเคราะห์ชุดที่สอง	46
ค. ตัวอย่างสำหรับตรวจวิเคราะห์มลทินภายในเนื้อพลอย	48

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2. วิธีการวิจัยและผลการศึกษา (ต่อ)

2.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยโดยเครื่องมือขั้นสูง ก่อนทดลองเผา	49
(1) การตรวจวัด absorption spectrum โดยเทคนิค UV-Vis-NIR	49
ก. Absorption spectrum ของทับทิม	49
ก.1 จากแหล่ง Andilamena	49
ก.2 จากแหล่ง Vatomandry	53
ข. Absorption spectrum ของแซปไฟร์สีน้ำเงิน	53
ข.1 จากแหล่ง Diego Suarez	53
ข.2 จากแหล่ง Andranondambo	53
ค. Absorption spectrum ของ varied-coloured sapphires จากแหล่ง Ilakaka	60
(2) ผลการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี	70
ก. ภาพรวม	70
ข. ผลการวิเคราะห์	72
- สรุปการประมวลผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอย ในตัวอย่างพลอย	
คอร์ันดัมจากแหล่งต่างๆ ของมาดากัสการ์ ก่อนการทดลองเผา	72
- สรุปการประมวลผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอย ในตัวอย่างพลอย	
คอร์ันดัมจากแหล่งต่างๆ ของมาดากัสการ์ หลังการทดลองเผา	80
- การเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ก่อนและหลังการทดลองเผา	85
(3) ผลการวิเคราะห์มลทิน	89

3. การเผาพลอย 102

3.1 คำนำ	102
3.2 วัตถุประสงค์ของการเผาพลอย	103
3.3 อุปกรณ์ในการเผาพลอย	103
3.4 ตัวแปรหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเผาพลอย	104
3.5 เทคนิคการเผาพลอยคอร์ันดัม	105
(1) การเผาเพิ่มสี	106
(2) การเผาลดสี	107
(3) การเผาใส	107

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. การเผาผลอย (ต่อ)	
3.6 เตาที่ใช้ในการเผาผลอย	108
3.7 การทดลองใช้เตาเผาผลอย	109
3.8 การทดลองเผาด้วยเตาไฟฟ้า	116
3.9 การทดลองเผาด้วยเตาน้ำมัน	131
3.10 การทดลองเผาด้วยเตาแก๊ส	146
3.11 การตรวจวัด absorption spectrum ของตัวอย่างพลอยคอร์ันดัมหลังการทดลองเผา	167
4. สรุปและวิจารณ์ผล	185
4.1 ภาพรวม	185
4.2 ผลการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยาของตัวอย่างพลอย	186
4.3 ผลการศึกษามลทินในเนื้อพลอย	186
4.4 ผลการศึกษา absorption spectrum	187
4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมี	187
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะปรากฏทางกายภาพของพลอยกับสมบัติทางกายภาพ ทางแสงและทางเคมีที่ตรวจวัดได้โดยเครื่องมือวิทยาศาสตร์	189
4.7 ผลการทดลองเผาผลอย	203
(1) ข้อเท็จจริง	203
(2) หลักการเบื้องต้นของการเผาผลอย	204
(3) พิจารณาปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้อง	204
(4) การพิจารณาเลือกกรรมวิธีเผาผลอย	207
(5) สรุป	208
บรรณานุกรม	210

1. บทนำ

1.1 คำนำ

พลอย โดยเฉพาะพลอยตระกูลคอร์นดัม ซึ่งได้แก่ ทับทิมและแซปไฟร์ เป็นวัตถุดิบที่สำคัญยิ่งของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมส่งออกมูลค่าสูงที่ติดอันดับในสิบอันดับแรกของสินค้าส่งออกมูลค่าสูงสุดของไทยต่อเนื่องกันตลอดมา ปัจจุบัน พลอยดิบซึ่งผลิตได้จากแหล่งภายในประเทศลดน้อยลงมาก ไทยต้องนำเข้าพลอยจากแหล่งนอกประเทศเกือบทั้งหมด เพื่อป้อนอุตสาหกรรมดังกล่าว แหล่งพลอยต่างประเทศที่สำคัญมากแหล่งหนึ่งในระยะสิบกว่าปีที่ผ่านมา และปัจจุบันได้ทวีความสำคัญขึ้นล้าหน้าแหล่งพลอยอื่นๆ คือ แหล่งพลอยของประเทศมาดากัสการ์

ในช่วงที่มีการค้นพบแหล่งพลอยใหม่ๆ ตอนต้นคริสต์ศตวรรษที่ 21 เคยมีผู้ประกอบการอัญมณีของไทยเดินทางเข้าไปหมุนเวียนซื้อพลอยดิบในมาดากัสการ์ประมาณ 600 คน มีบริษัทคนไทยได้รับสัมปทานทำเหมืองพลอยขนาดใหญ่ในมาดากัสการ์ไม่ต่ำกว่า 6 บริษัท ประมาณกันว่าผู้ประกอบการไทยใช้เงินซื้อพลอยในประเทศนี้ราว 200-300 ล้านบาทต่อเดือน และประมาณร้อยละ 80 ของพลอยที่ซื้อขายกันในมาดากัสการ์ ถูกส่งมาเพิ่มมูลค่าและเจียรไนในประเทศไทย อาจกล่าวได้ว่า อนาคตของอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทย โดยเฉพาะในส่วนที่เกี่ยวกับวัตถุดิบอัญมณี การเพิ่มคุณภาพและการเจียรไนจะขึ้นอยู่กับอุปทานของพลอยดิบจากมาดากัสการ์เป็นสำคัญ ไปจนกว่าผลผลิตจากประเทศนี้จะลดน้อยลง

พลอยดิบจากมาดากัสการ์ ส่วนใหญ่ต้องนำมาเผาหรือเพิ่มคุณภาพด้วยความร้อน พลอยก้อนจากเหมืองที่คุณภาพดีพอที่จะนำไปเจียรไนได้โดยไม่ต้องเผามีเพียงไม่ถึงร้อยละ 5 Schwarz and others (2000) ระบุว่า ผลผลิตจากเหมืองพลอยแห่งหนึ่งทางตอนเหนือของมาดากัสการ์ (Ambondromifehy area) ซึ่งพลอยแซปไฟร์มีกำเนิดสัมพันธ์กับหิน alkali basalts (คล้ายคลึงกับแหล่งคอร์นดัมของไทย กัมพูชา ลาว และออสเตรเลียตะวันออก) ไม่มีพลอยดิบคุณภาพดีพอที่จะนำไปเจียรไนได้โดยตรงโดยไม่ต้องเผาละเลยมีพลอยที่คัดเลือกเพื่อนำไปเผาได้เพียงประมาณร้อยละ 17 โดยบางส่วนต้องเผาซ้ำถึง 10 ครั้ง เน้นอน รายงานมิได้ระบุรายละเอียดวิธีการเผาพลอย แต่ปรากฏว่า จากพลอยดิบทั้งหมดที่เผามีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้นที่เผาแล้วใช้ได้ สรุปแล้วจากพลอยดิบทั้งหมดที่ทำเหมืองได้ มีพลอยที่เผาได้ผลนำไปเจียรไนเป็นอัญมณี เพียงร้อยละ 3.6 หากสามารถพัฒนาวิธีการเพิ่มคุณภาพพลอยให้ได้ผลเพิ่มขึ้น ย่อมส่งผลให้มีวัตถุดิบคุณภาพดี ป้อนอุตสาหกรรมมากกว่าที่เป็นอยู่ และผลตอบแทนทางเศรษฐกิจย่อมเพิ่มขึ้นไปด้วยเป็นทวีคูณ

1.2 สถานภาพปัจจุบันของเทคโนโลยีการเผาพลอย

การเพิ่มคุณภาพพลอยด้วยความร้อนหรือการเผาพลอย ทำกันมานานหลายศตวรรษแล้ว ทั้งในอินเดีย กลุ่มประเทศอาหรับโดยเฉพาะอียิปต์ และในยุโรป ปัจจุบันเป็นวิธีการเพิ่มคุณภาพพลอยที่ยอมรับกันในการธุรกิจอัญมณีทั่วโลก เพราะให้ผลที่คงทนถาวรและไม่เป็นอันตรายใดๆ ต่อผู้ใช้ แม้ว่าทุกวันนี้ นักเผาพลอยชาวไทยจะมีชื่อเสียงหรือฝีมือทางด้านนี้มากกว่าชนชาติอื่นๆ (ยังไม่เคยมีข้อมูลที่ต้องแท้จริงว่าสัดส่วนของการเผาพลอยที่สำเร็จได้ผลดีกับที่เสียหายไป ในการเผาพลอยของไทยเป็นอย่างไร) แต่หลักการของเทคโนโลยีการเผาพลอย ก็เป็นที่ทราบกันทั่วไป มีตำราตีพิมพ์เผยแพร่เกี่ยวกับเทคนิคด้านนี้โดยเฉพาะหลายเล่ม เช่น Nassau (1984a; 1994), Themelis (1992; 2003) และมีบทความวิชาการ หรือผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มคุณภาพพลอยด้วยความร้อนตีพิมพ์เผยแพร่อยู่เสมอๆ เช่น Pisutha-Arnon and others (2004), Emmett and others (2003), Peretti and others (2003), McClure (2002), McClure and others (2002; 1993), Moses and others (2002), Peretti and Günther (2002), Qi and others (2002), Wang and Green (2002), Häger (2001), Emmett (1999), Nassau (1999), Emmett and Douthit (1993), Scarratt (1983), Schmetzer and others (1983), Abraham (1982) และ Crowningshield and Nassau (1981) ดูเหมือนว่าก่อนจะเริ่มทศวรรษ 1980s พลอยทุกประเภทและทุกชนิดที่มนุษย์รู้จักได้ถูกทดลองเผาแล้วทั้งสิ้น เพื่อดูว่าความร้อนจะช่วยปรับปรุงคุณภาพพลอยนั้น ๆ ได้บ้างหรือไม่ (McClure and Smith, 2000) วิธีการ โดยเฉพาะเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในสมัยนั้น และที่ใช้ในปัจจุบัน แม้ดูออกจะพื้นๆ หรือไม่สู้ “ไฮเทค” มากมายนักเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีของทุกวันนี้ แต่ก็ให้ผลลัพธ์ค่อนข้างดี

ในประเทศไทย มีผู้สนใจ และพยายามค้นหาวิธีการเผาพลอยเพื่อผลตอบแทนเชิงพาณิชย์มานานแล้วเช่นกัน กล่าวกันว่า อาจเริ่มทำกันตั้งแต่มีการขุดพลอยในประเทศก็ว่าได้ แต่ที่มีหลักฐานกล่าวถึงเป็นลายลักษณ์อักษรครั้งแรก น่าจะได้แก่บทความของ Ulrich Guhler (อ้างใน Themelis, 1992) เรื่อง Studies of Precious Stones in Siam ซึ่งตีพิมพ์ใน Siam Science Bulletin ปี 2490 มีข้อความระบุถึงผลของความร้อนต่อสีของพลอยทับทิม ส่วนการเผาพลอยโดยใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงอย่างในปัจจุบันน่าจะทำได้กันอย่างแท้จริงเอาตั้งแต่ในราวปี พ.ศ. 2500 ประจวบกับช่วงระยะเวลาที่ผู้ประกอบการอัญมณีไทยเริ่มนำพลอยหมา (Geuda) จากศรีลังกาเข้ามาเผาเป็นผลสำเร็จ อย่างไรก็ตาม ผู้ที่ประสบความสำเร็จที่แท้จริงในการเผาพลอย มักเป็นผู้ที่ใช้หลักการทางวิทยาศาสตร์ในขั้นพื้นฐานเป็นอย่างน้อย กล่าวคือ ต้องช่างสังเกต (observe) และจดจำบันทึกไว้ว่าพลอยลักษณะ (physical properties/appearances) เช่นใด ต้องนำมาเผาอย่างไร (ชนิดของเตา / เชื้อเพลิง อุณหภูมิ และระยะเวลา) จึงจะให้ผลตามต้องการ จัดว่าเป็น scientific experiments ได้ เพียงแต่ผลของการทดลองเหล่านั้น นิยมเก็บไว้เป็นความลับ (เพราะเป็นความรู้ที่อาจทำเงินให้ได้มหาศาล) แทนที่จะตีพิมพ์เผยแพร่อย่างที่นักวิชาการนิยมทำกัน เป็นเหตุให้ขาดพัฒนาการตามหลักวิชา ซึ่งน่าจะส่งผลให้เทคโนโลยีการเผาพลอยของไทย สามารถนำไปประยุกต์ได้

กว้างขวาง และลดความสูญเสียลงได้มากกว่าที่เป็นอยู่ ด้วยเหตุนี้ จึงมีความพยายามที่จะนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเข้ามาพัฒนาคุณภาพอัญมณี โดยชักชวนให้นักวิชาการหันมาให้ความสนใจอย่างจริงจัง (โพยม อรรถยุกานนท์ และคณะ, 2521 ; 2529) ทำให้เริ่มมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการเพิ่มคุณภาพอัญมณีไม่ว่าจะโดยการอบรังสี โดยนักวิทยาศาสตร์ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (ชาญชัย อัสววินิจกุลชัย และคณะ, 2529 ; วัลลภ บุญคง, 2543 ; วัลลภ บุญคง และคณะ, 2533) หรือโดยการใช้ความร้อน ตามหน่วยงานต่าง ๆ เช่น กรมทรัพยากรธรณี (รัก หรรษาเวก, 2531 ; รัก หรรษาเวก และกฤตยา ปัทมลัย, 2539), กรมวิทยาศาสตร์บริการ (วรุณี ถิรมงคล, 2535 ; Thiramongkol, 1995) ในขณะที่เดียวกันหน่วยงานที่สนับสนุนการวิจัยก็เริ่มหันมาให้ทุนวิจัยทางด้านนี้ด้วย เช่น สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (พิเชษฐ ลิมสุวรรณ และคณะ, 2535), ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (ปิญโญ มีจันทร์, 2534) จนกระทั่งชุดโครงการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ให้การสนับสนุนอย่างจริงจัง (พงศ์ทิพย์ วิโนทัย และคณะ, 2541 ; พิชเชษฐ ลิมสุวรรณ และคณะ, 2541 ; สุชาติพิศ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ, 2541)

อย่างไรก็ตาม ผลของการค้นคว้าวิจัยเหล่านี้ ยังไม่สามารถให้คำตอบที่ชัดเจนมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าไม่สู้แตกต่างจากข้อมูลที่ปรากฏอยู่แล้ว (เช่น Nassau, 1984a ; 1994) นักเผาพลอยอาชีพบางรายยังอาจมีเทคนิคที่ดีกว่า เพียงแต่ไม่มีข้อมูลการวัดเชิงปริมาณ เช่น ส่วนประกอบทางเคมีของพลอยสเปกตรัมการดูดกลืนแสง หรืออื่นๆ เพราะนักเผาพลอยเหล่านั้น ไม่มีหรือขาดโอกาสที่จะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง ราคาแพงๆ อย่างที่นักวิจัยมี สรุปลแล้ว เรายังบอกไม่ได้ว่า พลอยเม็ดหนึ่งๆ จะเผาได้ผลหรือไม่เพราะเหตุใด ? คำตอบเหล่านี้ บางข้อนักเผาพลอยอาชีพของไทย สามารถตอบได้ทุกครั้ง แม้คำตอบจะไม่สู้เป็นวิทยาศาสตร์นัก ปัญหาก็คือ นักวิจัยซึ่งเป็นนักวิชาการจะตอบได้หรือไม่ ?

ในขณะที่นักวิจัยยังคงพยายามค้นหาคำตอบเหล่านั้นอยู่ นักเผาพลอยอาชีพของไทย ก็ได้พัฒนาเทคโนโลยีของตนล้ำหน้าไปเรื่อยๆ ปรากฏการณ์ที่สร้างความตื่นเต้น และต่อมาได้ส่งผลกระทบต่อคนข้างรุนแรงต่อตลาดพลอยสีของโลก จากฝีมือของนักเผาพลอยอาชีพของไทย ก็คือ การผลิตพลอยคอรัณดัมสีส้มและสีส้มอมชมพูที่เทียบเคียงได้กับพลอย Padparadscha ออกสู่ตลาด นักเผาพลอยกลุ่มแรกที่พัฒนาเทคนิคการเผาพลอยคอรัณดัม “วิธีใหม่” เป็นผลสำเร็จ เป็นผู้ประกอบการชาวจันทบุรี สามารถผลิตพลอยคอรัณดัมสีส้มและสีส้มอมชมพูได้ตั้งแต่วาดันปี 2544 ต่อมาเมื่อมีผู้สืบทราบเคล็ดลับมากขึ้น ผลผลิตพลอยสีส้มดังกล่าว ออกสู่ตลาดโลกทวีคูณขึ้นเรื่อย จนตลาดพลอยตื่นตัว เมื่อประมาณต้นปี 2545 บังเอิญมีพลอยที่แสดงลักษณะสีส้มเข้มกระจายไม่ทั่วทั้งเม็ด กล่าวคือ บริเวณแกนกลางยังคงมีสีอ่อนอยู่ ห้องปฏิบัติการตรวจสอบอัญมณี โดยเฉพาะในสหรัฐอเมริกาเริ่มมีความสงสัยว่าจะมีการเผาโดยใช้สารให้สีทำนองเดียวกับพลอยชานสี (colour-diffused sapphire) ซึ่งนิยมทำกับพลอยไพลิน (blue sapphire) หรือไม่ มีความพยายามวิเคราะห์ส่วนต่างๆ ของพลอยตั้งแต่ขอบลงไปจนถึงแกนกลางที่แสดงสีและความเข้มของสีต่างกัน จนในที่สุด ต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง และเทคนิคที่สามารถตรวจวัดธาตุเบาได้

เช่น SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) และ LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) จึงพบว่า การกระจายตัวของสสารสัมพันธ์กับปริมาณธาตุ beryllium (Be) ซึ่งไม่น่าจะมีอยู่เดิมในเนื้อพลอย ต่อมาจึงมีการเปิดเผยว่า เทคนิคการเผาพลอย “วิธีใหม่” ดังกล่าว เผาพลอยคอร์นดัมร่วมกับแร่ chrysoberyl (BeAl_2O_4) ซึ่งเป็นแร่ที่พบเกิดอยู่ร่วมกับ (associated mineral) พลอยคอร์นดัมในแหล่ง Ilakaka ของประเทศมาดากัสการ์อยู่เสมอ ธาตุ Be จากแร่ chrysoberyl อาจแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อพลอยคอร์นดัม ส่งผลให้พลอยแสดงสีดีขึ้น แต่บทบาทของ Be ที่แท้จริงยังคงเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ นักวิจัยที่ได้ทดลองเผาพลอยโดย “วิธีใหม่” หรือที่ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ยังมีความเห็นต่างกันไป (Pisutha-Arnond and others, 2004 ; Emmett and others, 2003 ; Peretti and others, 2003 ; Themelis, 2003 ; Hänni, 2002 ; Peretti and Günther, 2002 ; Proust, 2002)

จะเห็นได้ว่า การศึกษาวิจัยกลไกการเกิดสีในพลอย และเทคโนโลยีการเผาพลอยให้เข้าใจถ่องแท้ และสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน จะมีส่วนช่วยให้การเพิ่มคุณภาพอัญมณีด้วยความร้อนได้ผลดียิ่งขึ้น ในขณะเดียวกัน จะสามารถอธิบายและตอบข้อสงสัยได้อย่างสมเหตุสมผล เป็นการคุ้มครองผู้บริโภคและผู้ผลิตทั้งสองฝ่ายได้ในคราวเดียวกัน

1.3 หลักการ

การเผาพลอยคอร์นดัม โดยทั่วไป มีวัตถุประสงค์หลักสามประการ คือ (1) เพื่อเพิ่มหรือลดสี ให้พลอยสวยงามขึ้น, (2) เพื่อเพิ่มความใส หรือลดความขุ่นมัว เนื่องจากมลทินภายในเนื้อพลอย, และ (3) เพื่อประสานรอยแตกร้าวในเนื้อพลอย

การศึกษาในโครงการวิจัยนี้ จะเน้นเพียงสองประการแรก และยังมีได้ทำการเผาพร้อมกับแร่ chrysoberyl แต่อย่างไร

ตัวแปรที่สำคัญในการเผาพลอยมีสี่ประการ คือ

- (1) เคมีของพลอย หมายถึง ส่วนประกอบที่มีอยู่เดิมในเนื้อพลอย โดยเฉพาะบรรดาธาตุร่องรอย (trace elements) หรือมลทิน (inclusions) ที่อาจส่งผลต่อการแสดงสีของพลอย ที่สำคัญได้แก่ บรรดาโลหะทรานซิชัน แรกแรก ตั้งแต่ Ti ถึง Cu
- (2) อุณหภูมิที่ใช้เผา
- (3) ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา และ
- (4) ภาวะแวดล้อมของการเผา : oxidizing หรือ reducing

ตัวแปรอื่นๆ เช่น อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละช่วง, อัตราการเย็นตัวของพลอยหลังเผา, ความดันบรรยากาศ อาจมีอิทธิพลบ้างในบางกรณี

ความสำเร็จของการเผาพลอย ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหลักทั้งสี่ข้างต้น โดยตัวแปรตัวแรกจะมีความสำคัญสูงสุดเพราะเป็นเงื่อนไขตั้งต้น กล่าวคือ สำหรับพลอยคอร์รันดัม หากเป็นพลอยบริสุทธิ์จริงๆ ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 100.00\%$) ย่อมใส ไม่มีสี ไม่ว่าจะเผาภายใต้เงื่อนไขใดๆ (วงการพลอยเรียกว่า ไม่มีเชื้อ) ยกเว้นจะใช้วิธีเผาผ่านสี (diffusion) หรือเคลือบสี (coating) หรือทำให้โครงสร้างผลึกภายในชำรุดเสียหายจนอาจทำให้พลอยแสดงสีในทำนองเดียวกับผลของการอาบรังสี (เกิด colour centre) แต่หากเป็นพลอยที่มีเชื้อ คือมีธาตุโลหะทรานซิชัน ที่ทำให้คอร์รันดัมแสดงสีปนอยู่ด้วย เช่น Ti, V, Cr, Fe การเผาภายใต้เงื่อนไขและความสัมพันธ์ของตัวแปรอีกสามตัวที่เหลือที่ถูกต้องเหมาะสม ย่อมส่งผลให้พลอยแสดงสีสวยขึ้นได้ ทั้งนี้ต้องทำความเข้าใจให้อ่างแท้งว่า สาเหตุของการเกิดสีในพลอยมีอะไรบ้าง และเงื่อนไขเป็นอย่างไร ซึ่งสามารถศึกษาได้จาก Nassau (1983 ; 2001), Fritsch and Rossman (1987 ; 1988a ; 1988b)

ตัวแปรตัวแรก คือ เคมีของพลอยนี้ นักเผาพลอยมืออาชีพที่ประสบความสำเร็จ อาศัยประสบการณ์และการสังเกต สามารถจำแนกได้ว่าพลอยเม็ดนี้ เผาได้ผลหรือไม่ ? ถ้าได้จะต้องเผายังไง ? โดยไม่ต้องส่งพลอยไปวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี นี่คือข้อได้เปรียบของนักเผาพลอยไทยเมื่อเทียบกับต่างชาติ เพราะนอกจากจะกล้าเสี่ยง (กล้าได้กล้าเสีย) มากกว่าแล้ว ยังดูพลอยเก่งกว่าด้วย ในขณะที่ต่างชาติอาจมีเทคโนโลยีและเครื่องมืออุปกรณ์ขั้นสูง แต่มีข้อเสียเปรียบ คือต้องวิเคราะห์พลอยโดยไม่ทำให้เสียหาย การใช้เทคนิควิเคราะห์แบบ EDXRF รังสีเอกซ์ที่ใช้ไม่เข้มข้นจนทำให้พลอยอาจเปลี่ยนสีระหว่างวิเคราะห์ (เหมือนการอาบรังสี) แต่รังสีก็ทะลุทะลวงผิวพลอยลงไปเล็กน้อยเท่านั้น ผลวิเคราะห์จึง represent เพียงผิวนอกสุดของพลอยเท่านั้น ถ้าพลอยเม็ดนั้น homogeneous และค่อนข้างใส ก็อาจพออนุมานว่า ผลวิเคราะห์ represent ส่วนประกอบของทั้งเม็ดได้ แต่ธรรมชาติของพลอยที่ homogeneous และใสค่อนข้างหายาก (ถ้าเป็นก็มักไม่ต้องนำมาเผาอยู่แล้ว) ต่อเมื่อมีเทคโนโลยีการวิเคราะห์ที่ non-damaging และให้ค่าปริมาณที่มีอยู่ตลอดทั้งเม็ดพลอย นักเผาพลอยต่างชาติจึงอาจจะตามไทยทันในเรื่องการเผาพลอย

เคมีของพลอย อันได้แก่ ชนิดและปริมาณของธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในเนื้อพลอย โดยเฉพาะสัดส่วนของธาตุที่ก่อให้เกิดสีในพลอยคอร์รันดัม (Ti, V, Cr, Fe) และ Oxidation state ของธาตุเหล่านั้น น่าจะแสดงออกเป็นลักษณะสมบัติหรือลักษณะปรากฏทางกายภาพ (physical characteristics/ appearances) ของพลอยเม็ดนั้นๆ เช่น สีตัน (ความเข้ม, shade, tone, การกระจายตัว, การสอดแทรกสี), ความใส/ขุ่นมัว, ลักษณะพื้นผิวของเม็ดพลอยดิบ (เป็นมัน/ด้าน, เรียบ/ขรุขระ, ฯลฯ) และอื่นๆ การศึกษาครั้งนี้จะใช้อุปกรณ์ต่างๆ ในการ observe ลักษณะสมบัติหรือลักษณะปรากฏทางกายภาพของเม็ดพลอย แล้วเปรียบเทียบกับ

ผลวิเคราะห์ทั้งแบบ destructive (เพื่อหา total content) และ non – destructive / non – damaging (ที่ได้ content เฉพาะบริเวณผิวนอก) จากนั้นจึงนำไปทดลองเผา

ตัวแปรอีกสามตัวที่เหลือ มีข้อมูลจากที่มีผู้เคยศึกษามาแล้วเป็นแนวทาง บางตัวแปรแสดงบทบาทที่ค่อนข้างแน่นอนชัดเจน เช่น ภาวะแวดล้อมในการเผา ชนิดของเตา หรือเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาพลอยแดง (ทับทิม) หรือ แซปไฟร์ เพ็ชร หรือถอยสี ควรใช้บรรยากาศอย่างไร ส่วนอุณหภูมิและระยะเวลาในการเผา สามารถทดลองปรับเปลี่ยนได้ง่าย

1.4 วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อเพิ่มคุณภาพพลอยตระกูลคอร์ันดัมจากมาดากัสการ์ ให้มีคุณภาพดี ตามหลักวิทยาศาสตร์
- (2) เพื่อให้ทราบเงื่อนไขตั้งต้นที่จะบ่งชี้ว่าพลอยเม็ดหนึ่ง จะนำมาเผาแล้วได้ผลหรือไม่ โดยเปรียบเทียบเคมีของพลอย (จากการวิเคราะห์) กับลักษณะปรากฏทางกายภาพของพลอย
- (3) เพื่อจัดทำคู่มือแนะนำขั้นตอนการเผาพลอยคอร์ันดัมจากมาดากัสการ์ จากแหล่งพลอยทั้งสามบริเวณ คือ ทางตอนเหนือ ตอนกลาง และตอนใต้ของประเทศ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเทคโนโลยีของการเผาทับทิมและพลอยแซปไฟร์” มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

- (1) ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการวิจัย เป็นทับทิมและพลอยแซปไฟร์สีต่างๆ ที่ซื้อจากผู้ค้า ซึ่งระบุว่ามาจากแหล่งพลอยต่างๆ ของประเทศมาดากัสการ์
- (2) การวิเคราะห์ตัวอย่างพลอย ประกอบด้วย
 - การตรวจวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา ณ สาขาวิชาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 - การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (ปริมาณธาตุร่องรอย เฉพาะ Cr, Fe, Ti, V, Ga) อาศัยเทคนิค electronprobe microanalysis เป็นหลัก ณ Department of Mineralogy, the Natural History Museum, London

- การตรวจวิเคราะห์แร่ลทินในตัวอย่างพลอย อาศัยเทคนิค scanning electron microscope with energy dispersive X-ray fluorescence ณ Department of Mineralogy, the Natural History Museum, London
- การทดลองเผาพลอย ใช้เตา 3 ชนิด ได้แก่ เตาไฟฟ้า เตาแก๊ส และเตาน้ำมัน ทั้งนี้โดยไม่มีการเติมสารอื่นใดในบ้ำขณะเผา ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองเผาคือ อุณหภูมิสูงสุดที่เผา ระยะเวลาขึ้นอุณหภูมิ ภาวะบรรยากาศในขณะเผา และอัตราการเย็นตัว

2. วิธีการวิจัย และผลการศึกษา

2.1 ตัวอย่างพลอย

ตัวอย่างพลอยที่จัดซื้อ มาจากแหล่งต่างๆ ในประเทศมาดากัสการ์ (รูปที่ 1) รวม 5 แหล่ง ดังนี้

- (1) แหล่ง Diego Suarez บริเวณ Ambondromifehy ในจังหวัด Antsiranana ทางเหนือของประเทศ เป็นพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน จำนวน 99 เม็ด น้ำหนักรวม 118.368 กรัม
- (2) แหล่ง Andilamena ในจังหวัด Toamasina ทางตอนกลางด้านตะวันออกของประเทศ เป็นพลอยทับทิม จำนวน 368 เม็ด น้ำหนักรวม 369.023 กรัม
- (3) แหล่ง Vatomandry ในจังหวัด Toamasina เช่นเดียวกัน เป็นพลอยทับทิม จำนวน 93 เม็ด น้ำหนักรวม 66.346 กรัม
- (4) แหล่ง Andranondambo ในจังหวัด Toliara ทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ เป็นพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน จำนวน 48 เม็ด น้ำหนักรวม 27.685 กรัม, และ
- (5) แหล่ง Ilakaka ในจังหวัด Toliara ทางด้านตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศ เป็นพลอยแซปไฟร์หลากสี จำนวน 5,242 เม็ด น้ำหนักรวม 5,961.17 กรัม

2.2 ธรณีวิทยาแหล่งพลอยคอรันดัมของประเทศมาดากัสการ์

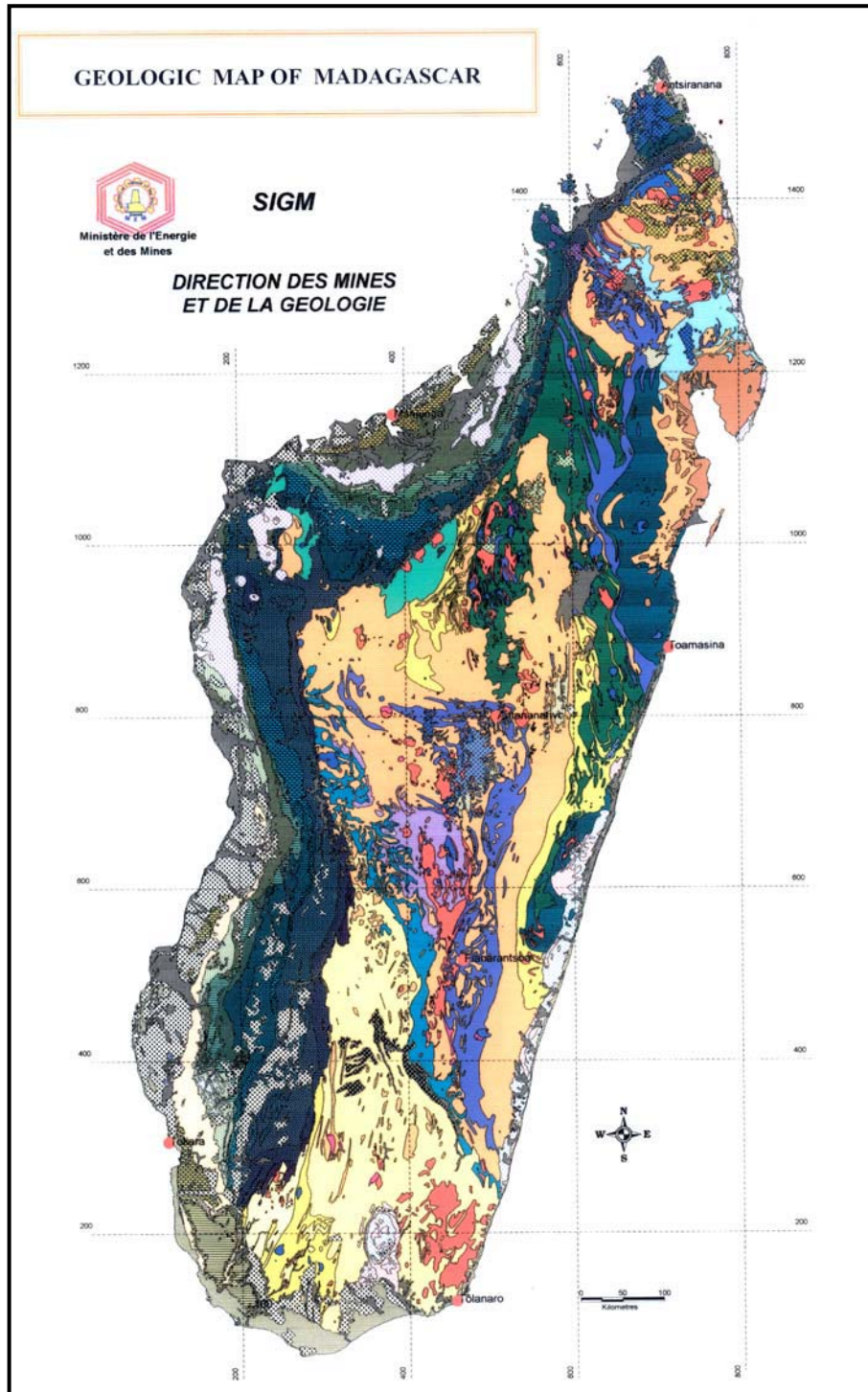
(1) แหล่งพลอยทางตอนเหนือของประเทศ (Diego Suarez หรือ Antsiranana) (รูปที่ 2)

วงการผู้ค้าพลอยยังคงนิยมเรียกพลอยคอรันดัมจากแหล่งทางตอนเหนือของมาดากัสการ์ว่า พลอยจาก Diego โดยเรียกตามชื่อเดิมของเมืองท่าหลักทางตอนเหนือของประเทศ คือ เมือง Diego Suarez ซึ่งเรียกตามชื่อของนักเดินเรือชาวโปรตุเกส สองคนที่เดินทางมาถึงตอนเหนือของประเทศนี้เมื่อปี ค.ศ. 1500 และ 1506 คือ Diego Diaz และ Hernan Suarez ปัจจุบันชื่อเมืองเปลี่ยนเป็นภาษา Malagasy แล้ว คือ Antsiranana

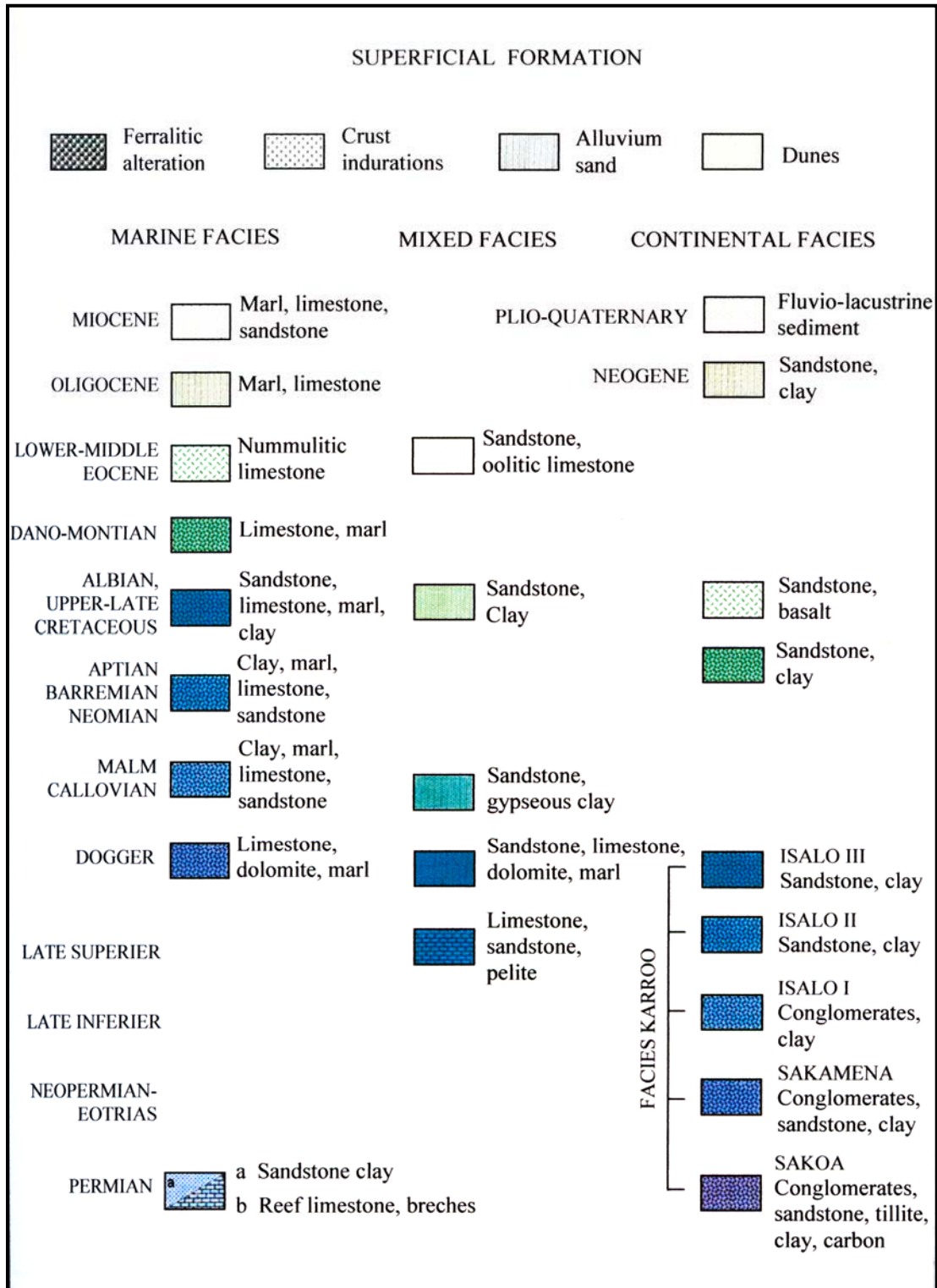
แหล่งพลอยคอรันดัมที่สำคัญ อยู่ในบริเวณที่เรียกว่า Ambondromifehy ห่างจาก Antsiranana ไปทางใต้ประมาณ 70 กิโลเมตร (Schwarz and others, 2000) และ อีกสองแหล่ง คือ Ambilobe และ Milanoa ซึ่งอยู่ห่างจาก Ambondromifehy ไปทางใต้ ประมาณ 40 กิโลเมตร และ 100 กิโลเมตร

ตามลำดับ แหล่งพลอยดังกล่าวเป็นแหล่งชนิดทุติยภูมิแบบ alluvial deposits เชื่อกันว่า คอรันดัมมาจากหินชนิด basaltic ของภูเขาไฟ Massif d'Ambre ซึ่งก่อให้เกิดมวลหินภูเขาไฟปกคลุมพื้นที่ เป็นบริเวณถึง 3,500 ตารางกิโลเมตร (Schwarz and others, 2000; Superchi and others, 1997)

มวลหินภูเขาไฟดังกล่าวประกอบด้วย picrite basalts, basalts, basanites, tephrites, hawaiiites, phonolites, trachites และ rhyolites อายุ Oligocene ถึง Pleistocene (Superchi and others,1997)

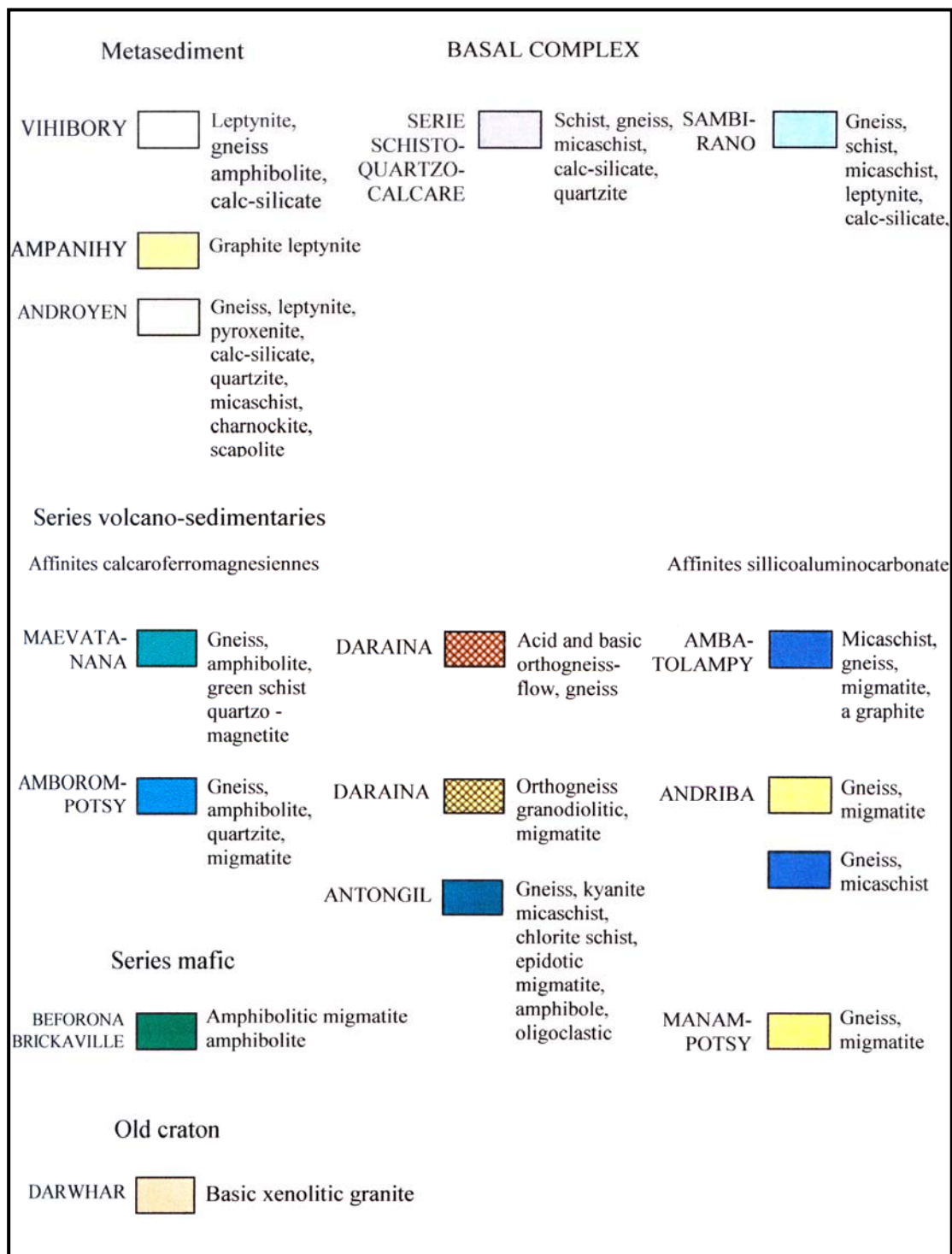


รูปที่ 1 แผนที่ธรณีวิทยาของประเทศมาดากัสการ์ (ดัดแปลงจาก แผนที่ของ Ministry of Energy and Mines, Madagascar, 2002)

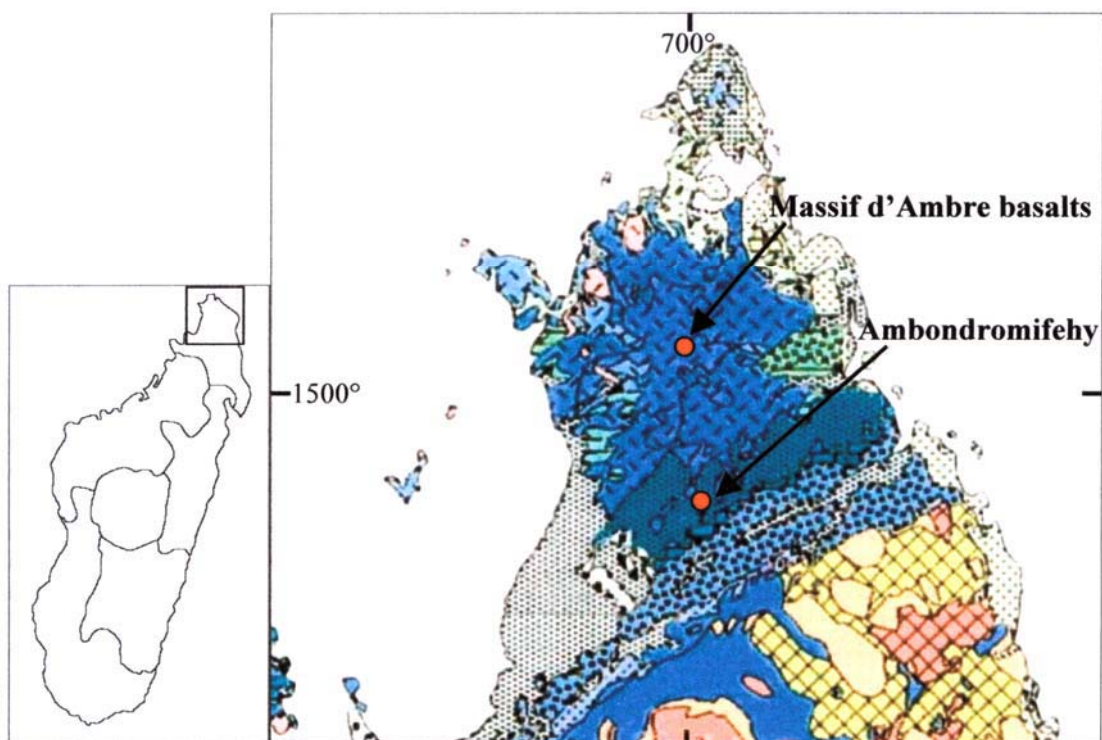


VOLCANIC FORMATIONS

QUATERNARY		Rhyolite		Basalt, basanite ankaratrite
		PLIO-QUATERNARY		Basalt
NEOGENE		Rhyolite, trachyte		Basalt, limburgite, andesite, ankaratrite, phonolite
EOCENE		Ignimbrite, granite		Trachyte, syenite, nephelinic syenite, Gabbro, nephelinic gabbro
SANTONIAN- MAASTRICHTIAN		Rhyolite, microgranite, syenite, microsyenite		Basalt, gabbro
TURONIAN		Rhyolite, microgranite, trachyte, syenite		Basalt, limburgite, sakalavite, Gabbro, dolerite, allivalite
		PLUTONISM (non date)		
		Granite, charnockite, tonalite		
		Syenite, syenitic charnockite		
		Gabbro, orthoamphibolite, orthopyroxenite, anorthosite		
		Migmatite		



รูปที่ 1 (ต่อ)



รูปที่ 2 แผนที่ทางธรณีวิทยาแหล่งพลอยทางตอนเหนือของประเทศมาดากัสการ์
(ดัดแปลงจากแผนที่ของ Ministry of Energy and Mines, Madagascar, 2002)

ชั้นตะกอน alluvium ที่ให้พลอยส่วนใหญ่วางตัวอยู่บนหินปูน อายุ Jurassic โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางทิศใต้ของ Massif d'Ambre ใกล้ Ankara Special Reserve ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศแบบ karst topography

อย่างไรก็ตาม Pezzotta (2001) รายงานว่า แหล่งพลอยแซปไฟร์ทางตอนเหนือของมาดากัสการ์นี้ น่าจะมีแหล่งกำเนิดร่วมกับ intensive alkaline volcanism ซึ่งให้หิน basalts, lamprophyres อายุประมาณ mid-Cretaceous มากกว่า

พลอยคอร์ันดัมที่พบ มักสะสมตัวอยู่ตามโพรง และรอยแตกของหินปูน ซึ่งในบางพื้นที่อาจอยู่ลึกถึง 8 เมตรจากผิวดิน การขุดหาพลอย ซึ่งเริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1996 มักขุดรुकูล้ำเข้าไปในเขตอนุรักษ์พิเศษดังกล่าว ทำให้รัฐบาลฯ ต้องประกาศห้ามขุดหาพลอยเมื่อเดือนเมษายน 1998 แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการลักลอบขุดหาได้ ในที่สุดคำสั่งห้ามดังกล่าวจึงถูกยกเลิกไปในเดือนสิงหาคมปีเดียวกันนั่นเอง

เคยมีความพยายามสำรวจหา sapphire-bearing basalt flows โดยบริษัทเหมืองพลอยที่ขุดหาในพื้นที่ แต่ไม่พบ (Schwarz and others, 2000) อย่างไรก็ตาม ลักษณะสมบัติทั่วไปของพลอยแซปไฟร์ที่พบ และความสัมพันธ์กับสภาพธรณีวิทยาในบริเวณใกล้เคียง ทำให้นักธรณีวิทยา และ นักอัญมณีวิทยาที่ศึกษาแหล่งพลอยดังกล่าว มั่นใจว่า แหล่งพลอยคอร์ันดัมทางเหนือของมาดากัสการ์นี้ มีกำเนิดสัมพันธ์กับหิน alkali basalts คล้ายคลึงกับแหล่งที่พบในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ไทย กัมพูชา ลาว เวียดนามตอนใต้ แหล่งในออสเตรเลียตะวันออก และไนจีเรีย ทั้งนี้ โดยหิน alkali basalts ซึ่งมักปรากฏตาม intra-plate rifting regimes มีแหล่งกำเนิดจากแมกมาในระดับลึก ทำหน้าที่นำคอร์ันดัม พร้อมทั้งแร่ และ ชิ้นส่วนของหินอื่นๆ ที่เกิดอยู่ก่อนแล้วที่ ระดับตื้นกว่า (mid-crustal levels) ขึ้นสู่ผิวโลก ในรูปของ xenocrysts และ xenoliths

ในส่วนของคอร์ันดัมที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหิน alkali basalts แบ่งออกได้เป็นสองชนิดด้วยกัน คือ ชนิด basaltic-magmatic (คอร์ันดัมตกผลึกภายใต้ภาวะแวดล้อมของหินอัคนี เช่น ใน pegmatites หรือ หินอัคนีที่มีปริมาณ Al สูงกว่าปกติ ก่อนที่จะถูก alkali basalts พาดขึ้นมา) และ ชนิด basaltic-metamorphic (คอร์ันดัมตกผลึกภายใต้ภาวะแวดล้อมของหินแปรหรือกระบวนการเกิดหินแปร ไม่ว่าจะเป็น metamorphic หรือ metasomatic processes ก่อนที่จะถูกพาดขึ้นสู่ผิวโลก)

คอร์ันดัมชนิด basaltic-magmatic มักมีสี น้ำเงิน-ม่วง, น้ำเงิน, น้ำเงินอมเขียว, เหลืองอมเขียว, หรือเหลือง ส่วนคอร์ันดัมชนิด basaltic-metamorphic มักมีสีค่อนข้างซีดหรือค่อนข้างมืด หรือ เป็นพลอยทึบทึม ทั้งนี้ ส่วนประกอบทางเคมี โดยเฉพาะปริมาณธาตุร่อร์รอย ของคอร์ันดัมทั้งสองชนิด ยังแตกต่างกันอย่างชัดเจนด้วย (Sutherland and others, 1998a; 1998b) สำหรับคอร์ันดัมจากแหล่ง Diego แสดงลักษณะสมบัติที่สอดคล้องกับชนิด basaltic-magmatic (Schwarz and others, 2000)

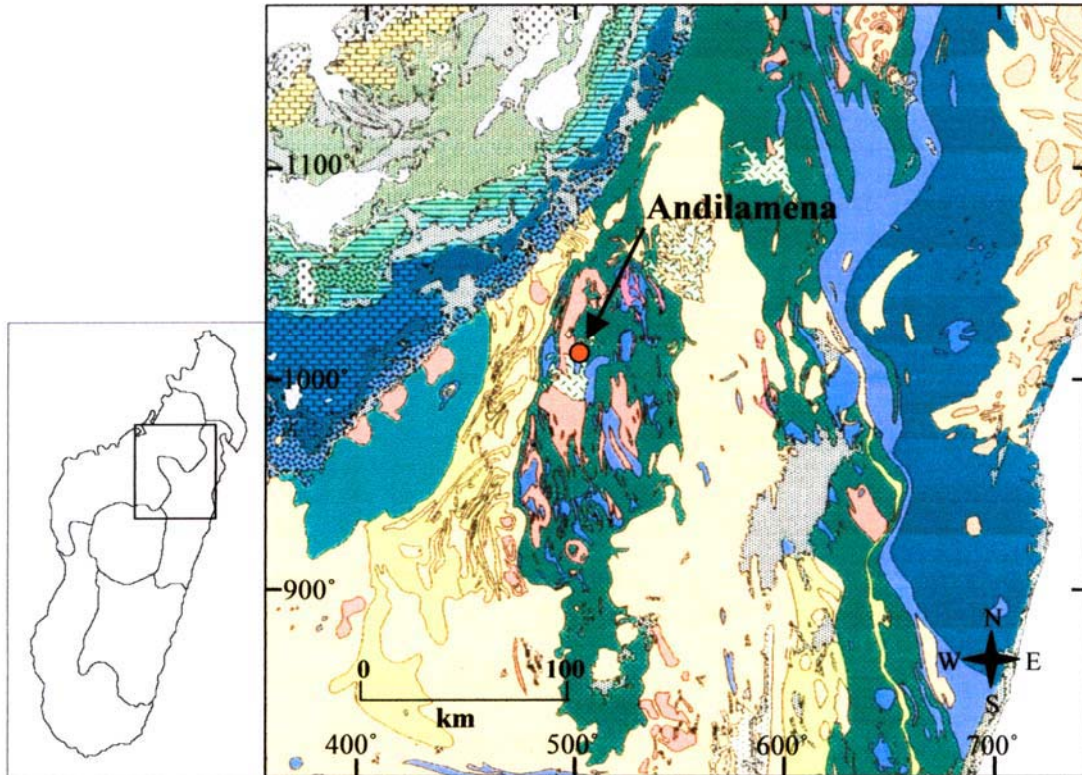
(2) แหล่งพลอยทางตอนกลางของประเทศ (Andilamena และ Vatomandry) (รูปที่ 3)

แหล่งพลอยคอร์ันดัมจากตอนกลางของประเทศมาดากัสการ์ ส่วนใหญ่เป็นพลอยทับทิม พบในบริเวณต่าง ๆ ภายในรัศมี 200 กิโลเมตร ของกรุง Antananarivo ซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศ ทั้งในเขตจังหวัด Antananarivo และจังหวัด Toamasina หรือ Tamatave

บริเวณที่เคยมีรายงานว่าพบพลอยคอร์ันดัม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลอยทับทิม โดยอาจพบແຮບไฟร້บั้ง ได้แก่ Andilamena, Ankaratra, Antanifotsy, Antsirabe, Faratsiho, Tamatave, และ Vatomandry เนื่องจากตัวอย่างพลอยที่ซื้อหามาได้สำหรับงานวิจัยนี้ ถูกระบุว่ามาจากแหล่ง Andilamena และแหล่ง Vatomandry จึงจะกล่าวถึงเฉพาะสองแหล่งนี้เท่านั้น แม้ว่าข้อมูลเท่าที่ปรากฏในรายงานต่าง ๆ จะระบุว่า พลอยคอร์ันดัมจากตอนกลางของมาดากัสการ์มีกำเนิดคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ สัมพันธ์กับหิน basalt (ตัวอย่างเช่น รัก ธรรมชาติ, 2544; Hughes, 1997) แต่ก็มีกรอ้างอิงที่มีได้เป็นรายงานทางวิชาการ ว่าพลอยทับทิมของแหล่ง Andilamena และ Vatomandry มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร จาก interaction ระหว่าง desilicated granitoid/pegmatitic intrusion กับ mafic/ultramafic host rocks (ตัวอย่าง เช่น Leuenberger, 2001 อ้างถึง Pezzotta โดยมีได้ระบุเอกสารอ้างอิง) ในรายงานทางวิชาการอื่นที่มีการตีพิมพ์และกล่าวถึงพลอยคอร์ันดัมจากบริเวณเหล่านี้ เช่น Schwarz and Schmetzer (2001) ระบุเพียงว่า ยังไม่มีข้อมูลรายละเอียดทางธรณีวิทยาเกี่ยวกับหินที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับพลอยทับทิมของทั้งแหล่ง Andilamena และ Vatomandry แต่ Pezzotta (2001) รายงานว่า แหล่งทับทิมทางตอนกลางด้านตะวันออกของมาดากัสการ์ น่าจะมีกำเนิดสัมพันธ์กับ alkaline volcanism ในยุค mid-Cretaceous เช่นเดียวกันกับแหล่งແຮບไฟร້บั้งทางตอนเหนือของประเทศ

ธรณีวิทยาของบริเวณตอนกลางของมาดากัสการ์ จากรายงานของ Paeck (1988) สรุปได้ดังนี้ หินฐานรากที่มีอายุแก่สุด คือหินแปรระดับสูง (granulite facies) ยุค Precambrian (อายุ กว่า 3,000 ล้านปี) มี anorthosite intrusion ซึ่งวัดอายุได้ 1,150 ล้านปี ต่อมาเกิด deformation รุนแรงในช่วงประมาณ 660 ล้านปี ตามด้วย syntectonic intrusions ช่วงระหว่าง 550 ถึง 485 ล้านปี หลังจากนั้น ตลอดช่วงมหายุค Paleozoic จนถึง Middle Mesozoic ในขณะที่พื้นที่บริเวณอื่น ๆ ของประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตอนใต้ ตะวันตก และ ส่วนเหนือสุด มีการสะสมตัวของหินตะกอนชนิดต่างๆ ทั้ง marine และ continental facies ส่วนกลางของมาดากัสการ์คงตัวเป็น exposed landmass ต่อเนื่องมาจนถึงยุค Cretaceous จึงปรากฏ basic volcanism บริเวณชายฝั่งด้านตะวันออก ตะวันตก และ ตอนใต้ ซึ่งวัดอายุได้ 90 ล้านปี และ basic volcanic activities ต่อเนื่องไปจนถึง Cenozoic โดยเฉพาะบริเวณตอนกลางและเหนือสุดของประเทศ

ลักษณะธรณีวิทยาดังกล่าว ทำให้มีความเป็นไปได้สูงที่แหล่งพลอยคอร์ันดัมทางตอนกลางและชายฝั่งตะวันออกของมาดากัสการ์ (Andilamena และ Vatomandry) จะมีกำเนิดสัมพันธ์กับ basic volcanic rocks หรือ basaltic rocks ดังที่กล่าวถึงข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง basalts อายุ mid-Cretaceous



รูปที่ 3 แผนที่แหล่งพลอยทางตอนกลางของประเทศมาดากัสการ์
(ดัดแปลงจากแผนที่ของ Ministry of Energy and Mines, Madagascar, 2002)

- แหล่ง Andilamena

Andilamena เป็นหมู่บ้านอยู่ในเขตจังหวัด Toamasina อยู่ห่างจากเมืองหลวง Antananarivo ไปทางเหนือประมาณ 240 กิโลเมตร แหล่งพลอยทับทิมเป็นแบบทุติยภูมิพบบริเวณใกล้หมู่บ้าน Ambatondrazaka ซึ่งเคยมีรายงานว่าพบ yellow chrysoberyl เป็นขอบด้านตะวันออกของที่ราบสูงทางเหนือของประเทศ อยู่ห่าง Andilamena ไปทางตะวันออกเฉียงเหนือราว 45 กิโลเมตร พบและเริ่มขุดหาครั้งแรกเมื่อเดือน ตุลาคม 2000 เป็นพลอยทับทิมสีค่อนข้างคล้ำ ต่อมาในเดือน มกราคม 2001 เริ่มพบพลอยที่คุณภาพดีขึ้น ชั้นกะสะอยู่ลึกจากผิวดินราว 2-3 เมตร พลอยค่อนข้างดก บางบริเวณได้พลอยกว่า 100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร พลอยส่วนใหญ่มีรอยร้าวและสีเข้ม ก่อนไปทางสี่ของโกเมน นอกจากพลอยทับทิมยังพบแซปไฟร์บ้าง คุณภาพพลอยโดยรวมสู้พลอยจาก Vatomandry ไม่ได้

- แหล่ง Vatomandry

Vatomandry เป็นเมืองชายฝั่งด้านตะวันออก อยู่ห่างจากเมืองหลวงไปทางตะวันออกเฉียงไปทางใต้เล็กน้อย ราว 160 กิโลเมตร แหล่งพลอย ซึ่งส่วนใหญ่สะสมตัวแบบทุติยภูมิ ชนิด eluvial deposits (Schwarz and Schmetzer, 2001) เริ่มมี การขุดหาราวเดือนกันยายน 2000 ตามแม่น้ำ Sakanila ห่างจากเมือง Vatomandry ไปทางตะวันตกเฉียงใต้ราว 30 กิโลเมตร บริเวณที่พบพลอยตกอยู่ใกล้หมู่บ้าน Tetezampaho ชั้นกะสะหนา 30 เซนติเมตร และอยู่ลึกจากผิวดินไม่เกินสองเมตร พลอยที่พบส่วนใหญ่เป็นทับทิม สีแดงอมม่วง ถึงแดงสด เม็ดกลมมน พบแซปไฟร์สีฟ้าอมเทาถึงเขียวบ้าง

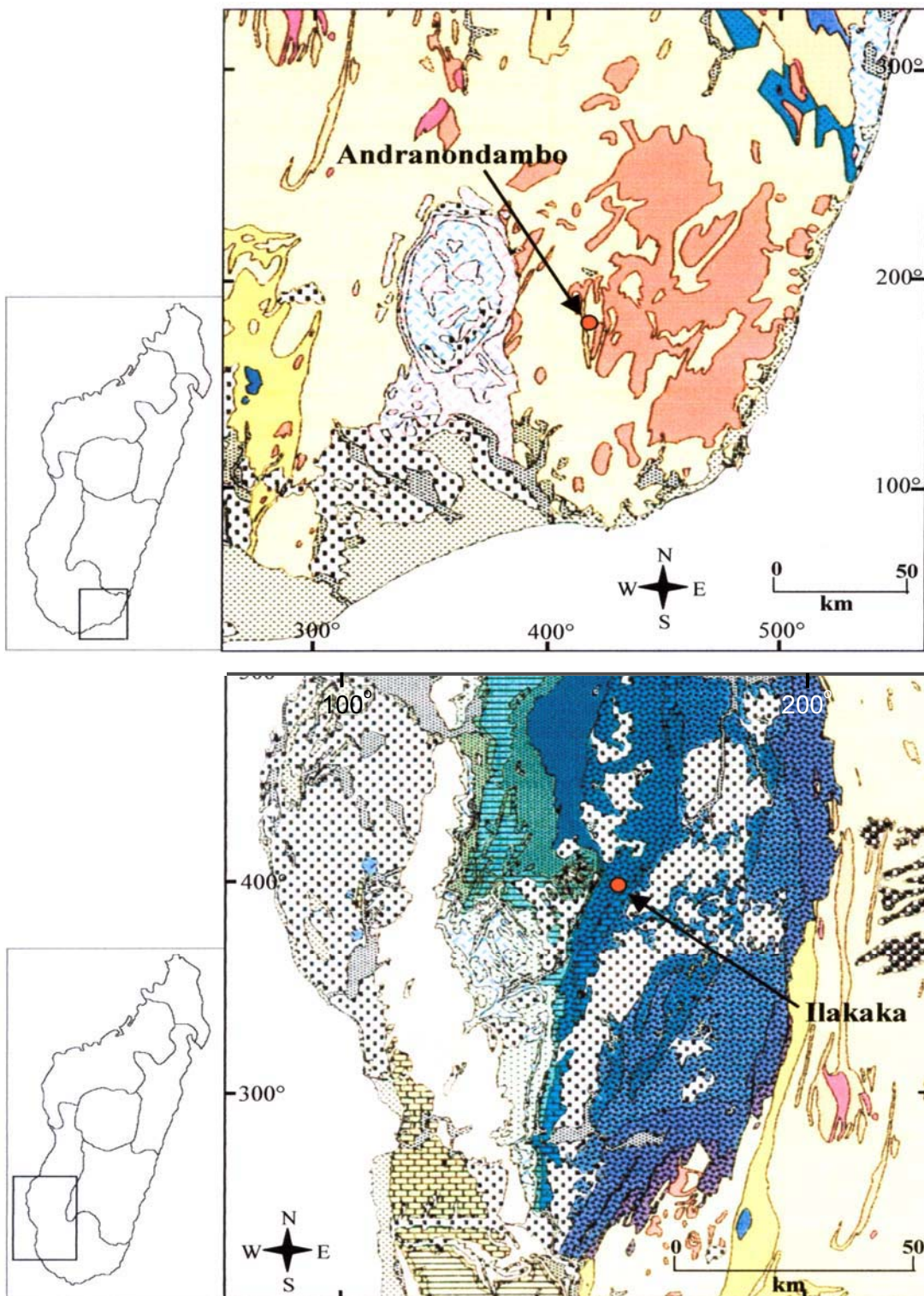
(3) แหล่งพลอยทางตอนใต้ของประเทศ (Andranondambo และ Ilakaka) (รูปที่ 4)

แหล่งพลอยคอร์ันดัมทางตอนใต้ของมาดากัสการ์ ทั้งทางบริเวณด้านตะวันออก (Andranondambo) และด้านตะวันตก (Ilakaka) แสดงกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร ก่อนข้างชัดเจน แม้ว่าในหลายพื้นที่ การขุดหาพลอยจะกระทำจากพลอยที่สะสมตัวแบบทุติยภูมิชนิด alluvial deposits ก็ตาม

ธรณีวิทยาของมาดากัสการ์ตอนใต้ มีหินแปรระดับสูง (granulite facies) อายุ Precambrian เป็นหน่วยหินสำคัญตามรายงานของ Nicollet (1990) หินแปรดังกล่าวแบ่งออกได้เป็น 3 Groups เรียงลำดับตามอายุ จากน้อยไปมาก จากด้านตะวันตกไปตะวันออก ดังนี้

- (1) Vohibory Group ประกอบด้วย amphibolite gneiss, amphibolite, marble เป็นหลัก มีระดับการแปร ใน greenschist และ amphibolite facies
- (2) Graphite Group ประกอบด้วย graphite-bearing gneiss, leptynite (banded quartzo-feldspathic granulite) และ mafic granulite มีการแปรในระดับ high-pressure granulite facies

- (3) Androyan Group ประกอบด้วย ortho- และ paragneisses มีการแปรในระดับ intermediate–pressure granulite facies ในกลุ่มนี้ มี granite อายุ 3,000 ล้านปี รวมอยู่ด้วย



รูปที่ 4 แผนที่ทางธรณีวิทยาแหล่งพลอยทางตอนใต้ของประเทศมาดากัสการ์
(ดัดแปลงจากแผนที่ของ Ministry of Energy and Mines, Madagascar, 2002)

- แหล่ง Andranondambo

พลอยแซปไฟร์ของแหล่ง Andranondambo และบริเวณใกล้เคียง พบอยู่ใน altered marble และ calc-silicate gneiss ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ Tranomaro Formation ใน Androyan Group หินเหล่านี้ถูก metamorphosed และ deformed ครั้งแรก เมื่อ 2,600 ล้านปี และต่อมา ผ่าน Pan-African tectonothermal events อีก เมื่อราว 500-600 ล้านปี Milisenda and Henn (1996) สรุปว่า พลอยแซปไฟร์ เกิดจากกระบวนการ high grade metamorphism ในช่วงนี้ (500-600 ล้านปี) ด้วย อย่างไรก็ตาม Kiefert and others (1996) รายงานว่า พลอยแซปไฟร์ของแหล่ง Andranondambo เกิดเป็นแหล่งแร่ แบบปฐมภูมิในสายคล้าย pegmatite ขนาดเล็ก(กว้าง 0.05-0.20 เมตร และยาว 5-50 เมตร) ซึ่งตัดผ่านเข้ามาในหิน Precambrian เปรียบเทียบได้กับ แซปไฟร์ ของ Kashmir และของ Umba Valley ในประเทศแทนซาเนีย จึงสรุปว่า แซปไฟร์เป็น late-stage product ของ Pan-African events จาก highly differentiated granitic magma ซึ่งมีปริมาณน้ำอยู่สูง อย่างไรก็ตาม บริเวณขอบของสายคล้าย pegmatite ในพื้นที่ทำเหมือง มี mineral zone ประกอบด้วย แร่ไมกา (ส่วนใหญ่เป็น phlogopite และ biotite), epidote, amphibole และ ออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งแสดงว่าเคยเกิด metasomatism อย่างกว้างขวางในบริเวณดังกล่าว นอกจากนั้น การที่พบ calcite ใน pegmatite และพบเป็นมลทินในแซปไฟร์ บ่งว่า calcite อาจมีกำเนิดมาจาก metasomatic fluids

Gübelin and Peretti (1997) มีความเห็นเกี่ยวกับกำเนิดของพลอยแซปไฟร์ในแหล่ง Andranondambo ที่แตกต่างออกไปอีก โดยอาศัยหลักฐานจากการศึกษาทั้ง mineral inclusions และ fluid inclusions หลากชนิดที่พบในแซปไฟร์ของแหล่งนี้สรุปว่า แซปไฟร์ของแหล่ง Andranondambo เกิดจากกระบวนการ metasomatism ซึ่งมีอย่างน้อยสอง stages ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับ fluids ที่มีส่วนประกอบทางเคมีต่างกัน Pezzotta (2001) สรุปโดยอ้างถึงรายงานของ Gübelin and Peretti (1997) ว่าแซปไฟร์แหล่งนี้กำเนิดแบบ skarn deposit และมี zircon เป็นแร่ที่เกิดร่วมด้วย

แหล่งพลอย Andranondambo พบเมื่อปี 1992 อยู่ห่างจากหมู่บ้าน Andranondambo ไปทางตะวันออกเฉียงเหนือราว 1 กิโลเมตร และ ไปทางใต้ราว 2 กิโลเมตร และยังพบที่ Antsiermene ซึ่งห่างออกไปทางเหนืออีกราว 10-12 กิโลเมตร แต่แหล่งที่มีความสมบูรณ์และมีบทบาทในเชิงพาณิชย์ เริ่มในปี 1994 (Henn and Milisenda, 2001) พลอยที่พบ ส่วนใหญ่เป็นแซปไฟร์สีน้ำเงิน ตั้งแต่สีอ่อนจนถึงเข้ม แต่มักแสดงสีไม่สม่ำเสมอทั่วเม็ด พบเกิดอยู่ในสายแร่บาง ๆ ที่ตัดผ่าน หรือแทรกเข้ามาในหินแปรระดับสูงของ granulite facies โดยสายแร่ดังกล่าว มักไม่ต่อเนื่อง และ ไม่มีทิศทางการวางตัวแน่นอนในบางพื้นที่ การขุดหาพลอยต้องขุดหลุมลึกถึง 20-30 เมตร ระหว่างที่มีการขุดหาพลอยกันมาก ผลผลิตเฉลี่ยถึงเดือนละประมาณ 100 กิโลกรัม แม้ว่า พลอยดิบส่วนใหญ่จะมีขนาดไม่เกิน 4 มิลลิเมตร ประมาณร้อยละ 15 ของผลผลิต เเจาะในได้ขนาดกว่า 2 กระรัต

- แหล่ง Ilakaka

ก่อนมีผู้พบพลอยแหล่งนี้เมื่อปลายปี 1998 ในแม่น้ำสายเล็กๆ (Ilakaka River) Ilakaka เป็นเพียงหมู่บ้านเล็กๆ ที่มีประชากรไม่ถึง 100 คน ภายในระยะเวลา 14 เดือนที่ข่าวการค้นพบพลอยแหล่งนี้แพร่ออกไป มีผู้คนหลั่งไหลมาแสวงโชคถึงกว่า 300,000 คน

Ilakaka อยู่ห่างเมืองหลวงไปทางตะวันตกเฉียงใต้ ราว 750 กิโลเมตร และห่างจากเมือง Tulear หรือ Toliara ซึ่งเป็นเมืองท่าฝั่งตะวันตกที่สำคัญของมาดากัสการ์ ไปทางตะวันออกเฉียงเหนือราว 215 กิโลเมตร พื้นที่ขุดหาพลอยมี 3 บริเวณที่สำคัญ (Chikayama and Furuya, 2001) ได้แก่

1. ระหว่าง Ranohira และ Sakahara รอบๆ หมู่บ้าน Ilakaka เป็นบริเวณประมาณ 50 x 130 กม.
2. ระหว่าง Andranolava และ Ankazoabo (อยู่เหนือบริเวณแรกเล็กน้อย) เป็นบริเวณประมาณ 40 x 70 กม.
3. บริเวณรอบๆ หมู่บ้าน Murarano ซึ่งอยู่ถัดขึ้นไปอีก ทางตะวันออกเฉียงเหนือ

แหล่งพลอย Ilakaka สะสมตัวแบบหุติภูมิ ชนิด alluvial deposit โดยหินฐานที่รองรับ เป็นหินชุด Isalo อายุปลายยุค Triassic ประกอบด้วย หินทราย และ หินดินดานสีแดง ชั้นกะสะที่ให้พลอย หนา โดยเฉลี่ย 0.8 – 1.0 เมตร อยู่ที่ระดับลึกจากผิวดิน ตั้งแต่ 5 ถึง 30 เมตร

พลอยที่พบ ส่วนใหญ่เป็นแซปไฟร์ สีชมพู (50%), สีฟ้า (30%), นอกนั้นเป็นสีอื่นๆ เช่น เหลือง, ส้ม, เขียวอ่อน, น้ำตาลอ่อน, แดง, แดงอมน้ำตาล, ม่วง, สีไม่มีสี นอกจากนี้ยังพบแร่ชนิดอื่น หลากหลาย สี เกิดรวมอยู่ด้วย เช่น spinel, garnet, beryl, chrysoberyl, topaz, tourmaline, andalusite, kyanite, zircon และ quartz

ลักษณะของพลอยคอร์นดัม และแร่อื่นๆ ที่เกิดร่วมแสดงถึงกำเนิดที่สัมพันธ์กับหินแปร คล้ายคลึงกับแหล่งพลอยของ ศรีลังกา และ แทนซาเนีย

Pezzotta (2001) สรุปว่า พลอยคอร์นดัมของแหล่ง Ilakaka นี้ มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร crystalline basement ยุค Precambrian ต่อมาหินแปรเหล่านี้เกิดการผุพังทำให้แร่ที่คงทนต่อการสึกกร่อน ถูกพัดพามาสะสมตัวกันในลักษณะของ palaeo-placer เป็น coarse-grained lenses และ gravel layers ในหินทราย graywacke อายุ Permian-mid Cretaceous (รูปที่ 5) ต่อมาหินทรายเหล่านี้เกิดผุพังสึกกร่อน ทำให้แร่ที่ทนทานต่อการผุพัง รวมทั้งแซปไฟร์สะสมตัวเป็นแหล่งหุติภูมิที่มีการทำเหมืองกันในปัจจุบัน



รูปที่ 5 พลอยแซปไฟร์สะสมตัวในชั้นกรวดของหินตะกอนยุค Permian ซึ่งเป็นแหล่งต้นกำเนิดของ พลอยคอร์นดัม แหล่ง Ilakaka ที่ขุดหากันในปัจจุบัน (ดัดแปลงจาก Pezzotta, 2001)

2.2 วิธีการที่ใช้ในการศึกษา

(1) การตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา

อาศัยเครื่องมืออุปกรณ์ของสาขาวิชาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังนี้

ก. ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity; S.G.) โดยใช้เครื่องชั่งละเอียด (รูปที่ 6)

ค่าความถ่วงจำเพาะ(ถ.พ.) ของพลอยหาได้ดังนี้

$$\text{ค่าความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักของคอร์นดัมเมื่อชั่งในอากาศ}}{\text{นน.คอร์นดัมชั่งในอากาศ} - \text{นน.คอร์นดัมชั่งในน้ำ}}$$

$$\text{หรือ} = \frac{\text{น้ำหนักของคอร์นดัมเมื่อชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักของคอร์นดัมที่หายไปเมื่อชั่งในน้ำ}}$$



รูปที่ 6 เครื่องชั่งละเอียด (hydrostatic balance) สำหรับชั่งน้ำหนักและหาค่าความถ่วงจำเพาะของพลอย

- ข. ค่าดัชนีหักเหแสง (refractive index; R.I.) โดยใช้เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ Duplex II (รูปที่ 7)
- ค. ค่าไบรีฟริงเจนซ์ (birefringence) ค่าไบรีฟริงเจนซ์หาได้จากผลต่างของค่าดัชนีหักเหที่มากที่สุด กับค่าดัชนีหักเหต่ำสุดของพลอยแต่ละเม็ด
- ง. การเรืองแสง (fluorescence) โดยใช้หลอดแสงอัลตราไวโอเลต (รูปที่ 8) การตรวจสอบการเรืองแสงทำโดยหาค่าการเรืองแสงของพลอยในช่วงคลื่นสั้น (short wave ultraviolet : SWUV) ซึ่งมีความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร และการเรืองแสงในช่วงคลื่นยาว (long wave ultraviolet : LWUV) ซึ่งมีความยาวคลื่น 365.4 นาโนเมตร
- จ. สเปกตรัมโดยใช้เครื่องสเปกโตรสโคป (รูปที่ 9)
- ฉ. จัดลำดับสี เพื่อแยกตัวอย่างพลอยออกเป็นกลุ่มสีต่างๆ โดยเปรียบเทียบกับชุดเทียบสีของ GIA (รูปที่ 10) โดยใช้วิธีส่องตัวอย่างพลอยในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง (น้ำหน้ำของพลอย) เปรียบเทียบกับ colour master ภายใต้แสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ให้แสงคล้ายแสงธรรมชาติ (daylight-equivalent light fluorescence) ใช้กระดาษขาวเป็นฉาก (รูปที่ 11)
- ช. ความโปร่งใสและมลทินในเนื้อพลอย ใช้วิธีส่องดูเนื้อพลอยด้วยลำแสงจากกระบอกไฟฉายสำหรับส่องพลอย (รูปที่ 12) และใช้กล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบอัญมณี (รูปที่ 13) และถ่ายภาพตัวอย่างที่สำคัญ



รูปที่ 8 กล้องแสงอัลตราไวโอเลต(UV lamp) สำหรับตรวจสอบการเรืองแสงของพลอย



รูปที่ 9 เครื่องสเปกโตรสโคป (spectroscope) สำหรับวัดสเปกตรัมของพลอย



รูปที่ 10 ชุดเทียบสีของ GIA (GIA Gem Set หรือ colour master)



รูปที่ 11 การเทียบสีพลอย กับชุดเทียบสี ภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์



รูปที่ 12 การส่องดูเนื้อพลอยด้วยกระบอกไฟฉายสำหรับส่องพลอย



รูปที่ 13 กล้องจุลทรรศน์สำหรับตรวจสอบอัญมณี (Gemolite)

พลอยแต่ละแหล่งจำหน่ายออกเป็นกลุ่ม ตามลักษณะเด่นของแหล่ง โดยเน้นที่สีเป็นลำดับแรก การจัดกลุ่มสี ใช้สัญลักษณ์และเทียบสีตามระบบสีของ GIA

โดยเทียบสีพลอยในทิศทางแกนแสง (c-axis) กับชุดเทียบสีพลอย GIA Gem Set การหาแกนแสงของพลอย ต้องจัดหน้าเรียบและจัดมันพลอยในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสงก่อน แล้วจึงตรวจสอบพลอยภายใต้เครื่อง polariscope พลอยจากแหล่ง Diego, Andilamena และ Andranondambo ส่วนใหญ่แสดงรูปผลึกชัดเจน จึงหาแกน C ได้ง่าย สำหรับพลอยที่ไม่สามารถหาแกนแสงด้วยเครื่อง polariscope ได้ เนื่องจากการจัดหน้าเรียบไม่ตั้งฉากกับแกนแสง จะเทียบสีกับหน้าพลอยที่มีสีเข้มที่สุดเป็นหลัก

การกำหนดสีพลอยใช้สัญลักษณ์ที่แสดงลักษณะ Hue Tone และ Saturation ซึ่งเป็นคำที่ใช้อธิบายหรือบ่งบอกสีของพลอย ดังนี้

Hue คือ สีที่เป็นสีหลักของพลอย เช่น แดง น้ำเงิน เหลือง

Tone คือ ความมืด-สว่างของพลอย

Saturation คือ ความเข้มหรือความอึมตัวของสีหลักของพลอย

สีหลัก (Hue) ของพลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีดังนี้

P	หมายถึง Purple	rP	หมายถึง reddish Purple
bP	หมายถึง bluish Purple	RP/PR	หมายถึง Red-Purple หรือ Purple-Red
stpR	หมายถึง strongly purplish Red	slpR	หมายถึง slightly purplish Red
R	หมายถึง Red	oR	หมายถึง orangy Red
yO	หมายถึง yellowish Orange	Y	หมายถึง Yellow
gY	หมายถึง greenish Yellow	GY/YG	หมายถึง Green-Yellow หรือ Yellow-Green

styG	หมายถึง	strongly yellowish Green	stgY	หมายถึง	strongly greenish Yellow
slgY	หมายถึง	slightly greenish Yellow	gB	หมายถึง	greenish Blue
B	หมายถึง	Blue	VB/BV	หมายถึง	Violet- Blue หรือ Blue-Violet
vB	หมายถึง	violetish Blue	V	หมายถึง	Violet
bV	หมายถึง	bluish Violet			

โทนสี (Tone) ความมืด-สว่างของพลอย แบ่งออกเป็น 11 โทน ตั้งแต่ 0 ถึง 10 ดังนี้

0	หมายถึง	colourless or white
1	หมายถึง	extremely light
2	หมายถึง	very light
3	หมายถึง	light
4	หมายถึง	medium light
5	หมายถึง	medium
6	หมายถึง	medium dark
7	หมายถึง	dark
8	หมายถึง	very dark
9	หมายถึง	extremely dark
10	หมายถึง	black

ความอึมตัวของสี (Saturation) สเกลที่บ่งถึงความอึมตัวของสีหลัก แบ่งได้เป็น 6 steps ตั้งแต่ 1 ถึง 6 ได้แก่

1	หมายถึง	grayish (brownish)
2	หมายถึง	slightly grayish (brownish)
3	หมายถึง	very slightly grayish (brownish)
4	หมายถึง	moderately strong
5	หมายถึง	strong
6	หมายถึง	vivid

ในการระบุถึงสีของตัวอย่าง ใช้สัญลักษณ์เรียงตามลำดับ hue tone และ saturation เช่น

ตัวอย่างหมายเลข Dig(b) 001 มีสีเป็น bV 3/4 :

bV	หมายถึง	bluish Violet (hue)
3	หมายถึง	light (tone)
4	หมายถึง	moderately strong (saturation)

ผลของการจำแนกพลอยตามกลุ่มสี ปรากฏดังนี้

คอร์ันดัมจากแหล่ง Diego Suarez

มีทั้งหมด 99 เม็ด ส่วนที่แสดงรูปผลึกชัดเจนแบบ hexagonal prism มักแสดง zoning ชัดเจน (รูปที่ 14) มีหลายลักษณะ ทั้งที่มีส่วนกลางเม็ดสีเข้มกว่าขอบ หรือส่วนกลางเม็ดสีอ่อนกว่าหรือไม่มีสี บางส่วนแสดง colour patch สีน้ำเงิน น้ำตาล สีขาวขุ่นและขาวใส สีจำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม ตามกลุ่มสีหลัก และสีของแกนกลาง (core) ได้แก่

1. กลุ่มที่มีสีเดียวกันทั่วทั้งเม็ด แบ่งเป็น

1.1 กลุ่มสีม่วงอมน้ำเงิน (bV) มี 12 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 6 โทน คือ

3 /4 จำนวน 2 เม็ด [Dig(b)001, Dig(b)002]

4 /3 จำนวน 1 เม็ด [Dig(b)003]

4 /5 จำนวน 1 เม็ด [Dig(b)004]

5 /3 จำนวน 1 เม็ด [Dig(b)005]

5 /4 จำนวน 3 เม็ด [Dig(b)006, Dig(b)007, Dig(b)008]

6 /4 จำนวน 4 เม็ด [Dig(b)009, Dig(b)010, Dig(b)011, Dig(b)012]

1.2 กลุ่มที่มีสีน้ำเงินอมเขียว (gB) มี 1 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ

2/2 จำนวน 1 เม็ด [Dig(b)013]

1.3 กลุ่มที่มีสีน้ำเงิน (B) มี 3 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 2 โทน คือ

5 /1 จำนวน 1 เม็ด [Dig(b)014]

5 /2 จำนวน 2 เม็ด [Dig(b)015, Dig(b)016]

2. กลุ่มที่มีสองสีในเม็ดเดียวกัน (สังเกตจากทิศทางขนานกับแกนแสง) แบ่งเป็น

2.1 สีบริเวณแกนกลางไม่มีสี ขอบสีม่วงอมน้ำเงิน (cc) = colourless core มี 12 เม็ด [Dig(cc)001 - Dig(cc)012] โดยสีม่วงอมน้ำเงิน (bV) บริเวณขอบ มีหลายโทน ได้แก่ 4/3, 4/5, 5/4, 5/5, 6/4, 6/5, 7/4

2.2 สีบริเวณแกนกลางเป็นสีม่วงอมน้ำเงินขอบสีน้ำเงิน (bc) = blue core มี 2 เม็ด [Dig(bc)001 - Dig(bc)002] โดยสีม่วงอมน้ำเงิน (bV) มี 1 โทน ได้แก่ 6/4 และ สีน้ำเงินอมม่วงบริเวณขอบมี 1 โทน ได้แก่ 5/3

2.3 สีบริเวณแกนกลางเป็นสีเหลืองขอบสีน้ำเงิน (yc) = yellow core มี 38 เม็ด [Dig(yc)001 - Dig(yc)038]

- โดยสีเหลืองมีสีต่างๆ ได้แก่ สีเหลืองอมเขียว (gY) มีหลายโทน คือ 2/1, 2/2, 2/3, 3 /4, 4/3 สีเหลืองเขียว (GY/YG) มี 3 โทน คือ 2/1, 2/3, 4/3 สีเหลืองอมเขียวเข้ม (stgY) มี 1 โทน คือ 2/1

- สีน้ำเงินบริเวณขอบ มีสีต่างๆ ได้แก่ สีน้ำเงินอมม่วง (vB) มีหลายโทน คือ 4/3, 4/4, 5/3, 7/3 สีม่วงอมน้ำเงิน (bV) มีหลายโทน คือ 3/4, 4/3, 4/4, 4/5, 5/4, 6/4, 7/4, 8/3
- 2.4 กลุ่มที่มีสีหลักเป็นสีเหลือง และมีแถบสี(patch/zone) ต่างๆ ปนอยู่ มี 31 เม็ด [Dig(y)001 - Dig(y)031]
- โดยสีเหลืองมีสีต่างๆ ได้แก่ สีเหลืองอมเขียว (gY) มีหลายโทน คือ 2/3, 3/4 สีเหลือง-เขียว/เขียว-เหลือง (GY/YG) มี 1 โทน คือ 2/1
 - แถบสีหรือโซนสีที่พบ มีหลายสี ได้แก่ สีน้ำเงิน สีน้ำตาล สีฟ้า-ขาว (milky blue) และสีขาวขุ่น (milky white)

คอร์นดัมจากแหล่ง Andilamena

ที่คัดเลือกมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางแสง มี 302 เม็ด พลอยเกือบทั้งหมดแสดงรูปผลึกแบบ tabular to short prismatic ชัดเจน ผิวผลึกมักขรุขระ บางเม็ดแสดงผิวผลึกที่สึกกร่อนเป็นรูปสามเหลี่ยม (triangle etching) ชัดเจนมาก ดังรูปที่ 15 ในการศึกษาจำแนกได้เป็น 6 กลุ่ม ตามกลุ่มสี (การจัดลำดับสี สังเกตในทิศขนานกับแกนแสง) และจำแนกออกเป็นกลุ่มย่อย โดยใช้ลักษณะภายในและมลทินที่มีลักษณะเด่นเป็นหลัก ได้แก่

การจำแนกออกเป็นกลุ่มสีจำแนกได้ 6 กลุ่ม ได้แก่

- | | |
|--|--------------------|
| 1. กลุ่มสีแดง (R) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1 |
| 2. กลุ่มสีแดง-ม่วง หรือ ม่วง-แดง (PR/RP) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2 |
| 3. กลุ่มสีแดงอมม่วงเข้ม (stpR) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 3 |
| 4. กลุ่มสีแดงอมม่วงอ่อน(slpR) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 4 |
| 5. กลุ่มที่มีสีสองสีในเม็ดเดียวกัน | ใช้สัญลักษณ์เป็น 5 |
| 6. กลุ่มที่มีสีแดงอมส้ม (oR) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 6 |

แต่ละกลุ่มสี จำแนกออกเป็นกลุ่มย่อยได้เป็น 6 กลุ่ม โดยใช้ลักษณะภายในและมลทินที่มีลักษณะเด่น ได้แก่

- | | |
|---|--------------------|
| 1. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็น มลทินของแข็ง (solid inclusions) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1 |
| 2. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็นรอยแตก (cracks) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2 |
| 3. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็นรอยแตกที่มีการเชื่อมประสาน(healed-fractures) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 3 |
| 4. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็นมลทินแท่งเข็ม (needles) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 4 |
| 5. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็นมลทินสีขาวขนาดเล็ก (white particle) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 5 |
| 6. กลุ่มที่ใสไม่มีมลทิน หรือมีมลทินน้อยมาก (clear) | ใช้สัญลักษณ์เป็น 6 |

7. กลุ่มที่มีมลทินภายในเป็นคราบสีน้ำตาล (brown stain)

ใช้สัญลักษณ์เป็น 7

1. กลุ่มสีแดง (R) มี 22 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ 5/6 แบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามลักษณะภายในดังนี้

Anm 1-1	มีจำนวน	- เม็ด (1 แทนกลุ่มสี , 1 แทนลักษณะมลทิน ตามสัญลักษณ์ข้างต้น)
Anm 1-2	มีจำนวน	4 เม็ด [Anm 1-2-001 ถึง Anm 1-2-004]
Anm 1-3	มีจำนวน	6 เม็ด [Anm 1-3-001 ถึง Anm 1-3-006]
Anm 1-4	มีจำนวน	3 เม็ด [Anm 1-4-001 ถึง Anm 1-4-003]
Anm 1-5	มีจำนวน	8 เม็ด [Anm 1-5-001 ถึง Anm 1-5-008]
Anm 1-6	มีจำนวน	1 เม็ด [Anm 1-6-001]

2. กลุ่มสีแดง-ม่วง หรือ ม่วง-แดง (PR/RP) มี 156 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 5 โทน คือ 4/5, 5/3, 6/3, 6/4 และ 6/6

Anm 2-1	มีจำนวน	21 เม็ด [Anm 2-1-001 ถึง Anm 2-1-021]
Anm 2-2	มีจำนวน	28 เม็ด [Anm 2-2-001 ถึง Anm 2-2-028]
Anm 2-3	มีจำนวน	2 เม็ด [Anm 2-3-001 ถึง Anm 2-3-002]
Anm 2-4	มีจำนวน	15 เม็ด [Anm 2-4-001 ถึง Anm 2-4-015]
Anm 2-5	มีจำนวน	46 เม็ด [Anm 2-5-001 ถึง Anm 2-4-046]
Anm 2-6	มีจำนวน	31 เม็ด [Anm 2-6-001 ถึง Anm 2-6-031]
Anm 2-7	มีจำนวน	13 เม็ด [Anm 2-7-001 ถึง Anm 2-7-013]

3. กลุ่มสีแดงอมม่วงเข้ม (stpR) มี 70 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 4 โทน คือ 6/4, 6/5-6/6, 6/6-6/5 และ 7/3

Anm 3-1	มีจำนวน	14 เม็ด [Anm 3-1-001 ถึง Anm 3-1-014]
Anm 3-2	มีจำนวน	18 เม็ด [Anm 3-2-001 ถึง Anm 3-2-018]
Anm 3-3	มีจำนวน	4 เม็ด [Anm 3-3-001 ถึง Anm 3-3-004]
Anm 3-4	มีจำนวน	5 เม็ด [Anm 3-4-001 ถึง Anm 3-4-005]
Anm 3-5	มีจำนวน	22 เม็ด [Anm 3-5-001 ถึง Anm 3-5-022]
Anm 3-6	มีจำนวน	7 เม็ด [Anm 3-6-001 ถึง Anm 3-5-007]

4. กลุ่มสีแดงอมม่วงอ่อน (slpR) มี 42 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 3 โทน คือ 6/3, 6/6-6/5 และ 7/4

Anm 4-1	มีจำนวน	3 เม็ด [Anm 4-1-001 ถึง Anm 4-1-003]
Anm 4-2	มีจำนวน	13 เม็ด [Anm 4-2-001 ถึง Anm 4-2-013]
Anm 4-3	มีจำนวน	4 เม็ด [Anm 4-3-001 ถึง Anm 4-3-004]
Anm 4-4	มีจำนวน	9 เม็ด [Anm 4-4-001 ถึง Anm 4-4-009]
Anm 4-5	มีจำนวน	7 เม็ด [Anm 4-5-001 ถึง Anm 4-5-007]
Anm 4-6	มีจำนวน	6 เม็ด [Anm 4-6-001 ถึง Anm 4-6-006]

5. กลุ่มที่มีสีสองสีในเม็ดเดียวกัน มี 3 เม็ด

Anm 5-2	มีจำนวน	1 เม็ด	[Anm 5-2-001]
Anm 5-3	มีจำนวน	1 เม็ด	[Anm 5-3-001]
Anm 5-5	มีจำนวน	1 เม็ด	[Anm 5-5-001]
6. กลุ่มที่มีสีแดงอมส้ม (oR) มี 9 เม็ด จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ 5/4

Anm 6-2	มีจำนวน	2 เม็ด	[Anm 6-2-001 ถึง Anm 6-2-002]
Anm 6-4	มีจำนวน	1 เม็ด	[Anm 6-4-001]
Anm 6-5	มีจำนวน	6 เม็ด	[Anm 6-5-001 ถึง Anm 6-5-006]

คอรัันดัมจากแหล่ง Vatomandry

มีทั้งหมด 93 ตัวอย่าง ตัวอย่างบางส่วนแสดงรูปผลึกแบบ elongated hexagonal prism ส่วนที่ไม่แสดงรูปผลึกมีลักษณะเกลี้ยงมันหรืออาจมีผิวขรุขระ (รูปที่ 16) ตัวอย่างทั้งหมดมีสีแดงใส แบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ตามกลุ่มสีหลัก (ไม่ได้แบ่งตาม inclusions เนื่องจากทุกกลุ่มสี พบ inclusions ได้หลากหลาย) ได้แก่

1. สีแดงอมส้ม (oR) จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ

oR 7/4	มีจำนวน	2 เม็ด	[Vam 1-001 ถึง Vam 1-002]
--------	---------	--------	-----------------------------
2. สีแดงอมม่วงอ่อน (slpR) จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ

slpR 6/5	มีจำนวน	1 เม็ด	[Vam 2-001]
----------	---------	--------	---------------
3. สีม่วง-แดง หรือแดง-ม่วง (PR/RP) จัดแบ่งได้เป็น 4 โทน คือ

PR/RP 6/4	มีจำนวน	72 เม็ด	[Vam 3-001 ถึง Vam 3-072]
PR/RP 6/3	มีจำนวน	1 เม็ด	[Vam 3-073]
PR/RP 5/3	มีจำนวน	2 เม็ด	[Vam 3-074 ถึง Vam 3-075]
PR/RP 4/3	มีจำนวน	1 เม็ด	[Vam 3-076]
4. สีแดงอมม่วงเข้ม (stpR) จัดแบ่งได้เป็น 3 โทน คือ

stpR 6/6	มีจำนวน	2 เม็ด	[Vam 4-001 ถึง Vam 4-002]
stpR 6/4	มีจำนวน	11 เม็ด	[Vam 4-003 ถึง Vam 4-013]
stpR 5/4	มีจำนวน	1 เม็ด	[Vam 4-014]

คอร์นดัมจากแหล่ง Andranondambo

มีทั้งหมด 48 ตัวอย่าง ตัวอย่างมีสีน้ำเงิน น้ำเงินอมม่วง ถึงม่วงอมน้ำเงิน แต่สีไม่สม่ำเสมอ มีทั้งที่ใสและที่มีสีขุ่นเข้ม ส่วนใหญ่ใสและแสดง zoning หรือ colour patch เป็นสีน้ำเงินเข้ม มีส่วนที่สีขาวขุ่นและเทาบ้าง (รูปที่ 17) ที่แสดงรูปผลึกชัดเจนมีลักษณะเป็น dipyrmaid ถึง barrel shape นอกจากนั้นแสดงรูปผลึกบางส่วน แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามกลุ่มสีหลัก ได้แก่

1. กลุ่มสีน้ำเงิน (B) จัดแบ่งได้เป็น 2 โทน คือ
 - 2/2 มีจำนวน 1 เม็ด [Anb 001]
 - 3/1 มีจำนวน 1 เม็ด [Anb 002]
2. กลุ่มสีน้ำเงินอมม่วง (vB) จัดแบ่งได้เป็น 1 โทน คือ
 - 3/3 มีจำนวน 1 เม็ด [Anb 003]
3. กลุ่มสีม่วงอมน้ำเงิน (bV) จัดแบ่งได้เป็น 5 โทน คือ
 - 2/3 มีจำนวน 3 เม็ด [Anb 004 ถึง Anb 006]
 - 3/4 มีจำนวน 4 เม็ด [Anb 007 ถึง Anb 010]
 - 5/5 มีจำนวน 16 เม็ด [Anb 011 ถึง Anb 026]
 - 6/5 มีจำนวน 15 เม็ด [Anb 027 ถึง Anb 041]
 - 7/4 มีจำนวน 7 เม็ด [Anb 042 ถึง Anb 048]

คอร์นดัมจากแหล่ง Ilakaka

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางแสงของตัวอย่างจำนวน 96 เม็ด ตัวอย่างทั้งหมดไม่แสดงรูปผลึก แสดงสีชัดเจน (รูปที่ 18 ถึง 21) สามารถจัดลำดับสีได้โดยเทียบกับชุดเทียบสีของ GIA จำแนกตัวอย่างเป็นกลุ่มตามกลุ่มสีหลักได้ 4 กลุ่ม คือ

1. สีน้ำเงิน ใช้สัญลักษณ์เป็น (b)
2. สีเขียว ใช้สัญลักษณ์เป็น (g)
3. สีเหลือง – ส้ม ใช้สัญลักษณ์เป็น (y) และ (o)
4. สีม่วงดอกมะเขือ(purple) – ม่วงดอกอัญชัน(violet) ใช้สัญลักษณ์เป็น (p) และ (v)

1. กลุ่มสีน้ำเงิน รหัสตัวอย่าง **Ilk(b)** มีจำนวน 20 เม็ด จัดแบ่งได้เป็นโทนต่างๆ ได้แก่
 - น้ำเงินอมเขียว (gB) มีจำนวน 3 เม็ด แบ่งเป็นโทน 2/2 2 เม็ด [Ilk(b)001, Ilk(b)002] และ vsIgB 2/2 1 เม็ด [Ilk(b)003]
 - น้ำเงิน (B) มีจำนวน 6 เม็ด แบ่งเป็นโทน 2/2 5 เม็ด [Ilk(b)004 – Ilk(b)008] และ 3/1 1 เม็ด [Ilk(b)009]

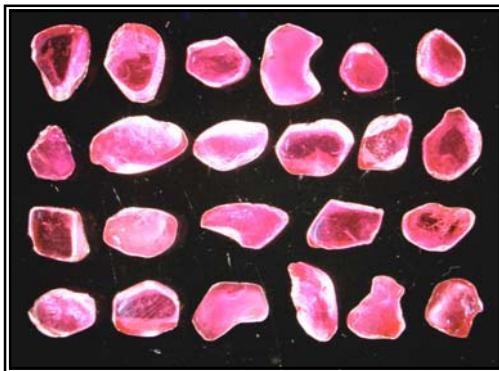
- น้ำเงินอมม่วง (vB) มีจำนวน 3 เม็ด แบ่งเป็นโทน $3/3$ 1 เม็ด [Ilk(b)010] $3/4$ 1 เม็ด [Ilk(b)011] และ $4/3$ 1 เม็ด [Ilk(b)012]
- ม่วงอมน้ำเงิน (bV) มีจำนวน 7 เม็ด แบ่งเป็นโทน $2/3$ 4 เม็ด [Ilk(b)013 – Ilk(b)016] และ $4/3$ 3 เม็ด [Ilk(b)018 – Ilk(b)020]
- น้ำเงิน-ม่วง (BV) มีจำนวน 1 เม็ด มี 1 โทน คือ $2/3$ [Ilk(b)017]



รูปที่ 14 คอรัณดัมจากแหล่ง Diego



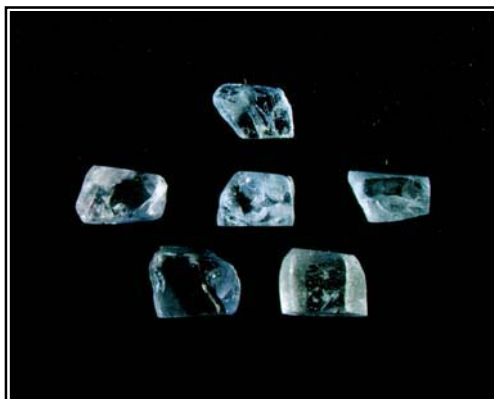
รูปที่ 15 ทับทิมจากแหล่ง Andilamena



รูปที่ 16 ทับทิมจากแหล่ง Vatomandry



รูปที่ 17 คอรัณดัมจากแหล่ง Andranondambo



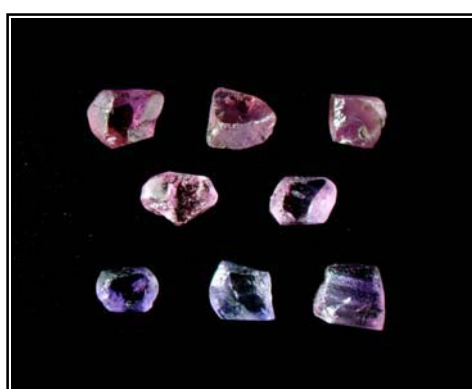
รูปที่ 18 คอรัณดัมสีน้ำเงินจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 19 คอรัณดัมสีเขียวจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 20 คอรัณดัมสีเหลืองจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 21 คอรัณดัมสีชมพู-ม่วงจากแหล่ง

2. กลุ่มสีเขียว รหัสตัวอย่าง **Ilk(g)** มีจำนวน 12 เม็ด จัดแบ่งได้เป็นโทนต่างๆ ได้แก่

- สีเหลืองอมเขียว (gY) มีจำนวน 5 เม็ด มี 1 โทน คือ 2/3 [Ilk(g)001 - Ilk(g)005]
- สีเหลือง-เขียว หรือ เขียว-เหลือง (YG/GY) มีจำนวน 3 เม็ด มี 1 โทนคือ 2/1 [Ilk(g)006-Ilk(g)

008]

- สีเขียวอมเหลืองเข้ม (styG) มีจำนวน 4 เม็ด มี 1 โทน คือ 2/3 [Ilk(g)009 - Ilk(g)012]

3. กลุ่มสีเหลือง-ส้ม รหัสตัวอย่าง **Ilk(y), Ilk(o)** มีจำนวน 14 เม็ด จัดแบ่งได้เป็นโทนต่างๆ ได้แก่

- สีเหลืองอมเขียวอ่อน (slgY) มีจำนวน 1 เม็ด มี 1 โทน คือ 2/3 [Ilk(y)001]
- สีเหลือง (Y) มีจำนวน 11 เม็ด มี 3 โทน คือ 3/4 4 เม็ด [Ilk(y)002, Ilk(o)002 – Ilk(o)004]
โทน 3/5 5 เม็ด [Ilk(y)003 - Ilk(y)007] และโทน 4/5 2 เม็ด [Ilk(y)008, Ilk(y)009]
- สีเหลืองอมส้ม (oY) มีจำนวน 1 เม็ด มี 1 โทน คือ 2/3 [Ilk(o)001]
- สีส้มอมเหลือง (yO) มีจำนวน 1 เม็ด มี 1 โทน คือ 3/3 [Ilk(o)005]

4. กลุ่มสีม่วงดอกมะเขือ-ม่วงดอกอัญชัน รหัสตัวอย่าง **Ilk(p), Ilk(v)** มีจำนวน 50 เม็ด จัดแบ่งได้เป็นโทนต่างๆ ได้แก่

- สีม่วงดอกมะเขือ (P) มีจำนวน 6 เม็ด มี 3 โทน คือ 3 /4 3 เม็ด [Ilk(p)001, Ilk(p)002, Ilk(v)015] 6/3 2 เม็ด [Ilk (v) 008,Ilk(v) 014] และ 6/4 1 เม็ด [Ilk(v)009]
- สีม่วงดอกมะเขืออมแดง (rP) มีจำนวน 23 เม็ด มี 3 โทน คือ 2/3 14 เม็ด [Ilk(p)003 - Ilk(p)016], 3/4 2 เม็ด [Ilk(p)017, Ilk(p)018] และ 5/3 7 เม็ด [Ilk(p)019 - Ilk(p)021, Ilk(v)013, Ilk(v)017, Ilk(v)018, Ilk(v)019]
- สีม่วง-แดงหรือ แดง-ม่วง (PR/RP) มีจำนวน 8 เม็ด มี 3 โทน คือ 5/3 4 เม็ด [Ilk(p)022 - Ilk(p)025], 2/1 2 เม็ด [Ilk(p)029, Ilk(v)016] และ 4/2 1 เม็ด [Ilk(p)030] และ 6/3 1 เม็ด [Ilk(v)020]
- สีแดงอมม่วงเข้ม (stpR) มีจำนวน 3 เม็ด มี 3 โทน คือ 2/3 2 เม็ด [Ilk(p)026, Ilk(p)027] และ 3/3 1 เม็ด [Ilk(p)028]
- สีม่วงดอกอัญชัน (V) มีจำนวน 8 เม็ด มี 6 โทน คือ 2/1 3 เม็ด [Ilk(v)004 – Ilk(v)006], 3/2 2 เม็ด [Ilk(v)007, Ilk(v)010], 4/4 1 เม็ด [Ilk(v)002], 4/5 1 เม็ด [Ilk(v)003], 5/2 1 เม็ด [Ilk(v)001]
- สีม่วงดอกมะเขืออมน้ำเงิน (bP) มีจำนวน 2 เม็ด มี 2 โทน คือ 2/3 1 เม็ด [Ilk(v)012] และ 3/2 1 เม็ด [Ilk(v)011]

ตัวอย่างพลอยจากแหล่ง Ilakaka ที่ซื้อในงวดที่ 2

จากตัวอย่างที่ซื้อมาทั้งหมดในงวดที่ 2 จำนวน 5,146 เม็ด ทำการคัดเลือกตัวอย่างที่เป็นคอรั้นดำจำนวน 165 เม็ด (เนื่องจากมีพลอยเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ ปนอยู่มาก) มาทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางแสงของตัวอย่างจำแนกตัวอย่างเป็นกลุ่มตามลักษณะของหน้าได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีหน้า และกลุ่มที่มีสีอ่อนใส (ไม่มีหน้า)

1. กลุ่มที่มีหน้า แยกตามชนิดหน้าได้ 4 กลุ่ม คือ

- | | |
|--------------------|----------------------|
| 1.1 กลุ่มหน้าทอง | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1-1 |
| 1.2 กลุ่มหน้าเข้ม | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1-2 |
| 1.3 กลุ่มหน้าอ่อน | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1-3 |
| 1.4 กลุ่มหน้าปนหิน | ใช้สัญลักษณ์เป็น 1-4 |

2. กลุ่มที่ไม่มีหน้า เป็นกลุ่มที่ใสมีสีอ่อนมาก แยกตามสีได้ 7 กลุ่ม คือ

- | | |
|----------------|----------------------|
| 2.1 สีขาวใส | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-1 |
| 2.2 สีเหลืองใส | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-2 |
| 2.3 สีส้มอ่อน | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-3 |
| 2.4 สีชมพู | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-4 |
| 2.5 สีเขียว | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-5 |
| 2.6 สีฟ้า | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-6 |
| 2.7 สีม่วง | ใช้สัญลักษณ์เป็น 2-7 |

1. กลุ่มที่แสดงหน้าชัดเจน

ตัวอย่างที่แสดงลักษณะหน้า ศึกษาลักษณะของหน้าโดยใช้ไฟฉายสำหรับส่องพลอย สามารถเลือกคอรั้นดำจากแหล่ง Ilakaka ที่มีหน้าได้ทั้งหมด 179 เม็ด จากนั้นคัดมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางแสงจำนวน 56 เม็ด ตัวอย่างเกือบทั้งหมดไม่แสดงรูปผลึก สีฟ้า ถึงน้ำเงิน แสดงลักษณะสีขาวขุ่นหรือหน้าทั้งแบบทั่วทั้งเม็ดหรือแสดงบางส่วน (รูปที่ 22) จากการศึกษา (ร่วมกับที่ปรึกษาโครงการฯ) สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 4 กลุ่ม ได้แก่

- | |
|---|
| 1.1 กลุ่มที่มีหน้าทอง : Ilk 1-1 มีจำนวน 18 เม็ด [Ilk 1-1-001 ถึง Ilk 1-1-018] |
| 1.2 กลุ่มที่มีหน้าเข้ม : Ilk 1-2 มีจำนวน 23 เม็ด [Ilk 1-2-001 ถึง Ilk 1-2-023] |
| 1.3 กลุ่มที่มีหน้าอ่อน : Ilk 1-3 มีจำนวน 10 เม็ด [Ilk 1-3-001 ถึง Ilk 1-3-010] |
| 1.4 กลุ่มที่มีหน้าปนหิน : Ilk 1-4 (เป็นลักษณะที่แสดงหน้า แต่มีลักษณะของสิ่งแปลกปลอมของแร่ชนิดอื่นเข้ามาปน) มีจำนวน 5 เม็ด [Ilk 1-4-001 ถึง Ilk 1-4-005] |

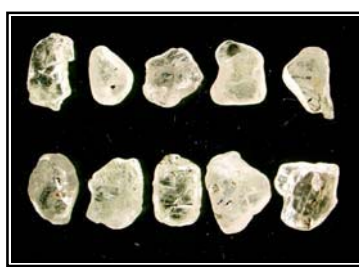
2. กลุ่มที่มีสีอ่อนใส

คัดเลือกมาศึกษาจำนวน 109 เม็ด ตัวอย่างทั้งหมดไม่แสดงรูปผลึก มักมีลักษณะค่อนข้างแบน ส่วนใหญ่แสดง parting ชัดเจน ในการศึกษาแบ่งเป็นกลุ่มสีต่างๆ ได้ 7 กลุ่ม (รูปที่ 23 ถึง 29)

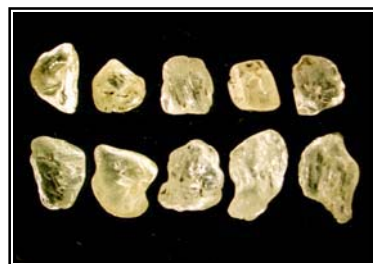
1. ใสไม่มีสี (colourless) ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-1 มีจำนวน 10 เม็ด [Ilk 2-1-001 ถึง Ilk 2-1-010]
2. สีเหลืองใส (light yellow) ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-2 มีจำนวน 20 เม็ด [Ilk 2-2-001 ถึง Ilk 2-2-020]
3. สีส้มอ่อน (light orange) ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-3 มีจำนวน 14 เม็ด [Ilk 2-3-001 ถึง Ilk 2-3-014]



รูปที่ 22 คอรันดัมหม่าจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 23 คอรันดัมใสไม่มีสีจากแหล่ง



รูปที่ 24 คอรันดัมสีเหลืองอ่อนจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 25 คอรันดัมสีส้มอ่อนจากแหล่ง



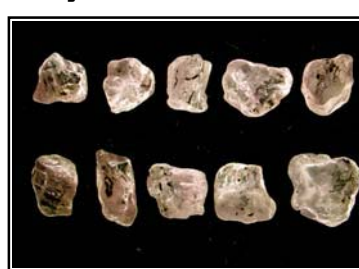
รูปที่ 26 คอรันดัมสีชมพูอ่อนจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 27 คอรันดัมสีเขียวอ่อนจากแหล่ง



รูปที่ 28 คอรันดัมสีฟ้าอ่อนจากแหล่ง Ilakaka



รูปที่ 29 คอรันดัมสีม่วงจากแหล่ง Ilakaka

- | | |
|--------------------------|--|
| 4. สีชมพู (light pink) | ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-4 มีจำนวน 20 เม็ด [Ilk 2-4-001 ถึง Ilk 2-4-020] |
| 5. สีเขียว (light green) | ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-5 มีจำนวน 13 เม็ด [Ilk 2-5-001 ถึง Ilk 2-5-013] |
| 6. สีฟ้า (light blue) | ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-6 มีจำนวน 14 เม็ด [Ilk 2-6-001 ถึง Ilk 2-6-014] |
| 7. สีม่วง (light purple) | ใช้สัญลักษณ์เป็น Ilk 2-7 มีจำนวน 18 เม็ด [Ilk 2-7-001 ถึง Ilk 2-7-018] |

ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ และสมบัติพื้นฐานทางอณูโมเลกุลของทับทิมและแชปไฟร์จากแหล่งต่างๆ ของมาดากัสการ์

แชปไฟร์จากแหล่งดีเอโก

มีค่าความถ่วงจำเพาะ	: ระหว่าง 3.960 ถึง 4.065
ค่าดัชนีหักเห	: $n_c = 1.759 - 1.769$ $n_o = 1.767 - 1.779$
ค่าไบรีฟริงเจนซ์	: 0.008 - 0.010
การเรืองแสง	: ไม่เรืองแสงภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต
ลำดับสี	: น้ำเงิน, น้ำเงินอมม่วง, น้ำเงินอมเขียว, ม่วงอมน้ำเงิน, เหลืองอมเขียว ถึง เขียวอมเหลือง
สเปกตรัม	: แชปไฟร์ส่วนใหญ่แสดงแถบการดูดกลืนแสงเนื่องจากธาตุเหล็ก (Fe^{3+}) ที่ 450 นาโนเมตร
ลักษณะและมลทินภายใน	: มลทินลายนิ้วมือ, มลทินรูปเข็ม, มลทิน 2-3 สถานะ, มลทิน

ทอกลวง, มลทินผลึกแร่ และมลทินผลึกแร่กลวง

ทับทิมจากแหล่งแอนติลามินา

ค่าความถ่วงจำเพาะ	: ระหว่าง 3.930 ถึง 4.103
ค่าดัชนีหักเห	: $n_c = 1.759 - 1.765$ $n_o = 1.768 - 1.774$
ค่าไบรีฟริงเจนซ์	: 0.009
การเรืองแสง	: เรืองแสงสีแดงอ่อน ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น

เรืองแสงสีแดงปานกลาง-เข้มภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่น

ยาว

ลำดับสี : สีแดง ถึง แดงอมม่วงและแดงอมส้ม
สเปกตรัม : ทับทิมส่วนใหญ่แสดงแถบการดูดกลืนแสงเนื่องจากธาตุ

เหล็ก

(Fe³⁺) ที่ 472, 478 นาโนเมตร และโครเมียม (Cr³⁺) ที่
680, 530-590 และ 690-700 นาโนเมตร

ลักษณะและมลทินภายใน : มลทินลายนิ้วมือ, มลทินรูปเข็ม, มลทินผลึกแร่ทึบแสง
และมลทินผลึกแร่ใส

ทับทิมจากแหล่งวาโตแมนดรี

ค่าความถ่วงจำเพาะ : ระหว่าง 3.894 ถึง 4.096

ค่าดัชนีหักเห : $n_e = 1.761 - 1.763$

$n_o = 1.769 - 1.771$

ค่าไบรีฟริงเจนซ์ : 0.008

การเรืองแสง : เรืองแสงสีแดงอ่อน ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น
เรืองแสงสีแดงปานกลาง-เข้มภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่น

ยาว

ลำดับสี : สีแดง แดงอมส้ม ถึง แดงอมม่วง

สเปกตรัม : ทับทิมส่วนใหญ่แสดงแถบการดูดกลืนแสงเนื่องจากธาตุ
โครเมียม(Cr³⁺) ที่ 380-430, 520-590 และ 693 นาโนเมตร

ลักษณะและมลทินภายใน : มลทินรูปเข็ม, มลทินลายนิ้วมือ, มลทินผลึกแร่ทึบแสง,
มลทินผลึกแร่ใส และมลทินท่อกว้าง

แซปไฟร์จากแหล่งแอนดราโนแคมโบ

ค่าความถ่วงจำเพาะ : ระหว่าง 3.825 ถึง 4.070

ค่าดัชนีหักเห : $n_e = 1.760 - 1.763$

$n_o = 1.768 - 1.771$

ค่าไบรีฟริงเจนซ์ : 0.008-0.009

การเรืองแสง : ไม่เรืองแสงภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต

ลำดับสี : สีน้ำเงิน ถึง ม่วงอมน้ำเงิน
 สเปกตรัม : แชนป์ไฟร์ส่วนใหญ่ แสดงแถบการดูดกลืนแสงที่ 400-460, 560-590, 680, และ 690-700 นาโนเมตร
 ลักษณะและมลทินภายใน : แสดงแถบโซนสี (colour zoning) เค้นชัด มลทินอื่นๆที่พบ ได้แก่ มลทินลายนิ้วมือ, มลทินท่อกวาง, มลทินผลึกแร่ ทึบแสง และมลทินผลึกแร่ใส

แซปไฟร์จากแหล่งอิลากากา

ค่าความถ่วงจำเพาะ : ระหว่าง 3.811 ถึง 4.037
 ค่าดัชนีหักเห : $n_c = 1.759 - 1.764$
 $n_o = 1.767 - 1.772$
 ค่าไบรีฟริงเจนซ์ : 0.008-0.009

การเรืองแสง :

แซปไฟร์สีน้ำเงิน → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : ไม่เรืองแสงหรืออาจเรืองแสงสีชมพูถึงแดงแซปไฟร์สีเขียว → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : เรืองแสงสีแดงเข้ม

แซปไฟร์สีส้ม → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : เรืองแสงสีแดงเข้ม

แซปไฟร์สีแดงอมม่วง → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : เรืองแสงสีแดงเข้ม

แซปไฟร์สีม่วง → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : เรืองแสงสีแดง-แดงอมม่วงอ่อน หรือ เรืองแสงสีแดงปานกลาง-เข้ม

แซปไฟร์สีเหลือง → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง หรือเรืองแสงสีเหลืองด้าน (chalky yellow)
 คลื่นยาว : เรืองแสงสีแดงปานกลาง

แซปไฟร์หม่นทอง → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง
 คลื่นยาว : ไม่เรืองแสง หรือเรืองแสงสีส้มหรือแดงอ่อนถึงปานกลาง

แซปไฟร์ห่มเข้ม และแซปไฟร์ห่มอ่อน

→ คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง

คลื่นยาว : ไม่เรืองแสงหรือเรืองแสงสีส้มเข้ม

แซปไฟร์ห่มปานหิน → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง

คลื่นยาว : ไม่เรืองแสง

แซปไฟร์ใสไม่มีสี → คลื่นสั้น : ไม่เรืองแสง

คลื่นยาว : ไม่เรืองแสง หรือเรืองแสงสีแดง/ส้ม

อ่อนถึงเข้ม

ลำดับสี : สีนํ้าเงิน, ม่วง, เขียว, ส้ม , แดงอมม่วง และเหลือง

ลักษณะและมลทินภายใน : มลทินลายนิ้วมือ, มลทินรูปเข็ม, มลทินผลึกแร่ทึบแสง และ
มลทินผลึกแร่ใส , มลทิน 3 สถานะ

จากการตรวจสอบสมบัติทางอัญมณีวิทยาดังกล่าว ทำให้สามารถตรวจแยกตัวอย่างพลอยชนิดอื่นที่
ปะปนมากับแซปไฟร์จากแหล่งอิลากากา (แยกจากคำดัชนีหักเหและค่าความถ่วงจำเพาะ) จำนวน 11 เม็ด
ได้แก่ Chrysoberyl สีเหลือง จำนวน 1 เม็ด น้ำหนักรวม 0.945 กรัม และ
Spinel สีม่วง จำนวน 10 เม็ด น้ำหนักรวม 6.430 กรัม

หมายเหตุ พลอยชนิดต่างๆ เหล่านี้ หากไม่ตรวจแยกออกก่อนทำการเพิ่มคุณภาพด้วยความร้อน อาจ
ทำให้เกิดความเสียหายต่อพลอยคอร์ันดัมที่เผาพร้อมกันได้ เช่น อาจเกิดการหลอมรวมกันเป็นก้อน/กระจุก ทำ
ให้เสียหายด้วยกันทั้งปึกได้ เพราะจุดหลอมและการตอบสนองต่อความร้อนของพลอย
แตกต่างกัน

(2) การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์โดยเครื่องมือขั้นสูง

ก. ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer

เพื่อให้การวัด absorption spectrum ของตัวอย่างพลอยได้ผลดี ต้องจัดตัวอย่างให้มีหน้าเรียบในทิศทางขนานกับแกนแสง (c-axis) สองด้านขนานกัน โดยตรวจหาทิศทางของแกนแสงของตัวอย่างพลอยด้วยเครื่องโพลาไรสโคป (รูปที่ 30) ทำเครื่องหมายไว้ แล้วส่งไปจ้างช่างเจียรไนพลอย จัดให้มีหน้าเรียบในทิศทางดังกล่าว สำหรับการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 30 เครื่องโพลาไรสโคป (polariscope) ใช้ตรวจหาทิศทางของแกนแสงของพลอย

เครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer ที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นเครื่อง HITACHI รุ่น U4100 (รูปที่ 31) ของสาขาวิชาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 31 เครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer ของ HITACHI รุ่น U-4100

หลักการทำงานของเครื่องมือ

เครื่องมือนี้ เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาการดูดกลืนคลื่นแสงของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ ในช่วงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet) ถึงอินฟราเรดช่วงใกล้ (near infrared) ที่ความยาวคลื่น 175 ถึง 2600 นาโนเมตร โดยมี monochromator 2 ตัว ตัวแรกเป็นปริซึมรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าที่ทำจาก anhydrous fused quartz ทำหน้าที่เป็นตัวรับและกระจายแสง monochromator อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่แยกคลื่นแสงออกเป็นคลื่นเดี่ยว 2 ช่วงคลื่นที่ต่อเนื่องกัน คือ ช่วงคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตและช่วงคลื่นแสงอินฟราเรดช่วงใกล้

สำหรับแหล่งกำเนิดแสง ใช้หลอดฮาโลเจน (halogen lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วง visible-near infrared และใช้หลอดดีวเทอเรียม (deuterium lamp) เป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วง ultraviolet โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนคลื่นแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า สำหรับเครื่องอ่านหรือแปลสัญญาณ (detector) ใช้ photomultiplier tube วัดความเข้มแสงช่วง ultraviolet ถึง visible และใช้ cooled PbS สำหรับวัดความเข้มแสงช่วง near infrared ซึ่งสามารถบันทึกสเปกตรัมต่อเนื่องกันโดยอัตโนมัติ และอ่านสัญญาณออกมาในรูปของกราฟการดูดกลืนแสง (Absorbance : A) โดยการดูดกลืนแสงของวัตถุใดๆ จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงตกกระทบ (incident light) และแสงที่ส่องผ่าน (transmitted light) วัตถุนั้น

UV-Vis-NIR spectrophotometer เป็นเครื่องมือแบบลำแสงคู่ (double beam instrument) โดยที่ลำแสงหนึ่งจะเป็นแนวอ้างอิง (reference path) อีกลำแสงหนึ่งผ่านตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ (sample path) จากนั้นจะเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงทั้งสองโดยวัดพร้อมกันผ่านไปยังชุดประมวลผลข้อมูล ข้อดีของการมีลำแสงคู่ คือ ขจัดปัญหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเข้มจากแหล่งแสง และการตอบสนองของเครื่องวัดความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา เพราะมีการวัดอัตราความเข้มแสงจากแนวอ้างอิงกับตัวอย่างในช่วงเวลาใกล้เคียงกันมาก

เมื่อแสงที่อยู่ในช่วง UV-visible ผ่านเข้าไปในโมเลกุลของสาร สารนั้นจะดูดกลืนแสงเฉพาะบางช่วง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (electron transition) ซึ่งโดยมากจะใช้พลังงานประมาณ 30-150 kcal/mole เป็นอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดหรืออิเล็กตรอนที่เกิดพันธะแล้ว หรืออิเล็กตรอนที่ยังไม่เกิดพันธะ (non-bonding electrons) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีพลังงานแตกต่างกัน ระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงขึ้นนี้ เรียกว่า antibonding orbital

เทคนิคและวิธีการตรวจสอบด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer

ก่อนทำการตรวจวัด ต้องเปิดสวิตซ์ทิ้งไว้เพื่ออุ่นเครื่องเป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบกำหนดทำการ calibrate เครื่องที่ความยาวคลื่น 650-660 นาโนเมตร จากนั้นใส่เลนส์ที่เป็น polarizing filter เข้าไป

ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและอุปกรณ์จับยึดตัวอย่าง แล้ว run เครื่องเพื่อวัดความเข้มแสงเปรียบเทียบ (baseline) 2 ครั้ง ขณะที่ยังไม่ใส่ตัวอย่าง ในครั้งแรกปรับให้ polarizing filter อยู่ในตำแหน่งศูนย์องศา (0° polarizer) โดยกำหนดให้เป็น user 1 ครั้งต่อมาปรับให้ polarizing filter อยู่ในตำแหน่งที่ทำมุม 90° องศา กับตำแหน่งแรก (90° polarizer) โดยกำหนดให้เป็น user 2 การ run baseline ในแต่ละครั้งเพื่อใช้เป็นแนวทางอิงในการตรวจสอบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างในทิศทางของ o-ray และ e-ray

ในการวัดสเปกตรัมของตัวอย่างคอร์ันดัม นิยมวัดในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 250 ถึง 1,500 นาโนเมตร โดยกำหนดให้มีความละเอียด (resolution) คงที่ที่ 2 นาโนเมตร (หมายถึง มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 2 นาโนเมตร) อัตราเร็วการวัดความเข้มแสง (scan speed) กำหนดที่ 300 นาโนเมตรต่อนาที การปรับและกำหนดค่าต่างๆ ข้างต้น ควบคุมโดยผ่านเครื่องคอมพิวเตอร์

การตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างแต่ละเม็ด ทำการวิเคราะห์ 2 ครั้ง เพื่อหาสเปกตรัมของตัวอย่างในทิศทางของ o-ray และ e-ray โดยจัดให้แนวแกนแสง (c-axis) ของตัวอย่างมีทิศทางตั้งฉากกับ plane polarized light เมื่อต้องการวัดสเปกตรัมในทิศทางของ o-ray และจัดให้แกนแสงของตัวอย่างมีทิศทางขนานกับ plane polarized light เมื่อต้องการวัดสเปกตรัมในทิศทางของ e-ray

ข. ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี

ข.1 การวิเคราะห์ชุดแรก

การคัดเลือกและเตรียมตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างก่อนทำการทดลองเผา ทำให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุที่ทำให้เกิดสีใน tone และ saturation ต่างๆ ตลอดจนการกระจายตัวของธาตุ วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค EPMA ที่ Natural History Museum กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ อาศัยหลักดังนี้

1. เลือกให้ครอบคลุมทุกกลุ่มสี โดยให้มี tone และ saturation ต่างๆ กัน
2. ในแต่ละกลุ่ม ควรมีตัวอย่างที่ใสสะอาด ตัวอย่างที่มีมลทินภายในโพล์มาถึงผิว ตัวอย่างที่มีรอยแตก ตัวอย่างที่มีความขุ่นมัว และตัวอย่างที่มีแถบสีหรือหย่อมสี
3. ตัวอย่างทับทิมจากแหล่ง Andilamena และ Vatomandry ซึ่งมีสีสม่ำเสมอเท่ากันทั้งเม็ด และที่มีมลทินสีขาวขุ่นบริเวณกลางผลึก ได้คัดเลือกเม็ดที่แสดงรูปผลึกชัดเจนมาผ่าครึ่งตามแนวแกน c เพื่อให้บริเวณขาวขุ่นอยู่ทั้ง 2 ส่วนของซีกที่ผ่าในปริมาณเท่าๆ กัน โดยเก็บส่วนหนึ่งไว้ อีกส่วนหนึ่งนำไปวิเคราะห์แล้วทดลองเผา เพื่อไว้เปรียบเทียบสีก่อนและหลังเผา

4. ตัวอย่างที่มีสีขาวขุ่น (หม่า) จาก Ilakaka ได้คัดเลือกเม็ดตัวอย่างที่แสดงหม่าทอง หม่าเข้ม หม่าอ่อน และหม่าปนหิน โดยให้มีหม่ากระจายอยู่ทั่วทั้งเม็ด นำมาผ่าครึ่งให้ได้สมมาตรที่สุด เพื่อนำไปวิเคราะห์และเผาเพียงครั้งเดียว

จากหลักเกณฑ์ดังกล่าว สามารถคัดเลือกตัวอย่างและบรรจุลงในเบ้ากลมเพื่อนำไปวิเคราะห์ได้จำนวน 400 ตัวอย่างใน 46 เบ้า จำแนกตามแหล่งได้ดังนี้

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. แหล่ง Diego | จำนวน 67 ตัวอย่าง (รูปที่ 32) วิเคราะห์ได้จริง 35 ตัวอย่าง |
| 2. แหล่ง Andilamena | จำนวน 67 ตัวอย่าง (รูปที่ 33) วิเคราะห์ได้จริง 23 ตัวอย่าง |
| 3. แหล่ง Vatomandry | จำนวน 16 ตัวอย่าง (รูปที่ 34) วิเคราะห์ได้จริง 4 ตัวอย่าง |
| 4. แหล่ง Andranondambo | จำนวน 30 ตัวอย่าง (รูปที่ 34) วิเคราะห์ได้จริง 14 ตัวอย่าง |
| 5. แหล่ง Ilakaka แยกเป็น | |
| - ตัวอย่างที่มีหม่า | จำนวน 42 ตัวอย่าง (รูปที่ 35) วิเคราะห์ได้จริง 23 ตัวอย่าง |
| - ตัวอย่างที่ไม่มีหม่า | จำนวน 178 ตัวอย่าง (รูปที่ 36 และ 37) |
| | วิเคราะห์ได้จริง 90 ตัวอย่าง |

รวมตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้จริง 189 ตัวอย่าง

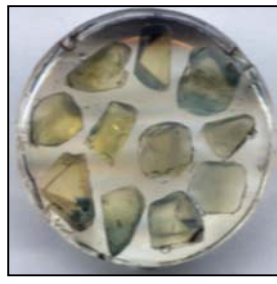
รูปที่ 38 เป็นเบ้าตัวอย่างที่รวมคอร์นคัมจากแหล่งต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ยกเว้นแหล่ง Vatomandry

การวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างคอร์นคัมจากมาดากัสการ์ก่อนเผา ดำเนินการระหว่างวันที่ 27 สิงหาคม 2545 ถึง 29 กันยายน 2545 โดยใช้เทคนิค SEM-EDX และ electronprobe microanalysis (EPMA) ณ Department of Mineralogy, Natural History Museum, London, UK

สำหรับเทคนิค SEM-EDX (scanning electron microscope with energy dispersive X-ray fluorescence) ใช้เครื่อง JEOL Model : JSM-5900LV (รูปที่ 39) โดยใช้ Oxford's INCA software for element mapping and spectrum acquisition through backscattered electron images เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการทำ element mapping และใช้ในการตรวจวิเคราะห์ผลหินได้ในกรณีที่โพลีขึ้นถึงพื้นผิวของตัวอย่างพลอย



Dig(v) 1



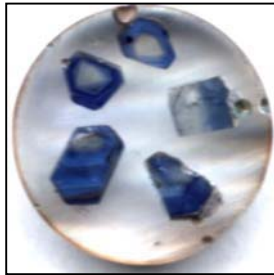
Dig(v) 2



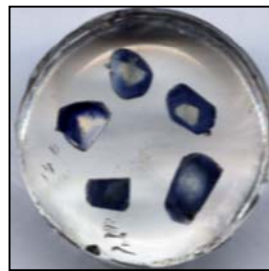
Dig(b) 1



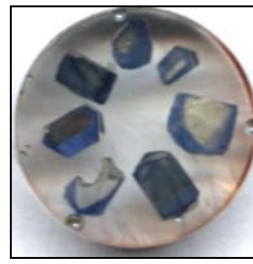
Dig(b) 2



Dig(cc) 1



Dig(cc) 2

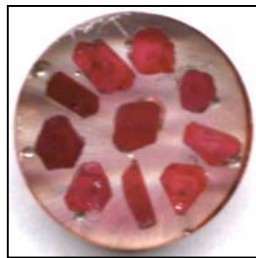


Dig(vc) 1

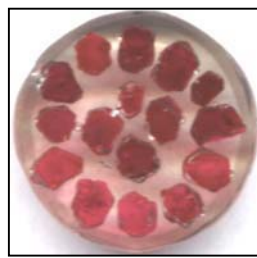


Dig(vc) 2

รูปที่ 32 เป้าที่บรรจุตัวอย่างคอร์ันดัมแหล่ง Diego



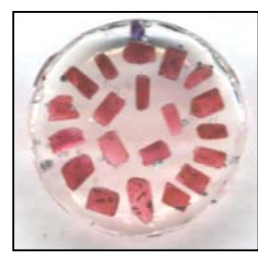
Anm 1



Anm 2

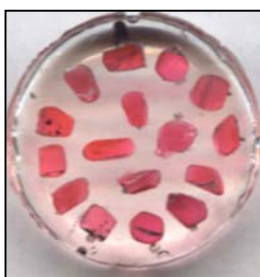


Anm 3

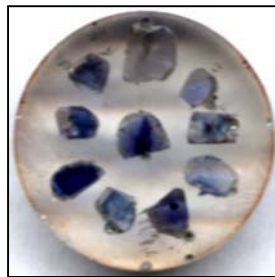


Anm 4

รูปที่ 33 เป้าที่บรรจุตัวอย่างคอร์ันดัมแหล่ง Andilamena



Vam



Anb 1



Anb 2



Anb 3

รูปที่ 34 เป้าที่บรรจุตัวอย่างคอร์ันดัมแหล่ง Vatomandry (ทับทิมรูปช้ายมือ)

และเป้าที่บรรจุตัวอย่างคอร์ันดัมแหล่ง Andranondambo



Ilk 1-1



Ilk 1-2



Ilk 1-3

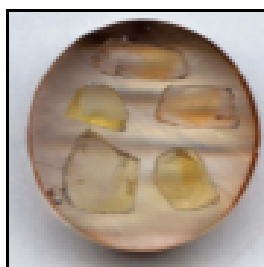


Ilk (m) 1



Ilk (m) 2

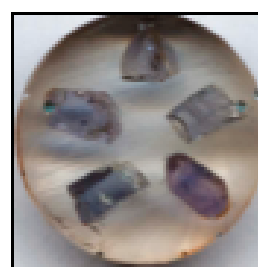
รูปที่ 35 เบ้าที่บรรจุตัวอย่างคอรีนดัมแหล่ง Ilakaka กลุ่มที่มีหมว่



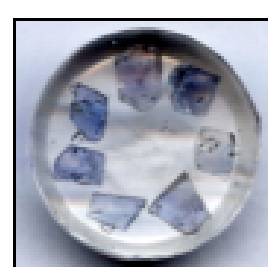
Ilk (y) 1



Ilk (y) 2



Ilk (b) 1



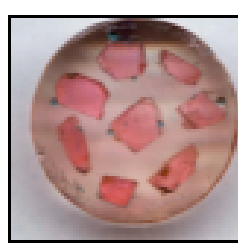
Ilk (b) 2



Ilk (g) 1



Ilk (g) 2



Ilk (p)



Ilk (v)



Ilk (c)

รูปที่ 36 เบ้าที่บรรจุตัวอย่างคอรีนดัมแหล่ง Ilakaka กลุ่มที่มีสีชัดเจน



IIk 2-1 (1)



IIk 2-1 (2)



IIk 2-2 (1)



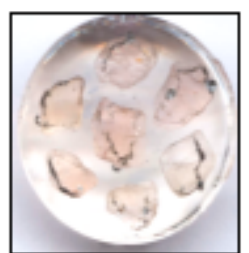
IIk 2-2 (2)



IIk 2-2 (3)



IIk 2-3 (1)



IIk 2-3 (2)



IIk 2-4 (1)



IIk 2-4 (2)



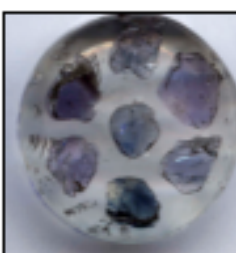
IIk 2-5 (1)



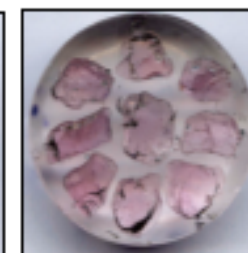
IIk 2-5 (2)



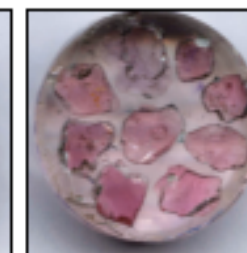
IIk 2-6 (1)



IIk 2-6 (2)



IIk 2-7 (1)



IIk 2-7 (2)

รูปที่ 37 เนื้อที่บรรจุตัวอย่างคอรีนติม์แหล่ง Iiakaka กลุ่มที่มีสีอ่อนใส



mixed

รูปที่ 38 เนื้อที่บรรจุตัวอย่างคอรีนติม์แบบ รวมแหล่ง

ส่วนเทคนิค electronprobe microanalysis ใช้เครื่อง CAMECA SX50 microprobe (รูปที่ 40) with wavelength dispersive X-ray fluorescence, operated via a SUN Work Station using the UNIX operating system โดยใช้ synthetic corundum เป็น standard สำหรับการวิเคราะห์แบบ quantitative

ตัวอย่างที่เตรียมไว้ รวม 400 ตัวอย่าง จากแหล่งคอร์ันดัมทั้ง 5 แหล่งของมาดากัสการ์ ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ สามารถทำการวิเคราะห์ได้จริงเพียง 189 ตัวอย่าง เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลา และการจองใช้เครื่องมือ ในการเลือกตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ก่อน เลือกโดยพยายามให้ครอบคลุมกลุ่มสีทุกสีของแต่ละแหล่ง ทั้งที่แสดงหม่นชนิดต่างๆ และเหลือบ รวมทั้งที่ใสไม่มีหม่น และที่แสดง colour zoning แต่ละเบ้าตัวอย่างต้องนำไปตรวจสอบก่อนว่าจะบรรจุลงใน sample holder ได้พอดีหรือไม่ พบว่าส่วนใหญ่ของเบ้าตัวอย่างที่เตรียมไป ต้องนำไปขัดเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้าลงเล็กน้อย ก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทั้งสองดังกล่าว ต้องนำเบ้าตัวอย่างไปเคลือบด้วยผงถ่าน (รูปที่ 41) เพื่อป้องกันการกระจุกตัวของอิเล็กตรอนบนผิวตัวอย่าง ระหว่างการวิเคราะห์

ธาตุที่วิเคราะห์หา

ในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี ไม่ว่าจะเป็นการทำ element mapping ด้วยเทคนิค SEM, การทำ line scanning และ point analysis ด้วยเทคนิค EPMA ธาตุที่วิเคราะห์หาเสมอ ได้แก่ Al, Cr, Fe, Ga, Ti และ V เฉพาะการทำ element mapping อาจวิเคราะห์หาธาตุอื่นด้วย เช่น Mg, Mn, Ni แต่ไม่เสมอไป สำหรับ EPMA ธาตุอีก 2 ตัว ที่วิเคราะห์ด้วยเสมอ คือ Si และ Mg

ข.2 การวิเคราะห์ชุดที่สอง

การคัดเลือกและเตรียมตัวอย่าง

วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างพลอยครั้งนี้ เพื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบ (โดยเฉพาะปริมาณธาตุร่องรอย) ก่อนและหลังการทดลองเผา ว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ ตัวอย่างที่คัดเลือกส่วนใหญ่เป็นตัวอย่างที่เคยวิเคราะห์ และผ่านการทดลองเผา มา โดยเลือกตัวอย่างครอบคลุมจากทั้ง 5 แหล่ง มีตัวอย่างส่วนหนึ่งที่ยังไม่เคยวิเคราะห์มาก่อน (เป็นตัวอย่างที่ตัดแบ่งครึ่งออก นำส่วนหนึ่งไปทดลองเผา) ครึ่งนี้นำทั้งสองส่วนไปทำการวิเคราะห์ด้วยกัน นอกจากวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีแล้ว ยังต้องการวิเคราะห์แร่ลทินที่ปรากฏในเนื้อพลอย เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของมลทินหลังการทดลองเผา การเตรียมตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EPMA (Electron probe microanalysis) และวิเคราะห์มลทินด้วยเทคนิค SEM-EDX (Scanning electron microscope with energy dispersive x-ray fluorescence) ณ Department of Mineralogy, the

Natural History Museum กรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ ใช้วิธีเดียวกันกับที่กล่าวไว้



รูปที่ 39 เครื่อง scanning electron microscope with energy dispersive X-ray fluorescence
(JEOL Model : JSM-5900LV)



รูปที่ 40 เครื่อง CAMECA SX50 microprobe



รูปที่ 41 เครื่องเคลือบตัวอย่างด้วยผงถ่าน (carbon sputter)

ข้างต้น โดยสรุป มีตัวอย่างที่นำไปวิเคราะห์รวมทั้งสิ้น 212 ตัวอย่าง การวิเคราะห์ดำเนินการระหว่างวันที่ 23 พฤษภาคม ถึง 30 มิถุนายน 2546

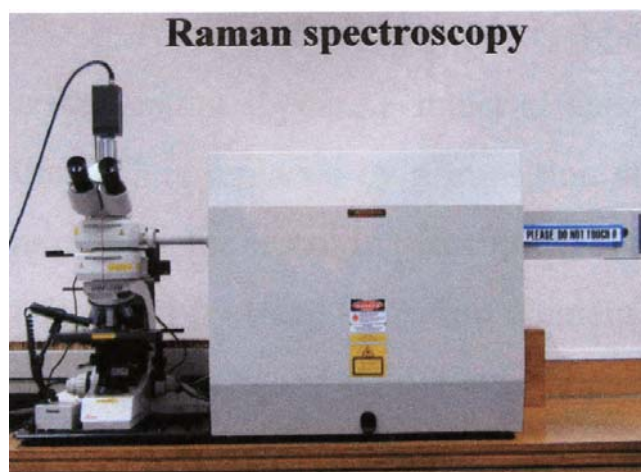
ธาตุที่วิเคราะห์หา

เป็นธาตุกลุ่มเดียวกับที่เคยวิเคราะห์มาก่อน ได้แก่ Al, Mg, Si, Cr, Fe, Ga, Ti และ V

ค. ตัวอย่างสำหรับตรวจวิเคราะห์มลทินภายในเนื้อพลอย

ตัวอย่างที่จะตรวจวิเคราะห์มลทินภายในเนื้อพลอย สามารถตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ เพื่อเลือกตรวจมลทินที่อยู่ใกล้พื้นผิว หรือโพล์ให้เห็นบนพื้นผิว หรือนำไปขัดหน้าเรียบจนถึงมลทินเหล่านั้น ก่อนนำไปหล่อลงในเบ้า แล้วขัดมัน หรือใช้ผิวหน้าตัวอย่างที่เตรียมไว้สำหรับการวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมี โดยเลือกตรวจดูผิวหน้าตัวอย่างที่มีมลทินปรากฏให้เห็นก็ได้

การตรวจวิเคราะห์มลทินภายในเนื้อพลอย ใช้เครื่องรามานสเปกโตรสโคป (Raman Spectroscope) (รูปที่ 42) ของฝ่ายวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ กองวิเคราะห์ กรมทรัพยากรธรณี (Renishaw model : System RM 1000) ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (Renishaw model : System RM 1000) และของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร (Renishaw model : System RM 2000)



รูปที่ 42 เครื่อง Renishaw Laser Raman Microspectrometer System 1000

หลักการของเทคนิค Raman Spectroscopy

ใช้ Argon laser source ฉายไปกระทบมลทินตัวอย่าง และตรวจวัดการกระเจิงของแสงเลเซอร์จากมลทินนั้น โดยทั่วไป จะมีแสงที่กระเจิงออกมาในปริมาณที่มาก และมีความถี่ของคลื่นเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่ตกกระทบ เรียกว่า การกระเจิงไรเลย์ (Rayleigh) หรือการกระเจิงแบบยืดหยุ่น (elastic scattering) แต่ในขณะเดียวกัน จะมีแสงที่กระเจิงออกมาเพียงเล็กน้อย ด้วยความถี่ของคลื่นที่แตกต่างไปจากคลื่นแสงเดิมที่ตกกระทบ เนื่องจากการสูญเสียพลังงานของ Photon ของแสงที่ตกกระทบโมเลกุลตัวอย่าง คลื่นแสงที่ส่งผ่านออกมาเรียกว่า การกระเจิงรามาน หรือการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering) ซึ่งมีทั้งเส้นสโตค (stokes lines) และแอนติสโตค (anti-stokes lines) โดยเครื่องรามานสเปกโตรสโคปจะวัดค่าความแตกต่างความถี่ของเส้นสโตค ออกมาเป็นหน่วยเรียกว่า ค่าเลขรามาน (Raman shift) ซึ่งเป็นค่าจำนวนความแตกต่างระหว่างความถี่ของแสงที่กระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นจากตัวอย่างกับความถี่ของแสงเลเซอร์ที่ใช้ยิงกระทบตัวอย่าง ค่าเลขรามานที่มีค่า wave number ต่างๆ เป็นค่าเฉพาะตัวแตกต่างกันในธาตุแต่ละชนิด จึงสามารถใช้บ่งบอกชนิดของแร่มลทินที่ต้องการวิเคราะห์ได้

2.4 ผลการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างพลอยโดยเครื่องมือขั้นสูง ก่อนทดสอบเผา

(1) การตรวจวัด absorption spectrum โดยเทคนิค UV-Vis-NIR

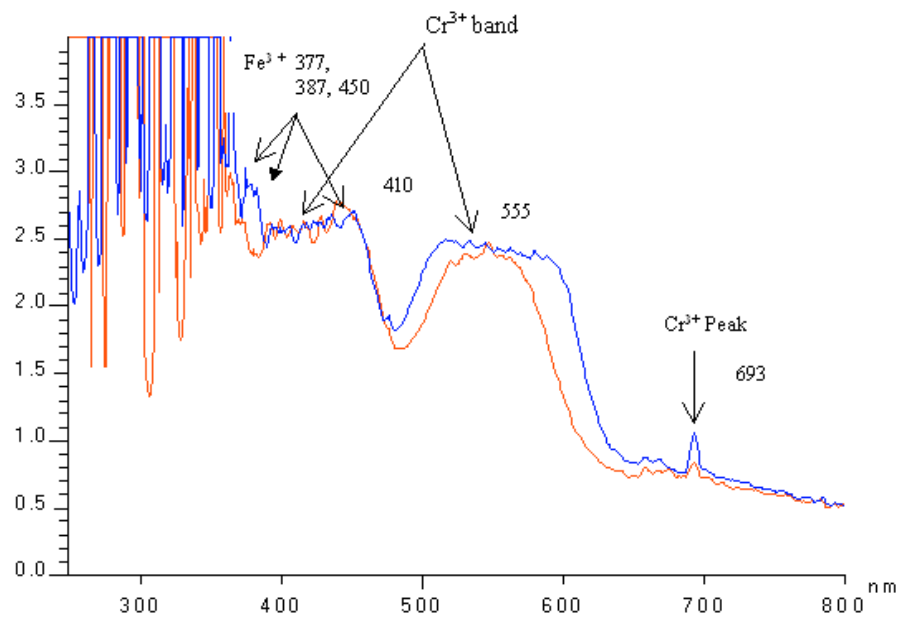
ก. Absorption spectrum ของทับทิม

ก.1 จากแหล่ง Andilamena

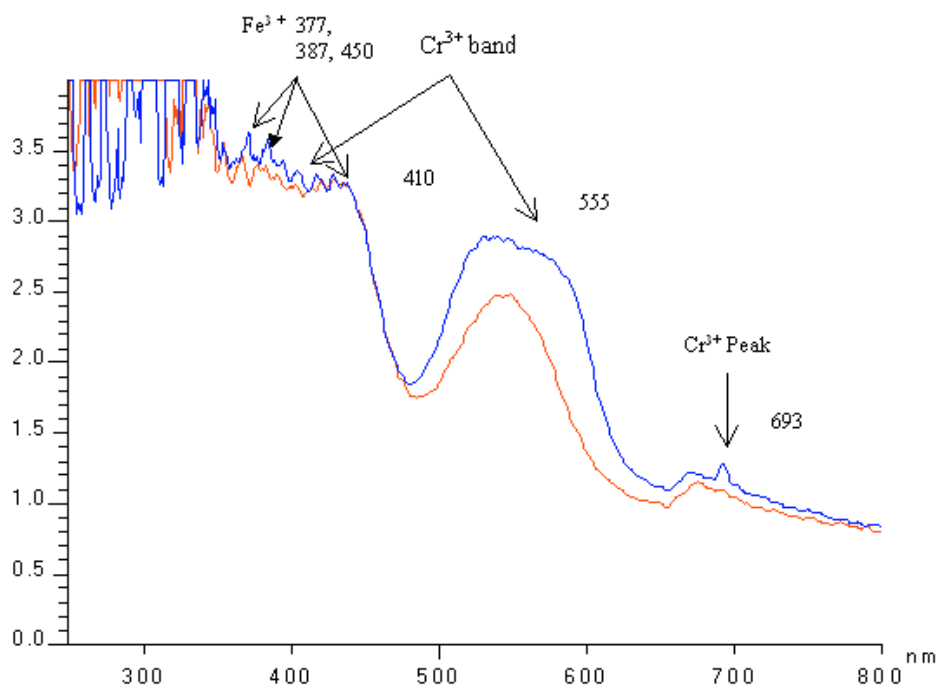
ตัวอย่างทับทิมทุกกลุ่มสี กล่าวคือ

Anm 1-x	หมายถึง สีแดง
Anm 2-x	หมายถึง สีแดง-ม่วง / ม่วง-แดง
Anm 3-x	หมายถึง สีแดงอมม่วงเข้ม
Anm 4-x	หมายถึง สีแดงอมม่วงอ่อน
Anm 5-x	หมายถึง สองสีในเม็ดเดียวกัน (สีแดง + แดงสีม่วงแดง)
Anm 6-x	หมายถึง สีแดงอมส้ม

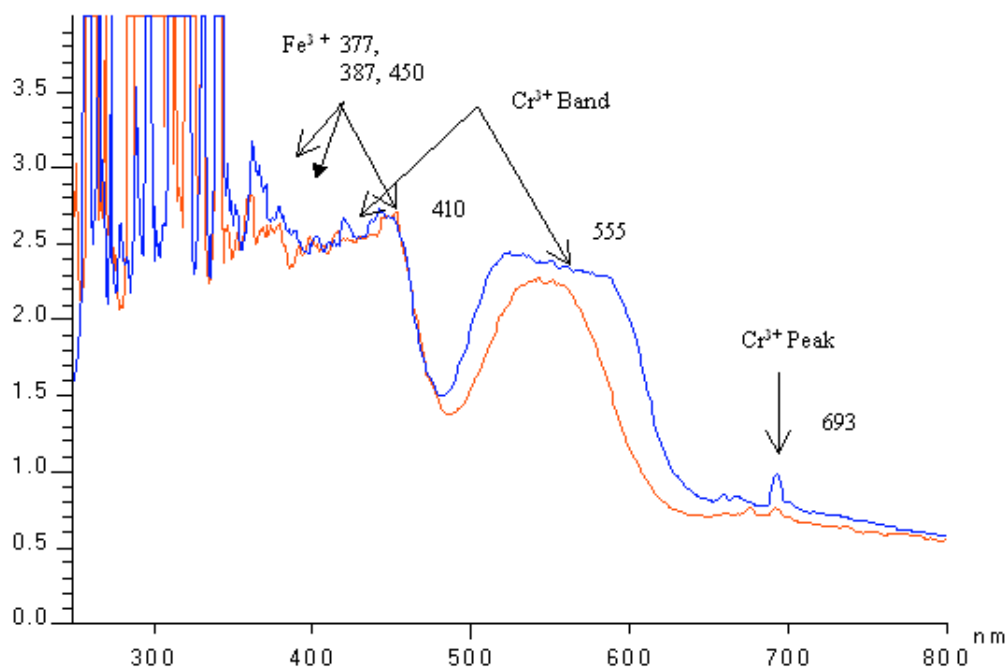
แสดง absorption band เด่นของ Cr^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 400 – 410 และ 555 nm ซึ่งเป็น spin-allowed crystal field transitions และ weak peak ที่ประมาณ 444, 662 และ 693 nm ซึ่งเป็น spin-forbidden transitions นอกจากนี้ยังแสดง peaks ของ Fe^{3+} spin-forbidden transitions ที่ประมาณ 377, 387 และ 450 nm (รูปที่ 43 ถึง 48)



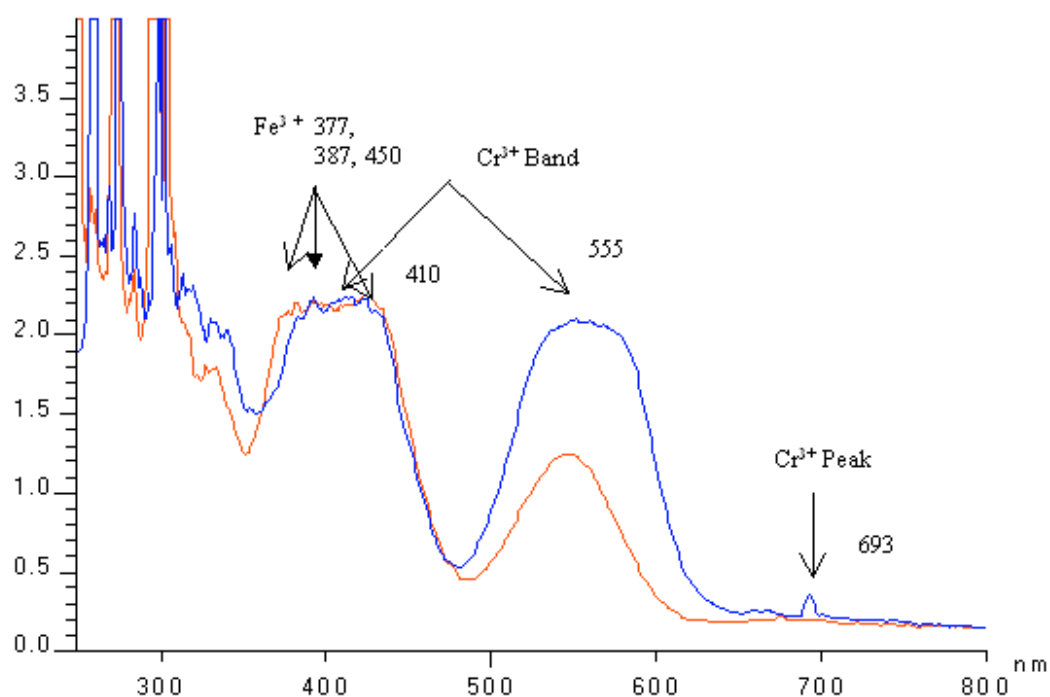
รูปที่ 43 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm1-3-005 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



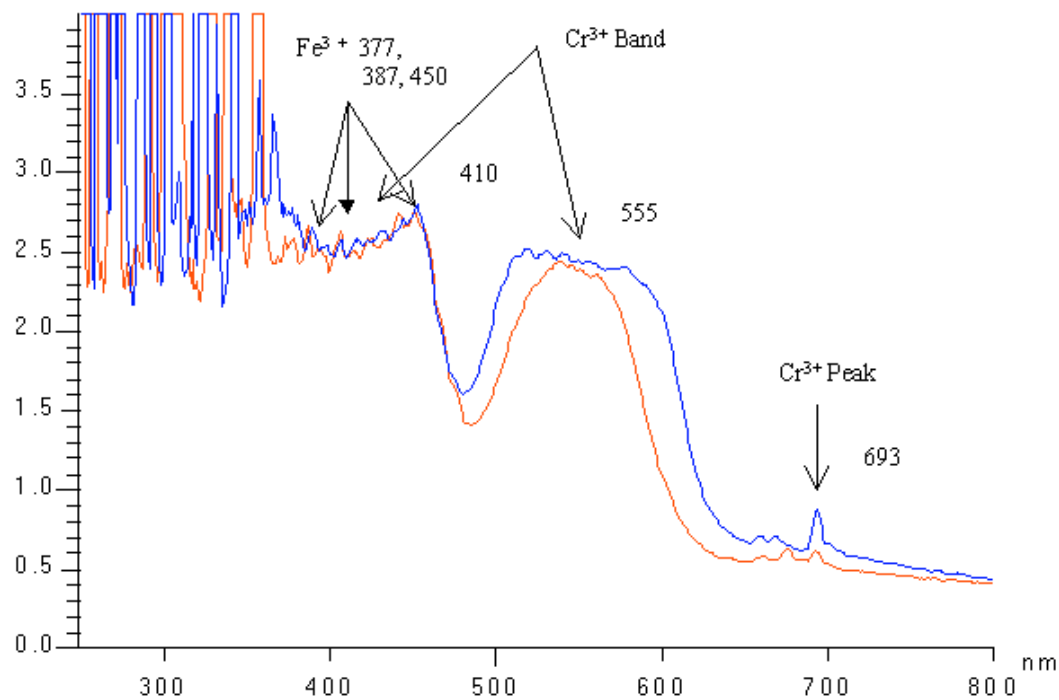
รูปที่ 44 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm2-2-010 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



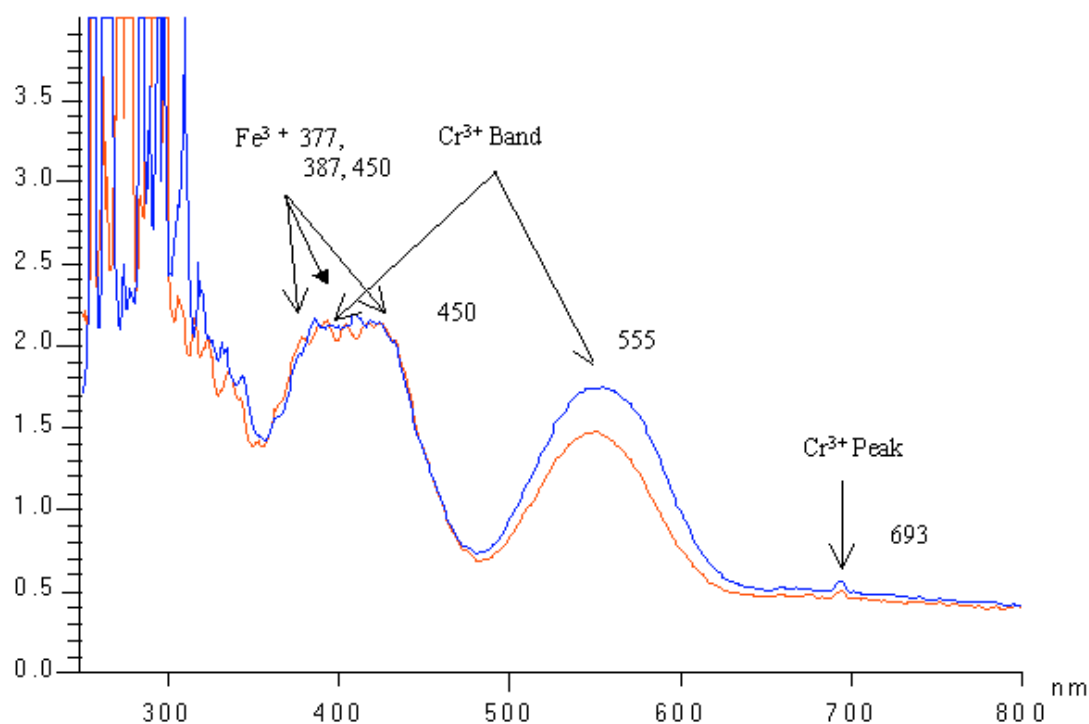
รูปที่ 45 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm3-2-005 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



รูปที่ 46 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm4-1-001 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



รูปที่ 47 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm5-3-001 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



รูปที่ 48 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Andilamena รหัสตัวอย่าง Anm6-5-003 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)

ก.2 จากแหล่ง Vatomandry

ตัวอย่างทับทิมทุกกลุ่มสี กล่าวคือ

Vam 1-x	หมายถึง สีแดงอมส้ม
Vam 2-x	หมายถึง สีแดงอมม่วงอ่อน
Vam 3-x	หมายถึง สีแดง-ม่วง / ม่วง-แดง
Vam 4-x	หมายถึง สีแดงอมม่วงเข้ม

แสดง absorption band ของ Cr^{3+} spin-allowed transitions ที่ประมาณ 410 และ 555 nm และ spin-forbidden peaks ของ Cr^{3+} ที่ 693 nm (รูปที่ 49 ถึง 51) เฉพาะกลุ่มสีแดงอมส้ม แสดง spin-forbidden peaks ของ Fe^{3+} ด้วย ที่ตำแหน่งประมาณ 377, 387 และ 450 nm (รูปที่ 52)

ข. Absorption spectrum ของแซปไฟร์สีน้ำเงิน

ข.1 จากแหล่ง Diego Suarez

ตัวอย่างกลุ่มที่มีสีหลักเป็นสีน้ำเงิน ทั้งกลุ่มสีแดงทั้งเม็ด กล่าวคือ

Dig (b) 001-012 หมายถึง สีม่วงอมน้ำเงิน (bV)

Dig (b) 013 หมายถึง สีน้ำเงินอมเขียว (gB)

Dig (b) 014-016 หมายถึง สีน้ำเงิน (B)

และกลุ่มที่บริเวณแกนกลาง และขอบของผลึกมีสีต่างกัน กล่าวคือ

Dig (cc) หมายถึง แกนกลางไม่มีสี

Dig (bc) หมายถึง แกนกลางสีม่วงอมน้ำเงิน

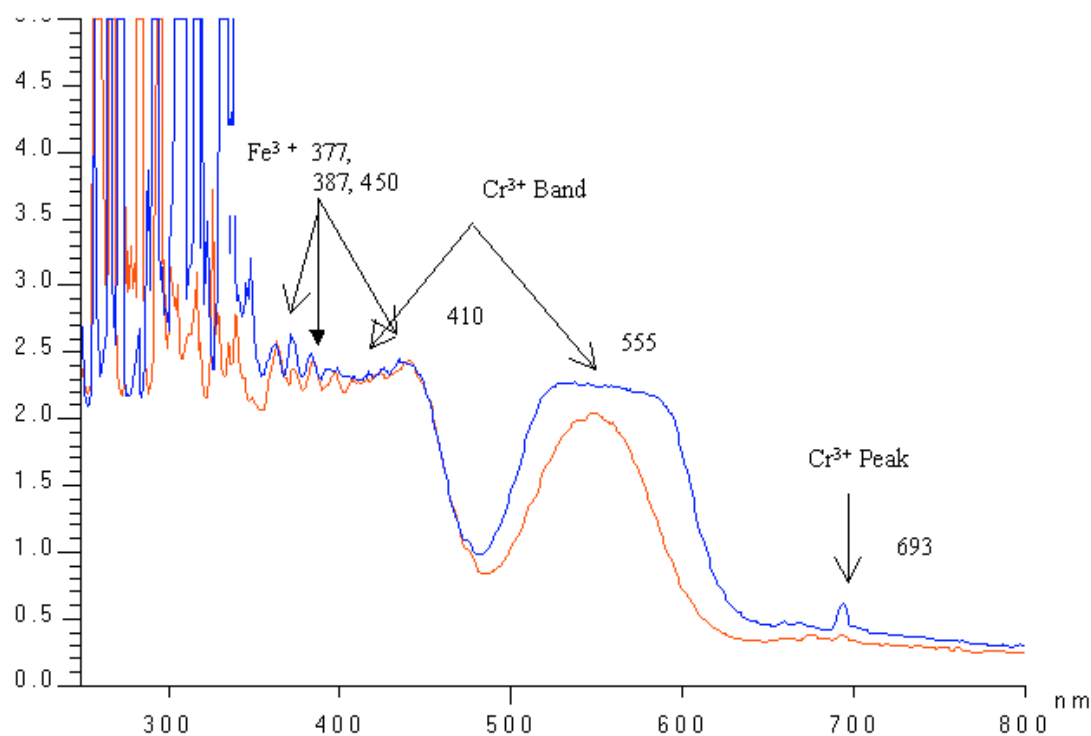
Dig (yc) หมายถึง แกนกลางสีเหลือง

แสดง spin-forbidden transitions ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 377, 387 และ 450 nm และ IVCT bands ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ประมาณ 560 nm และของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ประมาณ 850-880 nm (รูปที่ 53 ถึง 58)

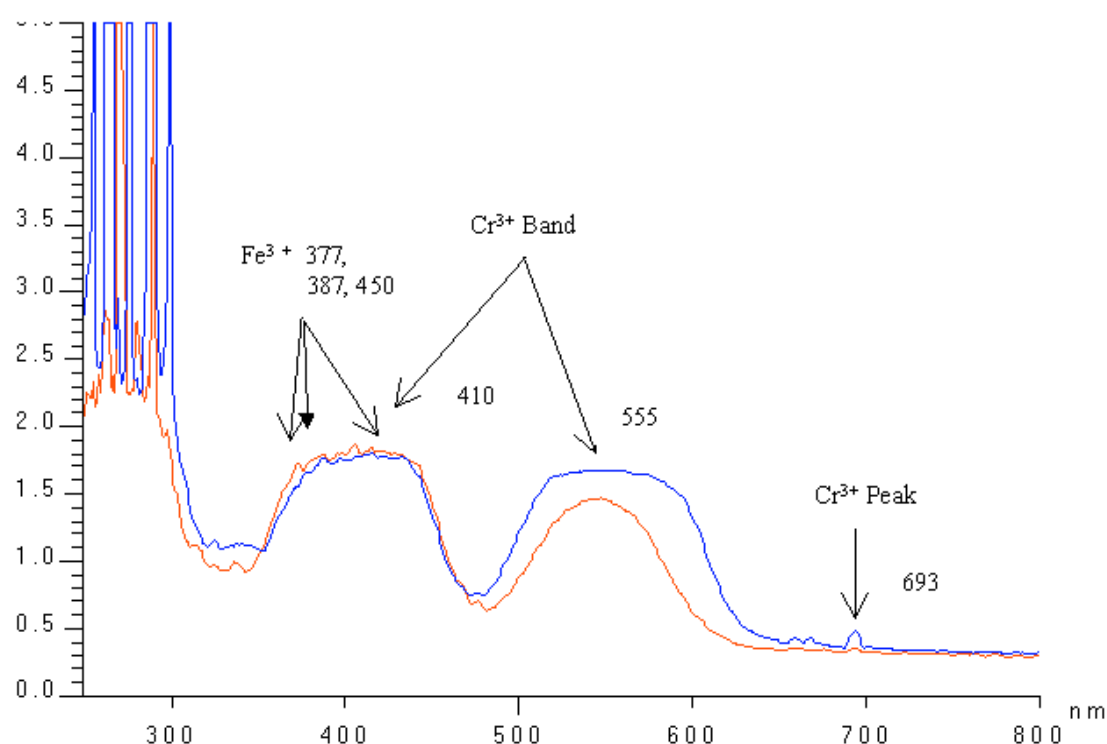
ส่วนตัวอย่างที่มีสีหลักเป็นสีเหลือง : Dig (y) แสดงเฉพาะ peaks ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 377, 387 และ 450 nm (รูปที่ 59)

ข.2 จากแหล่ง Andranondambo

ตัวอย่างจากทุกกลุ่มสี ทั้งสีน้ำเงิน, สีน้ำเงินอมม่วง และสีม่วงอมน้ำเงิน แสดง peaks ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 377, 387 และ 450 nm และ IVCT band ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ประมาณ 550-580 nm (รูปที่ 60)



รูปที่ 49 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Vatomandry รหัสตัวอย่าง Vam1-001 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)



รูปที่ 50 Absorption spectrum ของทับทิมแหล่ง Vatomandry รหัสตัวอย่าง Vam2-001 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงระหว่างทิศทางขนานแกนแสง (e-ray : —) และตั้งฉากแกนแสง (o-ray : —)