การเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ด้วยการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

Color Change of Green Tourmaline from Madagascar by Heat Treatment

พิมพ์ทอง ทองนพคุณ* และ จิราเจต บำรุงพล

Pimthong Thongnopkun* and Jirajet Bamrungpol

หน่วยวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

Gems and Jewelry Research Unit, Faculty of Gems, Burapha University Chanthaburi Campus

Received : 12 June 2017

Accepted : 12 July 2017

Published online : 1 August 2017

บทคัดย่อ

ทัวร์มาลีนเป็นหนึ่งในอัญมณีมีค่าที่เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นอัญมณีที่มีสีหลากหลาย งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนสีและลักษณะเฉพาะของสเปกตรัมทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ที่ผ่านการเผาในสภาวะบรรยากาศที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค EDXRF ยูวีวิสซิเบิลสเปกโทรสโกปี และดีฟฟิวรีแฟลกแทนซ์อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วิเคราะห์การเปลี่ยนสีด้วยระบบสี CIE L*a*b* ด้วยเครื่องยูวีวิสซิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ ผลการวิจัยพบว่าทัวมาลีนสีเขียวเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลืองหลังจากผ่านการเผาที่ 400-600 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม ความสว่างของตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 400-500 องศาเซลเซียส มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ค่าความสว่างจะลดลง เมื่ออุณหภูมิในการเผา 600 องศาเซลเซียส ยูวีวิสซิเบิลสเปกตรัมแสดงแถบการดูดกลืนแสงของ Mn^{2+} และ Fe^{2+} ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดสีเหลืองและเขียวในทัวร์มาลีน ดิฟฟิวรีแฟลกแทนซ์อินฟราเรดสเปกตรัมของทัวร์มาลีนสีเขียวแสดงการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3450, 1350, 1100 and 1085 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับ OH, BO_3, Si_6O_{18} และ SiO ตามลำดับ หลังจากการปรับปรุงด้วยความร้อน ความกว้างในช่วง 400-2000 cm^{-1} ลดลงและค่าการดูดกลืนของ OH ของโมเลกุลน้ำลดลง ผลการวิจัยอาจเป็นประโยชน์สำหรับการปรับปรุงสีและความใสของทัวร์มาลีน

คำสำคัญ: ทัวร์มาลีน ทัวมาลีนสีเขียว มาดากัสการ์ การเปลี่ยนสี การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

***Corresponding author E-mail** : pimthong@go.buu.ac.th

Abstract

Tourmaline is one of the most popular of semi-precious gemstones, because of its multicolour nature. In this research, color change and spectroscopic characteristics of green tourmaline from Madagascar, when subjected to heating in air atmosphere with heating temperature at 400-600°C, has been studied by EDXRF, UV-visible spectroscopy and diffuse reflectance infrared spectroscopy. CIE L*a*b* color measurement was employed to study the color change of green tourmaline via UV-visible spectrometer. The results revealed that the green tourmaline changed to yellowish green color after heating at 400-600°C. However, the lightness of heated sample was increased with heating at 400-500°C while that was decreased when the heating temperature was 600°C. The UV-visible spectra showed characteristic absorption bands due to Mn^{2+} and Fe^{2+}. The band related to yellow and green color in the unheated and heated tourmalines. The diffuse reflectance infrared spectrum of green tourmaline revealed absorption bands of OH, BO_3, Si_6O_{18}, and SiO at 3450, 1350, 1100 and 1085 cm^{-1}, respectively. After heat treatment, their bandwidths in the range 400-2000 cm^{-1} and the O-H bond absorption band of water molecules also decreased. The results may be utilized to improve the color or clarity in the tourmaline.

Keywords : tourmaline, green tourmaline, Madagascar, color change, heat treatment

บทนำ

ทัวร์มาลีน (Tourmaline) เป็นอัญมณีเนื้ออ่อนที่มีความสวยงามหลากหลายสี และเป็นอัญมณีที่ได้รับความนิยมและมีราคาสูง ทัวร์มาลีนเป็นแร่ในกลุ่มซิลิเกต มีองค์ประกอบหลัก คือ $X_1Y_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$ (โดย X อาจเป็น K^+, Na^+ และ/หรือ Ca^{2+} และ Y อาจเป็น Mg^{2+}, Li^+, Al^{3+} และ/หรือ Fe^{2+} ซึ่งจะส่งผลต่อการจำแนกชนิดของทัวร์มาลีน เช่น Schorl Dravite Uvite Liddicoatite หรือ Buergerite (Zolotarev *et al*., 2007) ด้วยความหลากหลายสีของทัวร์มาลีนทำให้ทัวร์มาลีนเป็นอัญมณีที่นิยมสำหรับนำมาทำเครื่องประดับ ตัวอย่างสีของทัวร์มาลีน ได้แก่ สีชมพู สีแดง สีน้ำเงิน สีเขียว เป็นต้น แหล่งกำเนิดทัวร์มาลีนที่สำคัญของโลก คือ บราซิล (Brazil) และแอฟริกา (Africa) นอกจากนี้ยังพบที่ศรีลังกา (Sri Lanka) แทนซาเนีย (Tanzania) ไนจีเรีย (Nigeria) เคนยา (Kenya) มาดากัสการ์ (Madagascar) โมแซมบิค (Mozambique) นามีเบีย (Namibia) และ ปากีสถาน (Pakistan) เป็นต้น ซึ่งแต่ละแหล่งกำเนิดอาจพบทัวร์มาลีนที่มีลักษณะเฉพาะหรือสีที่ต่างกัน โดยสีในทัวร์มาลีนเกิดจากการที่มีธาตุปริมาณน้อยเข้าไปแทนที่ในโครงสร้างของผลึกทัวร์มาลีน ทำให้การดูดกลืนแสงและสีเปลี่ยนแปลง เช่น ทัวร์มาลีนสีชมพูมีธาตุให้สีที่เกิดจากธาตุแมงกานิส (Mn) เข้าไปแทนที่ในโครงสร้างผลึก สีเขียวเกิดจากธาตุปริมาณน้อยที่เป็นเหล็ก (Fe) โครเมียม (Cr) หรือวาเนเดียม (V) เป็นต้น (Castaneda *et al*., 2006)

เป็นที่ทราบกันว่า ปัจจัยที่มีผลต่อมูลค่าของอัญมณีขึ้นอยู่กับ 4C ได้แก่ สี (Color) ความใส (Clarity) น้ำหนัก (Carat weight) และการเจียระไน (Cutting) ดังนั้น สำหรับอัญมณีที่มีคุณภาพต่ำจึงมักถูกนำมาผ่านการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเพิ่มคุณภาพสีและความใสซึ่งจะมีผลต่อมูลค่าจำหน่ายนั่นเอง ทัวร์มาลีนเป็นอัญมณีอีกชนิดหนึ่งที่นิยมทำการปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้มีสีและความใสที่ดีขึ้นด้วยการเผาหรือฉายรังสี (Maneewong *et al*., 2016; Ahn *et al*., 2013) ดังนั้นจึงถือได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาเป็นกระบวนการที่ยอมรับ และได้รับความนิยมในการเพิ่มมูลค่า

แต่ยังถือว่าเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น แหล่งของอัญมณีที่นำมาเผาซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบเคมีของอัญมณีนั้นๆ อุณหภูมิและเวลาในการเผา บรรยากาศในการเผา เป็นต้น กรรมวิธีการเผาพลอยแต่ละชนิดยังถูกปิดเป็นความลับเนื่องจากมีผลทางการค้า ตัวอย่างการปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนจากบราซิลที่มีสีชมพูฟ้า เขียว และเขียวอ่อน ด้วยการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 110-900 องศาเซลเซียส เวลาการเผาตั้งแต่ 2-12 ชั่วโมง โดยมีธาตุให้สีชมพูคือ แมงกานีส และธาตุให้สีฟ้าและเขียวในทัวร์มาลีนจากแหล่งบราซิลคือ เหล็ก ผลการทดลองพบว่าทัวร์มาลีนแต่ละสีภายหลังการเผาจะให้สีแตกต่างกัน สำหรับทัวร์มาลีนกลุ่มสีเขียวนั้น สีที่ได้หลังการเผาจะมีทั้งไม่เปลี่ยนสี เปลี่ยนเป็นสีเขียวชีด สีน้ำตาล สีเทา ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลายืนไฟที่ใช้ (Castaneda *et al*., 2006) ดังนั้นการศึกษาสภาวะในการเผาอัญมณีแต่ละชนิด และการเปลี่ยนแปลงสีหลังการเผาของพลอยแต่ละชนิดหรือแต่ละแหล่งจึงเป็นการศึกษาที่น่าสนใจเพื่อเป็นข้อมูลในการปรับปรุงคุณภาพสีและความใสของพลอยที่ต้องการ รวมถึงสามารถใช้ในการจำแนกพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแต่ละชนิดได้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ โดยจะทำการเผาที่สภาวะอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส และใช้เวลายืนไฟเพียง 1 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศ รวมถึงศึกษาธาตุให้สีของทัวร์มาลีนสีเขียวจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสง และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในหลังการเผาด้วยเทคนิควิเคราะห์สเปกโทรสโกปีเชิงโมเลกุลโดยยูวีวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (UV/Vis spectrophotometer) เอฟทีไออาร์สเปกโทรมิเตอร์ (FTIR spectrometer) และเอนเนอร์จี-ดีสเพิร์สซีฟเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรมิเตอร์ (Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) spectrometer)

วิธีดำเนินการวิจัย

นำตัวอย่างพลอยก้อนทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์มาทำการเจียระไนเป็นแผ่นบางความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร เท่ากันจำนวนหลาย 9 ชิ้น แล้วทำการแบ่งกลุ่ม กลุ่มละ 3 ตัวอย่าง จากนั้นนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยการให้ความร้อนหรือการเผาด้วยอุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชันด้วยเตาไฟฟ้าอัตราเร่ง 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง (เนื่องจากทัวร์มาลีนเป็นพลอยเนื้ออ่อนและที่นำมาศึกษามีตำหนิภายใน หากใช้อัตราเร่งสูงอาจทำให้พลอยแตกได้) เวลายืนไฟ 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เตาเย็นและนำพลอยออก

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของทัวร์มาลีนใช้ Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) spectrometer รุ่น ORBIS Micro-XRF การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทัวร์มาลีนก่อนและหลังการเผา ใช้ UV/VIS spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-4100 การวัดสีใช้โปรแกรมวัดสี (color measurement) ด้วยระบบการวัดสีแบบ CIE L*a*b color space (CIELAB) และวัดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างด้วยเอฟทีไออาร์สเปกโทรมิเตอร์ (FTIR spectrometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น Alpha โดยใช้แสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Mid Infrared) ในช่วง 4000-400 cm^{-1} resolution 4 cm^{-1} จำนวนสแกน 64 สแกน ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดิฟฟิวรีแฟลกชัน (diffuse reflection) ด้วยอุปกรณ์เสริม DRIFT accessory

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1.การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วย EDXRF

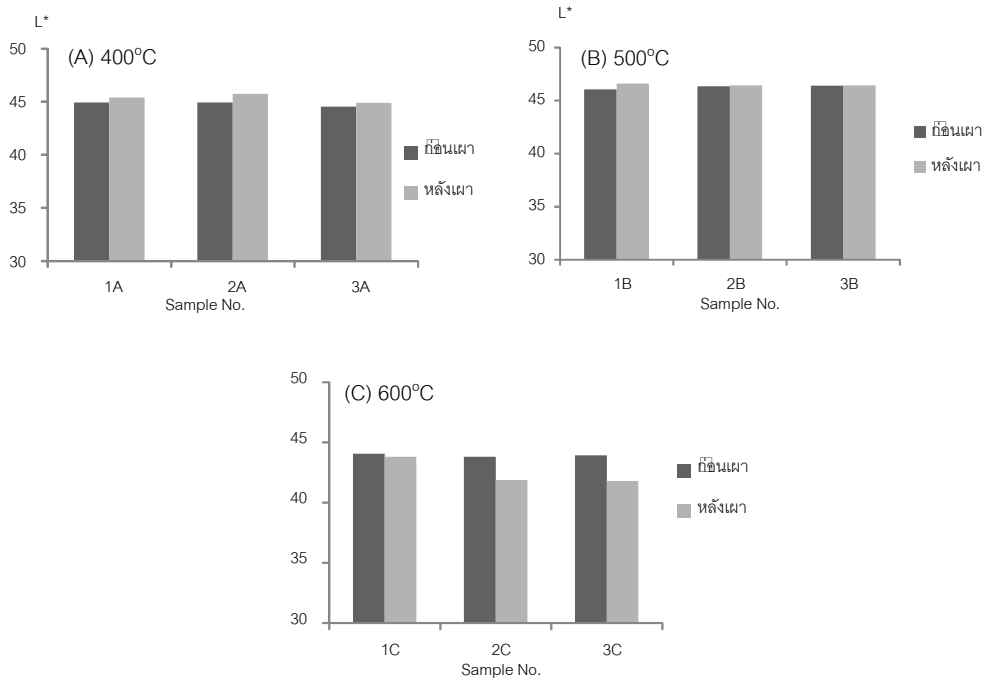
ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบภายในทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ พบว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนที่นำมาศึกษานี้มีธาตุองค์ประกอบหลัก คือ Si มีปริมาณ 47.438 Wt% Al ปริมาณ 39.733 Wt% และ Ca 8.745 Wt%

ซึ่งทั้งหมดเป็นธาตุองค์ประกอบของทัวร์มาลีน มีธาตุมลทินคือ Mn 1.0059 Wt%, Fe 1.0469 Wt%, Ti 0.196 Wt% และ Cu 0.523 Wt% จากผลการทดลองทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์นี้มีปริมาณ Ca สูงมาก ซึ่งจัดเป็นทัวร์มาลีนชนิด Liddicalite (Dirlam, *et al*., 2002)

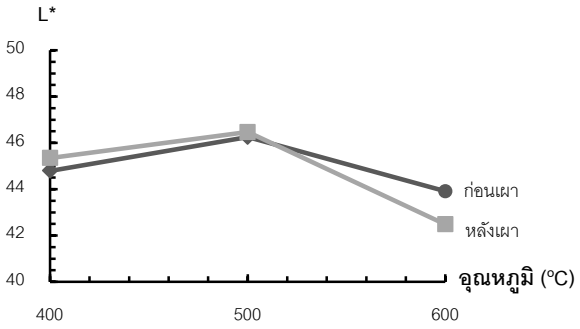
2. การเปลี่ยนสีของทัวร์มาลีนหลังการเผา

ผลการวิเคราะห์สีของทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ก่อนและหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ด้วยระบบสี CIE L*a* b* ได้ผลดังภาพที่ 1-3 โดยค่า L* (Lightness) แสดงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ยิ่งค่ามากยิ่งมีความสว่างมาก สำหรับค่า a* แสดงความเป็นสีแดง (a* เป็นบวก) และสีเขียว (เมื่อ a* มีค่าเป็นลบ) และค่า b* แสดงความเป็นสีเหลือง (b* เป็นบวก) และสีน้ำเงิน (เมื่อ b* เป็นลบ) เมื่อพิจารณาความสว่างที่เปลี่ยนไปหลังการเผาของพลอยแต่ละกลุ่ม ในภาพที่ 1 แสดงผลการวัดค่าความสว่างของทัวร์มาลีนจากแหล่งมาดากัสการ์กลุ่มที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่า ค่า L* หลังเผา สูงกว่า L* ก่อนเผา แสดงว่าเมื่อผ่านการเผาทัวร์มาลีนจะมีมีความสว่างมากขึ้น หรือเรียกว่ามีความใสหรือ Clarity สูงขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีความสว่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (L* มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการเผาเล็กน้อย) เช่นกัน แม้ว่าสีเขียวจะมีค่าลดลง แต่ตัวอย่างที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส จะมีความสว่างลดลง (L* มีค่าลดลงหลังการเผา) และเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกในพลอยเกิดขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงความสว่าง (L*) โดยเฉลี่ยของแต่ละกลุ่มตัวอย่างกับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาจะได้ผลดังภาพที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จะทำให้พลอยมีความสว่างเพิ่มมากที่สุด เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความสว่างจะเพิ่มเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อเผาสูงขึ้นเป็น 600 องศาเซลเซียส จะทำให้พลอยมีความสว่างลดลงเป็นผลมาจากรอยแตกที่เกิดขึ้น

หากพิจารณาค่าการเปลี่ยนแปลงสีหลังการเผาในภาพที่ 3 พบว่าทัวร์มาลีนจากแหล่งมาดากัสการ์กลุ่มที่ทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ดังภาพที่ 3A) มีค่า a* ของตัวอย่างก่อนเผาเป็นลบคือมีสีเขียว และเมื่อผ่านการเผาค่า a* เปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในขณะที่ตัวอย่างที่ผ่านการเผามีค่า b* สูงขึ้นไปในทางบวกเล็กน้อย แสดงว่าตัวอย่างมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส (ดังภาพที่ 3B) และ 600 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 3C) สีของทัวร์มาลีนเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเขียวอมเหลืองเพิ่มขึ้นทั้ง 2 อุณหภูมิ จากการที่ค่า a* เปลี่ยนไปในทางเป็นลบน้อยลง แสดงว่ามีความเป็นสีเขียวน้อยลง และค่า b* เปลี่ยนแปลงไปทางบวกเพิ่มขึ้น นั่นคือตัวอย่างพลอยหลังผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส มีสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับตัวอย่างพลอยที่สังเกตด้วยตาหลังเผา แสดงให้เห็นว่าเมื่อเผาด้วยอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์จะมีสีเขียวลดลงและมีสีเหลืองเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นั่นคือหลังการเผาที่สภาวะนี้ทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลืองนั่นเอง



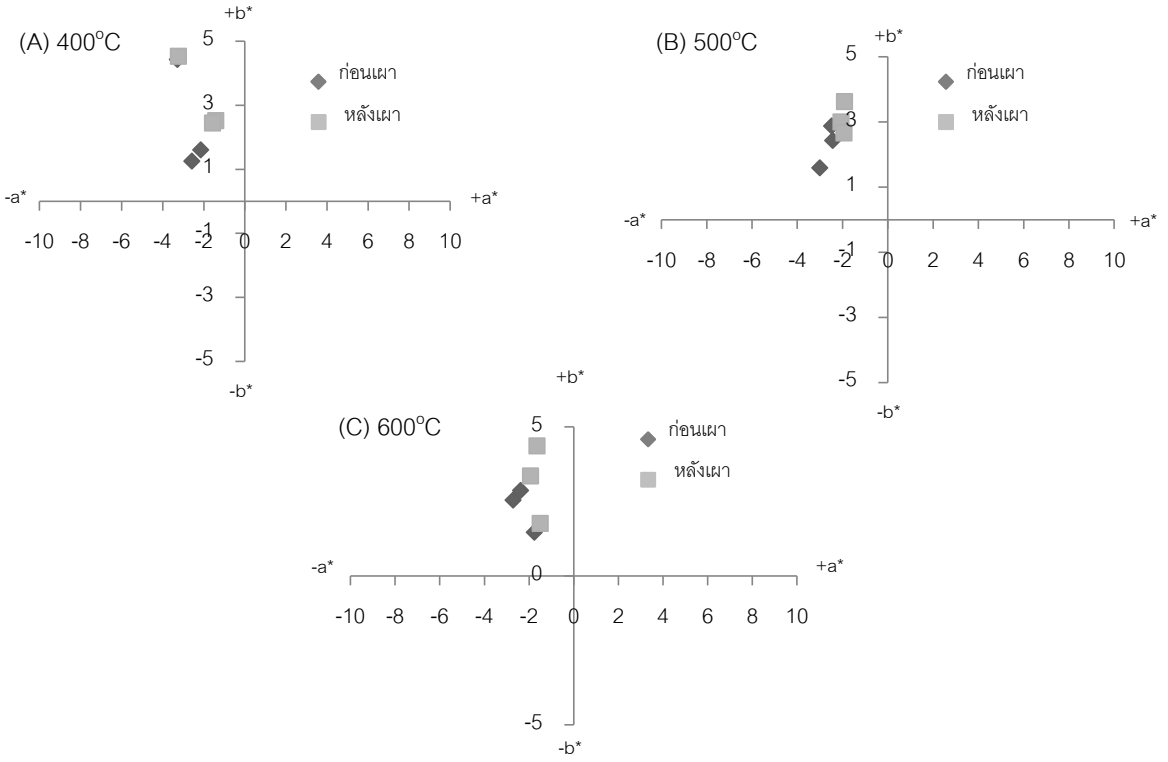
ภาพที่ 1 กราฟแสดงค่า L* ของทัวร์มาลีนสีเขียวแหล่งมาดากัสการ์ก่อนและหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ; (A) 400 องศาเซลเซียส (B) 500 องศาเซลเซียส และ (C) 600 องศาเซลเซียส



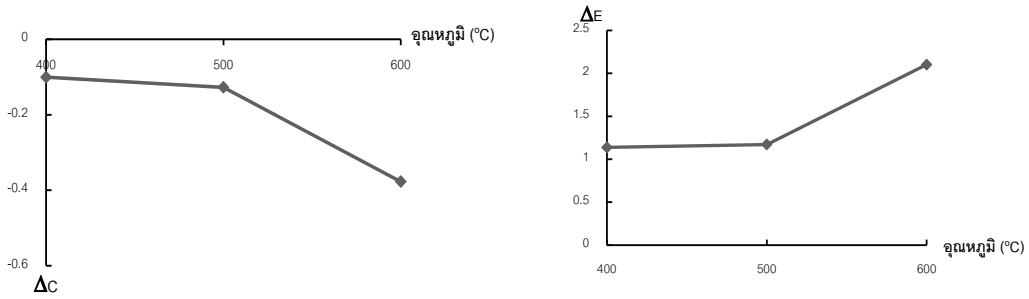
ภาพที่ 2 กราฟแสดงความแตกต่างของค่าความสว่างเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มตัวอย่างของทัวร์มาลีนสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิต่างๆ

อย่างไรก็ตาม หากสังเกตจากตัวพลอยและค่า a* b* ของพลอยที่ผ่านการเผาแต่ละอุณหภูมิ จะมีค่าความเข้มสีหรือการอิ่มตัวของสีเขียวต่างจากการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เพียงเล็กน้อย ซึ่งการเผาพลอยนอกจากจะพิจารณาเรื่องความใส (Clarity) แล้วจำเป็นต้องพิจารณาสีพลอยหลังเผาเนื่องจากความเข้มหรือการอิ่มตัวของสี จึงทำการพิจารณาที่ค่า ΔC^* ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความอิ่มตัวของสีที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของความเข้มสีในเฉดเดียวกัน (โดย C* หาได้จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$) และนำมาพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิที่ใช้เผา จะได้ผลแสดงดังภาพที่ 4 (ซ้าย) พบว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาทุกอุณหภูมิได้ค่า ΔC^* มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีสีเขียวที่ลดลงจากพลอยดิบเริ่มต้นก่อนเผา แต่เมื่อเปรียบเทียบการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่า ΔC^* สูงกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500

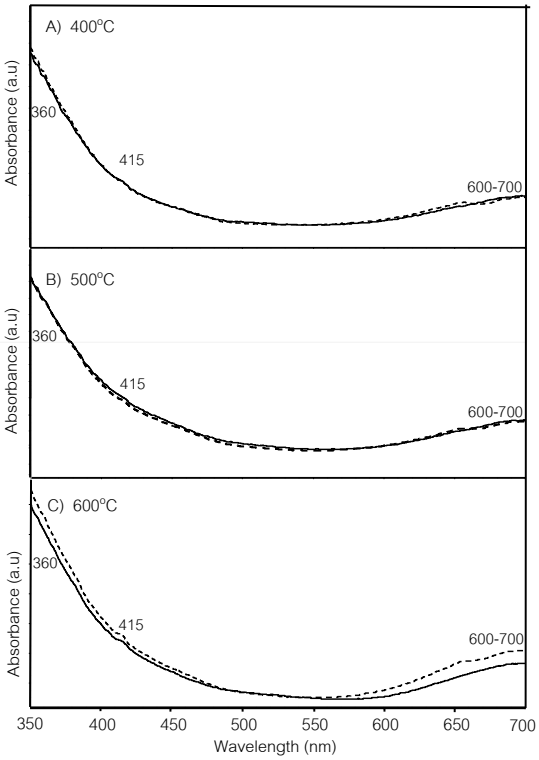
เพียงเล็กน้อย แต่แตกต่างจากที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่มีค่าเป็นลบมาก แสดงว่า แสดงว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่ 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีค่าการอิ่มตัวของสีเขียวสูงกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส และหากพิจารณาค่าการเปลี่ยนสีโดยรวมค่าความสว่างด้วยนั้น จะพิจารณาจากค่า ΔE ซึ่ง ΔE คือค่าความแตกต่างของสี หาได้จาก $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ ดังนั้นหากผลการทดลองเผาทัวร์มาลีนที่อุณหภูมิใดมีค่า ΔE มาก แสดงว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผานั้นจะมีสีที่แตกต่างจากสีทัวร์มาลีนดิบก่อนเผามาก ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนแสดงดังภาพที่ 4(ขวา) ผลการทดลองพบว่า ทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะให้ค่า ΔE ที่สูงที่สุด แสดงว่าการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนที่มากกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นการเผาภายใต้สภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จึงไม่เหมาะสมในการเผาทัวร์มาลีนชนิดนี้ เนื่องจากนอกจากทำให้ความสว่างลดลงมากแล้ว ความอิ่มตัวของสียังลดลงอย่างมากเช่นกัน ดังนั้นการเผาทัวร์มาลีนจากแหล่งมาดากัสการ์ในงานวิจัยนี้ไม่ควรเผาเกินอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 กราฟแสดงค่า a*b* ของทัวร์มาลีนสีเขียวแหล่งมาดากัสการ์ก่อนและหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ; (A) 400 องศาเซลเซียส (B) 500 องศาเซลเซียส และ (C) 600 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4 กราฟแสดงค่าความแตกต่างสี ΔC (ซ้าย) และ ΔE (ขวา) ของทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ภายหลังการปรับปรุงคุณภาพที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส

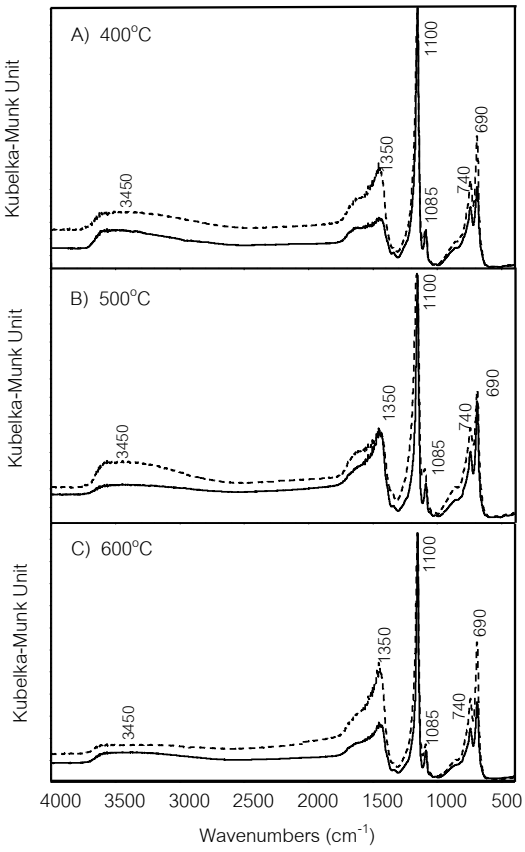


ภาพที่ 5 ยูวีวิสสิเบิลสเปกตรัมของทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ก่อนเผา (--- เส้นประ) และหลังเผา (─ เส้นทึบ) ที่อุณหภูมิ; (A) 400 องศาเซลเซียส (B) 500 องศาเซลเซียส และ (C) 600 องศาเซลเซียส

3. ผลการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectrophotometer

ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีวิสิเบิลของทัวร์มาลีนสีเขียวแหล่งมาดากัสการ์ทั้งก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพที่ 5 สเปกตรัมทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ก่อนเผา แสดงแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่งประมาณ 360 และ 415 นาโนเมตร สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของ Mn^{2+} ซึ่งให้สีเหลืองในทัวร์มาลีนและการดูดกลืนที่ตำหน่ง 600-700 นาโนเมตร สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของ Fe^{2+} ซึ่งเป็นธาตุให้สีเขียวในทัวร์มาลีน (Castaneda

et al., 2006; Kaewtip *et al*., 2016) เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 400 (รูปที่ 5A) และ 500 องศาเซลเซียส (รูปที่ 5B) ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง Mn^{2+} และตำแหน่งของ Fe^{2+} มีการดูดกลืนแสงไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาเป็น 600 องศาเซลเซียส (ดังรูปที่ 5C) พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง Mn^{2+} มีค่าลดลงเล็กน้อย และตำแหน่งของ Fe^{2+} มีค่าลดลงมาก ซึ่งส่งผลต่อสีของทัวร์มาลีนหลังการเผาที่เปลี่ยนไป นั่นคือเมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส จะทำให้พลอยมีสีเขียวลดลงและสีเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวัดสีในระบบ CIE L*a*b*



ภาพที่ 6 ไออาร์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนสีเขียวก่อนเผา (--- เส้นประ) และหลังเผา (─ เส้นทึบ) ที่อุณหภูมิ; (A) 400 องศาเซลเซียส (B) 500 องศาเซลเซียส และ (C) 600 องศาเซลเซียส

4. ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR Spectrometer

เอฟทีไออาร์สเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของอัญมณี โดยเฉพาะเทคนิคการเตรียมตัวอย่างแบบดิฟฟิวรีแฟลกแตนซ์ (Diffuse reflectance) เนื่องจากไม่ต้องทำลายตัวอย่าง ทำการวิเคราะห์ได้ไม่ยุ่งยาก และรวดเร็ว ผลของการวิเคราะห์ทัวร์มาลีนสีเขียวก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังภาพที่ 6 ไออาร์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนที่ยังไม่ผ่านการเผา พบการดูดกลืนหลักที่ตำหน่ง 3450, 1350 ,1100, 1085, 740 และ 690 cm^{-1} โดยการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 3450 cm^{-1} สัมพันธ์กับการดูดกลืนของพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำ และตำแหน่งที่ 1350 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ BO_3 (Reddy *et al*., 2007) ส่วนตำแหน่งที่ 1100 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนของ Si_6O_{18} (Reddy *et al*., 2007) และตำแหน่งที่ 1085, 740 และ 690 cm^{-1} สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ Si-O (Castaneda *et al*., 2000; Ahn *et al*., 2013; Reddy *et al*., 2007) เมื่อนำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า ลักษณะโดยรวมของไออาร์

สเปกตรัมยังพบการดูดกลืนที่ตำแหน่งเดิมทั้งหมด แต่พบว่าความกว้างการดูดกลืนในช่วง 400-2000 cm^{-1} ลดลง และค่าการดูดกลืนของ OH ของโมเลกุลน้ำลดลงด้วย จึงแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนส่งผลให้น้ำในโครงสร้างของทัวร์มาลีนมีการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนไป

สรุปผลการวิจัย

ทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน เวลายืนไฟ 1 ชั่วโมง จะทำให้ได้ทัวร์มาลีนสีเขียวอมเหลือง การเผาที่สภาวะอุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ทัวร์มาลีนมีความใสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีความใสลดลง ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการเผาทัวร์มาลีนสีเขียวจากแหล่งมาดากัสการ์ในงานวิจัยนี้ไม่ควรเกิน 500 องศาเซลเซียส จากการศึกษาธาตุองค์ประกอบหลักด้วย EDXRF และธาตุมลทินให้สีด้วยยูวีวิสซิเบิลพบว่ามี Mn และ Fe เป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสี ผลของยูวีวิสิเบิลสเปกตรัมสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของธาตุให้สีในทัวร์มาลีนและการเปลี่ยนแปลงหลังการเผาได้ คือค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 360 และ 415 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับ Mn^{2+} และค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 620-700 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับ Fe^{2+} มีผลต่อการให้สีเหลืองและเขียวในทัวร์มาลีน การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ OH และการดูดกลืนในช่วง 400-2000 cm^{-1} (fingerprint region) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของน้ำและองค์ประกอบหลักในทัวร์มาลีน

เอกสารอ้างอิง

Ahn, Y., Seo, J., and Park, J. (2013). Electronic and vibrational spectra of tourmaline: The impact of electron beam irradiation and heat treatment. *Vibrational Spectroscopy, 65*, 165-75.

Castaneda, C., Oliveira, E. F., Gomes, N., and Pedrosa Soares, A. C. (2000) Infrared study of OH site in tourmaline from the elbaite-schorl series. *American Mineralogist*, *85*, 1503-1507.

Castaneda, C., Eeckhout, S.G., Costa, G.M., Botelho, N.F., and Grave, E.D. (2006) Effect of heat treatment on tourmaline from Brazil. *Physics and Chemistry of Minerals, 33*, 307-16.

Dirlam, D.M., Laurs, B.M., Pezzotta F., and William, B. (2002). Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar. *Gems & Gemology, 38,* 28-53.

Kaewtip, M., and Limtrakun, P. (2016). Gemological and chemical characteristics of green tourmaline from Madagascar, Mozambique and Tanzania. *Walailak Journal of Science and Technology*, *13*(12), 985-992.

Maneewong, A., Seong, B.S., Shin, E.J.,Kim, J.S., and Kajornrith, V. (2016) Color change of tourmaline by heat treatment and electron beam irradiation: UV-Visible, EPR, and mid-IR spectroscopic analyses. *Journal of the Korean Physical Society*, *68*(1), 83-92.

Reddy, B. J., Frost, R.L., Martens, W. N., Wain, D. L., and Kloprogge, J.T. (2007). Spectroscopic characterization of Mn-rich tourmalines. *Vibrational Spectroscopy, 44*, 42-49.

Zolotarev, A. A., Frank-Kamenetskaya, O. V., and Rozhdestvenskaya, I. V. (2007). Crystallochemical formulas and definition of species of tourmaline-group minerals. *Geology of Ore Deposits*, *49* (7), 547–553.