การปรับปรุงคุณภาพพาราอิบาทัวร์มาลีนจากแหล่งโมแซมบิคด้วยความร้อน

Heat treatment of Paraiba-Type Mozambique Tourmalines

พิมพ์ทอง ทองนพคุณ[1]*, อรุณี เทอดเทพพิทักษ์[2], และ เมธินี จามกระโทก[2]

Pimthong Thongnopkun[1], Arunee Therdteppitak[2] and Matinee Jamkratoke[2]

[1]หน่วยวิจัยอัญมณีและเครื่องประดับ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

[2]คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

บทคัดย่อ

พาราอิบาทัวร์มาลีนคือ ทัวร์มาลีนสีฟ้าอมเขียว หรือเขียวอมฟ้าซึ่งเกิดจากธาตุให้สีคือ ทองแดงและแมงกานีส ทัวร์มาลีนชนิดนี้จัดเป็นอัญมณีที่หายากและราคาสูง งานวิจัยนี้ทำปรับปรุงสีของทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคโดยการให้ความร้อนภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะการเผาที่เหมาะสมนี้ทัวร์มาลีนสีม่วงจากโมแซมบิคเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว ผลของ EDXRF พบว่ามีทองแดงและแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทัวร์มาลีนก่อนและหลังเผาด้วยเทคนิคยูวีวิสิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกโทรสโกปีพบว่าทัวร์มาลีนสีม่วงก่อนเผามีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 525 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของ Mn^{3+} ในขณะที่การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 690 และ 900 นาโนเมตร เป็นแถบการดูดกลืนแสงของ Cu^{2+} ซึ่งสัมพันธ์กับการเกิดสีฟ้าในทัวร์มาลีน นอกจากนี้พบแถบการดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1316, 1430 และ 1478 นาโนเมตร สัมพันธ์กับการดูดกลืนของ OH ของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างของทัวร์มาลีน ทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาพบค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 525 นาโนเมตร ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และพบพีคใหม่ของ OH ที่ตำแหน่ง 1400 นาโนเมตร

คำสำคัญ: พาราอิบา/ ทัวร์มาลีน/ โมแซมบิค/ การปรับปรุงคุณภาพด้วยการให้ความร้อน

Abstract

A paraiba tourmaline is a bluish green to greenish blue tourmaline, mainly due to the presence of copper (Cu) and manganese (Mn). The tourmaline is one of the rarest and most expensive gemstones. In this research, the violet Mozambique tourmalines were heated in oxidizing condition at 400-600ºC in order to improve their colors. Under optimal conditions, the heating treatment can change violet colors of tourmalines to turn into blue shade. The EDXRF results identify the presence of Cu and Mn in the tourmaline specimens. UV/VIS/NIR spectrophotometer was employed to study the color changing and absorption spectra of tourmalines. The absorption spectra of unheated tourmaline reveal the characteristic absorption bands at 525 nm which assigned as absorption of Mn^{3+} while the bands at 690 and 900 nm are assigned as absorption of Cu^{2+} which related to blue color of tourmaline. In addition, the absorption bands at 1316, 1430 and 1477 nm are OH absorption band of H_2O in tourmaline structure. After heating, the heated tourmalines reveal obviously decreasing of absorption band at 525 nm and increasing a new band of OH absorption at 1400 nm.

Keywords : Paraiba / Tourmaline / Mozambique/ Heat treatment

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

1. บทนำ

ทัวร์มาลีน (Tourmaline) เป็นพลอยเนื้ออ่อนตระกูลใหญ่ที่มีสีสันสวยงามและหลากหลาย เช่น สีชมพู สีฟ้า สีเขียว สีม่วง เป็นต้น พาราอิบาทัวร์มาลีน (Paraiba Tourmaline) เป็นทัวร์มาลีนที่หายากมีราคาสูง และกำลังเป็นที่ได้รับความนิยม เดิมมีต้นกำเนิดจาก Paraiba ประเทศบราซิล พาราอิบาเป็นทัวร์มาลีนประเภท Elbaite มีสีเขียวอมฟ้า ฟ้าอมเขียว หรือเขียวนีออน ซึ่งพบว่าธาตุให้สีคือ ทองแดงและแมงกานีส (Laurs *et al*., 2008; Merkel *et al*., 2009) ปัจจุบันทัวร์มาลีนที่มีสีในโทนเขียวอมฟ้าหรือฟ้าอมเขียว ที่มีธาตุทองแดงและแมงกานีสเป็นองค์ประกอบจึงรวมเรียกว่าพาราอิบาทัวร์มาลีน เหตุที่ทัวร์มาลีนสีนี้ได้รับความนิยมและมูลค่าสูงมากกว่าทัวร์มาลีนชนิดอื่น เนื่องจากเป็นสีที่หายากและมีแหล่งกำเนิดแหล่งเดียวนั่นเอง ด้วยเหตุที่สีเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อมูลค่าของทัวร์มาลีนทำให้นิยมทำการปรับปรุงคุณภาพของทัวร์มาลีนด้วยการเผาเพื่อดัดแปลงสีทัวร์มาลีนจากแหล่งอื่นๆ ให้ได้สีใกล้เคียงกับสีของพาราอิบาทัวร์มาลีน ภายหลังมีการพบแหล่งพลอยใหม่ที่ไนจีเรีย (Nigeria) และโมแซมบิค (Mozambique) ทัวร์มาลีนจากแหล่งโมแซมบิคที่ขุดพบมีปริมาณมากและมีสีสันหลากหลาย แต่มีเฉด (shade) สีต่างกันไป (Laurs *et al*., 2008) เป็นที่น่าสนใจในการนำมาศึกษา งานวิจัยที่ทำการศึกษาทัวร์มาลีนจากแหล่งโมแซมบิคจึงเป็นการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีขั้นสูงเพื่อให้ทราบปริมาณธาตุองค์ประกอบและธาตุให้สีในทัวร์มาลีนแต่ละสีนั้นๆ ผลงานวิจัยพบว่าทัวร์มาลีนจากโมแซมบิคมีองค์ประกอบจัดอยู่ในประเภท copper manganese elbaite ซึ่งมีองค์ประกอบเคมีคล้ายพาราอิบาทัวร์มาลีน ธาตุให้สีสำคัญในทัวร์มาลีนแหล่งนี้คือ แมงกานีส และทองแดง โดยมีปริมาณ CuO และ MnO อยู่ประมาณร้อยละ 0.66 และ 3.09 ตามลำดับ (Laurs *et al*., 2008) สำหรับงานวิจัยด้านการปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนจากแหล่งโมแซมบิคโดยการเผาจะทำการศึกษาผลของสีและสาเหตุการเกิดสีของทัวร์มาลีนชนิดนี้ที่มีสีต่างกัน โดยทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 500-530 องศาเซลเซียส ในสภาวะบรรยากาศเป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง และศึกษาการเปลี่ยนสีก่อนและหลังการเผาในช่วงความยาวคลื่นยูวีวิสิเบิล (UV-Visible) และอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared) ตั้งแต่ 200-900 นาโนเมตร (Laurs *et al*., 2008; Abduriyim et al., 2006)

ถึงแม้การปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาเป็นกระบวนการที่ยอมรับและได้รับความนิยมในการเพิ่มมูลค่าพลอย แต่ยังถือว่าเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการเช่น อุณหภูมิและเวลาในการเผา บรรยากาศในการเผาหรือองค์ประกอบทางเคมีของพลอยดิบที่จะนำมาเผา เป็นต้น การเผาให้ได้ผลผลิตที่เหมือนกันทุกๆ ครั้งจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ แต่กรรมวิธีการเผาพลอยหลายชนิดยังถูกปิดเป็นความลับเนื่องจากมีผลทางการค้า ดังนั้นการศึกษาองค์ประกอบของพลอยที่ต้องการนำมาเผาเพื่อเลือกพลอยดิบจึงเป็นข้อมูลที่น่าสนใจ รวมถึงการศึกษาด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ชั้นสูงที่ให้ข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีควบคู่ไปกับการหาสภาวการณ์ปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาที่เหมาะสมจึงเป็นการศึกษาที่ทำให้ได้ผลที่น่าเชื่อถือ การปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาเพื่อเปลี่ยนสีทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคให้เป็นสีฟ้าอมเขียวแบบพาราอิบาทัวร์ทาลีนเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของอัญมณีนี้ โดยทำการเผาด้วยอุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเอนเนอร์จี-ดีสเพิร์สซีฟเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรมิเตอร์ (Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer) รวมถึงวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิควิเคราะห์สเปกโทรสโกปีเชิงโมเลกุลโดยยูวีวิสิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกโทรสโฟโทมิเตอร์ (UV/Vis/NIR Spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 200-1500 นาโนเมตร ซึ่งอาจแสดงให้เห็นผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสีและการเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างทัวร์มาลีนด้วยสเปกตรัมในช่วงคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้

2. การทดลอง

ตัวอย่างทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมซัมบิคจำนวน 15 ตัวอย่าง ถูกนำมาแบ่งกลุ่ม กลุ่มละ 5 ตัวอย่าง เพื่อปรับปรุงคุณภาพสีโดยการเผาที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชันด้วยเตาไฟฟ้า โดยนำตัวอย่างพลอยใส่ลงในเบ้าพลอยชนิดอลูมินา (Alumina Crucible) กำหนดการทำงานของเตาโดยตั้งอัตราเร่ง 125 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จากอุณหภูมิห้องถึง 200 องศาเซลเซียส และอัตราเร่ง 200 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จาก 200 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (400, 500, 600 องศาเซลเซียส) โดยยืนไฟเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เตาเย็นและนำพลอยออก

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของทัวร์มาลีนใช้ Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometer ยี่ห้อ Oxford รุ่น ED2000 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสีและสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของทัวร์มาลีนก่อนและหลังการเผาใช้ UV/VIS/NIR

Spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-4100 ช่วงความยาวคลื่น 200-1500 นาโนเมตร การวัดสีใช้โปรแกรมวัดสี (Color Measurement) ด้วยระบบการวัดสีแบบ CIE L*a*b Color Space (CIELAB)

ก) ทัวร์มาลีนก่อนเผา ข) ทัวร์มาลีนหลังเผา

รูปที่ 1 ตัวอย่างทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิค: ก) ก่อนเผา และ ข) หลังเผาได้สีฟ้าอมเขียว

3. ผลและอภิปราย

3.1 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของทัวร์มาลีนด้วย EDXRF

ผลการวิเคราะห์ทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคด้วย EDXRFแสดงว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนทั้งหมดเป็นทัวร์มาลีนที่อยู่ในกลุ่ม Elbaite คือมีองค์ประกอบเป็น $(Na(Li,Al)_3Al6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4)$ โดยมี Al_2O_3, SiO_2และ Na_2O เป็นธาตุองค์ประกอบหลัก (Al_2O_3ในช่วง 22-27 Wt%, $SiO_2$3-10 Wt %, Na_2O 19-22 Wt %) และพบธาตุ Mn และ Cu เป็นธาตุมลทินที่ทำให้เกิดสีในทัวร์มาลีน (MnO 0.41-0.45 Wt %, และ Cu 0.10-0.44 Wt %)

3.2 การเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนหลังการเผา

รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนด้วยค่า a* และ b* ทัวร์มาลีนสีม่วงก่อนเผามีค่า a* เป็นบวก (สีแดง) และ b* เป็นลบ (สีน้ำเงิน) เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ทำให้สีของทัวร์มาลีนเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก บางตัวอย่างยังคงเป็นสีม่วง สัมพันธ์กับค่า a* ที่ยังคงเป็นบวก และ b* เป็นลบ แต่เมื่อทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส สีของทัวร์มาลีนเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีฟ้าอมเขียวทั้ง 2 อุณหภูมิ (ค่า a* เป็นลบ (สีเขียว) และ b* อยู่ระหว่างบวกกับลบ) อย่างไรก็ตามการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส ให้ความอิ่มตัวของสีฟ้าอมเขียวที่ได้แตกต่างกัน จึงทำการวิเคราะห์ผลต่อด้วยค่า ΔE และ C*

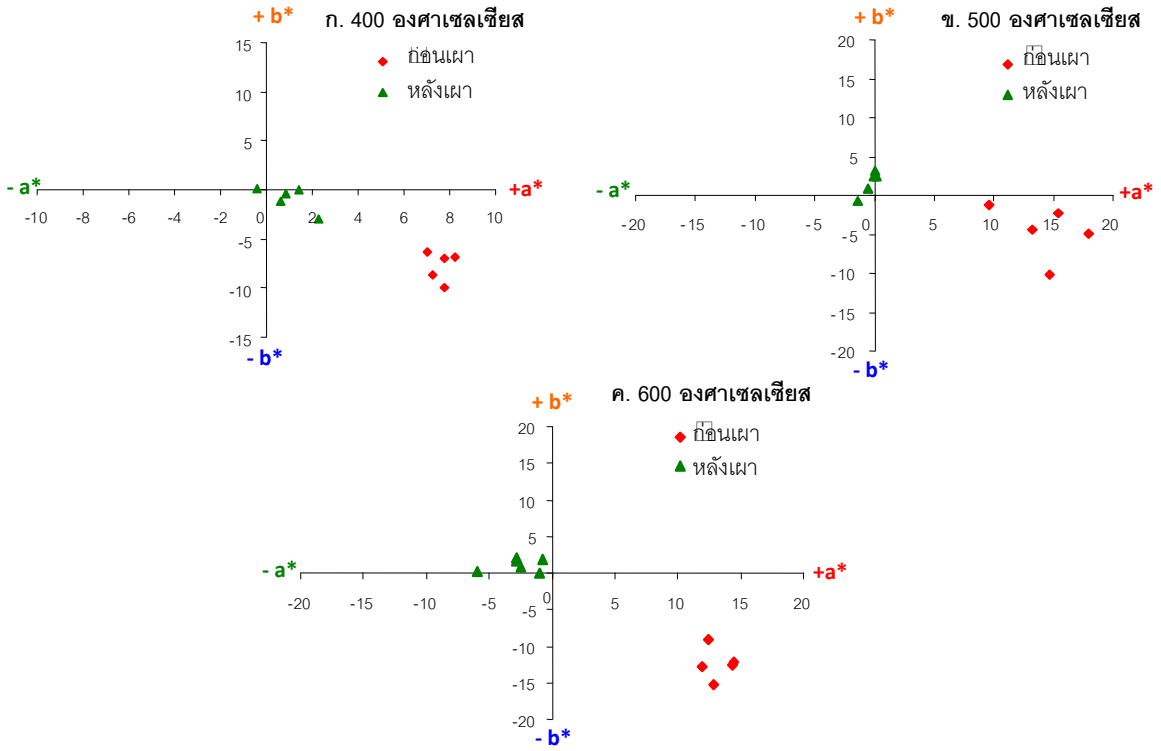
รูปที่ 3 แสดงผลของอุณหภูมิในการเผาต่อการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ΔE, C* และ อุณหภูมิในการเผา ค่า ΔE คือค่าความแตกต่างของสี โดยค่า ΔE หาได้จาก $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ (ค่า L* หมายถึงความสว่าง) ดังนั้นหากผลการทดลองเผาทัวร์มาลีนที่อุณหภูมิใดมีค่า ΔE มากแสดงว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผานั้นจะมีสีที่แตกต่างจากสีทัวร์มาลีนดิบก่อนเผามาก ผลการทดลองพบว่า ทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะให้ค่า ΔE ที่สูงที่สุด แสดงว่าการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสีของทัวร์มาลีนที่มากกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ้าสังเกตจากตัวพลอยที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส จะมีค่าความเข้มสีหรือการอิ่มตัวของสีต่างกันเล็กน้อย ซึ่งการเผาพลอยจำเป็นต้องพิจารณาสีพลอยหลังเผาเนื่องจากความเข้มหรือการอิ่มตัวของสีจะมีผลต่อราคา จึงทำการพิจารณาที่ค่า C* ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความอิ่มตัวของสีที่ใช้เปรียบเทียบความแตกต่างของความเข้มสีในเฉดเดียวกัน (C* หาได้จาก $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$) พบว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีค่า C* สูงกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส แสดงว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่ 500 องศาเซลเซียส จะมีค่าการอิ่มตัวของสีฟ้าอมเขียวสูงกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส ดังนั้นการเผาภายใต้สภาวะออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส สามารถทำให้ทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าอมเขียวได้ทั้งสองอุณหภูมิ แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาให้ได้สีฟ้าอมเขียวที่มีความอิ่มตัวสีสูงสุดในงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสีจากค่าการดูดกลืนแสงของธาตุให้สีในทัวร์มาลีนด้วย UV/VIS/NIR spectrophotometer แสดงดังรูปที่ 4 เมื่อพิจารณายูวีวิสิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคก่อนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนพบว่าทัวร์มาลีนสีม่วงมีแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งประมาณ 525, 690, 910, 1316, 1430 และ 1478 นาโนเมตร และพบไหล่พีค (shoulder)

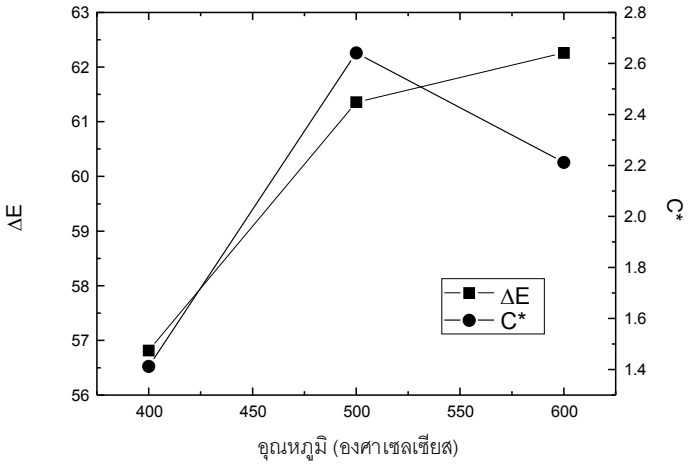
ที่ตำแหน่งประมาณ 1400 นาโนเมตร (ดังรูปแทรกในรูปที่ 4ค) ผลของสเปกตรัมในช่วงยูวีวิสิเบิลแสดงธาตุให้สีซึ่งตรงกับข้อมูลที่ได้จาก EDXRF กล่าวคือพบแถบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 525 nm สัมพันธ์กับ Mn^{3+} ส่วนที่ตำแหน่ง 690 และ 900 นาโนเมตร เป็นแถบการดูดกลืนแสงของ Cu^{2+} ดังนั้นสีม่วงในทัวร์มาลีนก่อนเผามาจากธาตุให้สีคือ Mn^{3+} และ Cu^{2+} (Laurs *et al*., 2008; Merkel *et al*., 2009) (ซึ่งสัมพันธ์กับสีชมพูและสีฟ้าตามลำดับ)

การเปลี่ยนแปลงสีภายหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนพบว่าตัวอย่างทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของสีน้อยมาก ในขณะที่ทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 500 และ 600 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงสีที่เห็นได้อย่างชัดเจน คือเกิดการเปลี่ยนสีจากสีม่วงเป็นสีฟ้าอมเขียว (ดังผลการทดลองในรูปที่ 2 และ 3) ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงของธาตุให้สีของทัวร์มาลีนหลังผ่านการเผาที่แสดงในรูปที่ 4 โดยทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดกลืนแสงมากกว่าทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิต่ำ คือ ทัวร์มาลีนที่เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบแถบการดูดกลืนแสงของ Mn^{3+} ที่ตำแหน่ง 525 นาโนเมตร มีค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงมากซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของสีแดงของทัวร์มาลีนภายหลังการเผาโดยเกิดจากการเปลี่ยนของ Mn^{3+} ไปเป็น Mn^{2+} (Laurs *et al*., 2008) นอกจากนั้นแถบการดูดกลืนแสงของ Cu^{2+} ที่ตำแหน่ง 690 และ 910 นาโนเมตร เปลี่ยนแปลงไม่มากนักจึงส่งผลให้สีหลังการเผาเปลี่ยนเป็นสีฟ้าอมเขียว

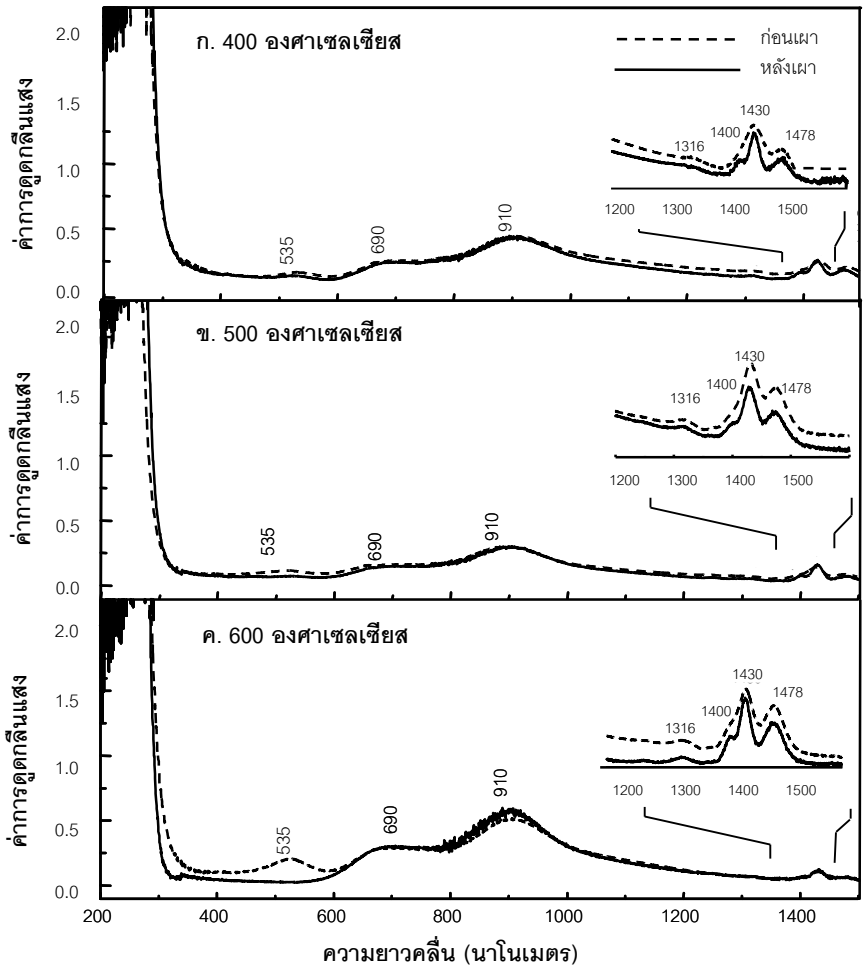
สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ (Near IR) ในช่วงความยาวคลื่น 800 - 1500 นาโนเมตร ในรูปที่ 3 ของทัวร์มาลีนก่อนการเผาพบค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งประมาณ 1316, 1430 และ 1478 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าการดูดกลืนแสงของหมู่ OH ของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างทัวร์มาลีนและพบไหล่พีค (shoulder) ที่ตำแหน่งประมาณ 1400 นาโนเมตร (ดังรูปแทรกในรูปที่ 4ค) การดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1430 นาโนเมตร (6993 cm^{-1}) และ 1478 นาโนเมตร (6770 cm^{-1}) เป็นการดูดกลืนแสงของกลุ่ม OH3 ซึ่งเป็น OH ของโมเลกุลน้ำที่อยู่บริเวณขอบของ hexagonal ring ของโครงสร้างทัวร์มาลีน (Reddy *et al*., 2007; Castaneda *et al*., 2000) ในขณะที่ตำแหน่ง 1316 นาโนเมตร (7598 cm^{-1}) สัมพันธ์กับการดูดกลืนแสงของ OH1 ซึ่งเป็น OH ของโมเลกุลน้ำที่อยู่บริเวณตรงกลางของ hexagonal ring ของโครงสร้างทัวร์มาลีน (Reddy *et al*., 2007; Castaneda *et al*., 2000) ภายหลังการเผาพบว่าทัวร์มาลีนทุกตัวอย่างพบการพีคดูดกลืนแสงที่ตำแหน่งใหม่ที่ 1400 นาโนเมตร (7143 cm^{-1}) เกิดขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะทัวร์มาลีนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (ดังรูปแทรกในรูปที่ 4ค) จึงแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนส่งผลให้น้ำในโครงสร้างของทัวร์มาลีนมีการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า a* และ b* ของทัวร์มาลีนก่อนและหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ ก) 400 องศาเซลเซียส, ข) 500 องศาเซลเซียส และ ค) 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของ ΔE และ C* ของทัวร์มาลีนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 ยูวีวิสิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกตรัมของทัวร์มาลีนก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ ก) 400 องศาเซลเซียส, ข) 500 องศาเซลเซียส และ ค) 600 องศาเซลเซียส

4. บทสรุป

ทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคในงานวิจัยนี้เป็นชนิด Elbaite การนำทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งนี้มาปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อนสามารถให้สีฟ้าแกมเขียวสดแบบพาราอิบาทัวร์มาลีนได้เนื่องจากมีธาตุ Mn และ Cu เป็นองค์ประกอบ โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพทัวร์มาลีนสีม่วงจากแหล่งโมแซมบิคด้วยความร้อนในบรรยากาศแบบออกซิเดชันคือ 500 องศาเซลเซียส ผลของยูวีวิสิเบิลเนียร์ไออาร์สเปกตรัมสามารถบอกถึงความสัมพันธ์ของธาตุให้สีในทัวร์มาลีนได้ กล่าวคือค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 525 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับ Mn^{3+} และค่าการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 690 และ 910 นาโนเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับ Cu^{2+} มีผลต่อการให้สีฟ้า การเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ OH ในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของน้ำในทัวร์มาลีน

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินปีงบประมาณ 2550 จากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาแห่งชาติ และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ในการให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่อง EDXRF

6. เอกสารอ้างอิง

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

Laurs, B. M., Zwaan, (Hanco) J. C., Breeding, C. M., Simmons,(Skip) W. B., Beaton, D., Rijsdijk, K. F., et.al. (2008) Copper-bearing (Paraiba-type) tourmaline from Mozambique. *Gems & Gemology, 44*, 4-30.

Merkel, P. B. and Breeding, C. M. (2009) Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines. *Gems & Gemology, 45*, 112-119.

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

Abduriyim, A., Kitawaki, H., Furuya, M., Schwarz, D. (2006) “Paraiba”-Type copper-bearing tourmaline from Brazil, Nigeria, and Mozambique: chemical fingerprint by LA-ICP-MS” *Gems & Gemology, 42*, 4-21.