บทที่ 5

อภิปรายและวิจารณ์ผล

5.1 พลอยเพทาย

จากการทดลองเผาพลอยเพทายจากทั้ง 4 แหล่ง สามารถแบ่งเพทายก่อนเผาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มที่ 1 คือกลุ่มสีน้ำตาล ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง ได้แก่ พลอยเพทายจากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา แหล่งบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี แหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ประเทศไทย และกลุ่มที่ 2 คือเพทายจากแหล่งรัตนปุระ ประเทศศรีลังกา ซึ่งตัวอย่างพลอยเพทายส่วนใหญ่มีสีเหลือง-เขียว เกิดจากโครงสร้างผลึกถูกทำลาย โดยธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มมีผลการศึกษาที่ได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น Degree of metamictization สมบัติทางสเปกโตรสโคปี และองค์ประกอบทางเคมี

5.1.1 ความแตกต่างระหว่างพลอยเพทายก่อนเผาและหลังเผา

การศึกษาครั้งนี้พบว่าสามารถแยกเพทายที่เผาและไม่เผาออกจากกันได้อย่างชัดเจนด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared spectrophotometer โดยในเพทายกลุ่มที่ 1 ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง จะพบว่าพีคของ OH group ที่ 4072 cm^{-1} และ 4262 cm^{-1} ซึ่งพบได้ในเพทายก่อนเผาจะหายไปหลังจากทำการเผาตั้งแต่อุณหภูมิ 800 °C ส่วนเพทายในกลุ่มที่ 2 มี degree of metamictization สูงซึ่งทำให้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (amorphous) นั้น พบว่าตัวอย่างเพทายจากแหล่งรัตนปุระ ประเทศศรีลังกา หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C จะมีความเป็นผลึกในโครงสร้างสูงขึ้น โดยจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Raman spectroscope จะสามารถพบความเปลี่ยนแปลงของสเปคตรัมจาก broadband มี peak ที่ชัดเจนขึ้น

5.1.2 การเกิดสีของเพทายหลังการเผา

เพทายที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่มักมีสีน้ำตาลอมแดง โดยมีความเข้มของสีที่แตกต่างกัน ทั้งในแหล่งกำเนิดเดียวกันและคนละแหล่งกำเนิด ซึ่งความเข้มของสีมีความสัมพันธ์กับปริมาณของธาตุกัมมันตภาพรังสีที่เป็นองค์ประกอบในเพทาย (อรุณี และคณะ 2550) นอกจากนี้ยังอาจเกี่ยวข้องกับอายุของเพทายอีกด้วย สำหรับการเกิดสีน้ำตาลอมแดงของเพทายที่พบในธรรมชาติซึ่งเกี่ยวข้องกับธาตุกัมมันตภาพรังสีนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้หลังทำการเผาจากการศึกษาครั้งนี้ พบว่าเมื่อเผาเพทายที่อุณหภูมิ 800 °C ในสภาวะ reduction ตัวอย่างเพทายจะเปลี่ยนเป็นใสไม่มีสี ซึ่งผลวิเคราะห์ที่ได้การวัดด้วยเครื่อง Laser Raman Spectroscope พบว่าโครงสร้างผลึกของเพทายก่อนเผามีการเปลี่ยนแปลงหรือถูกทำลายไปเพียงเล็กน้อย และจากการศึกษาของ Nasdala et al. (2001) สรุปไว้ว่า ผลจากการแผ่รังสีที่มีการทำลายโครงสร้างเกิดเป็น defect เพียงเล็กน้อยในพลอยเพทาย ซึ่งเมื่อได้เปรียบเทียบกับผลจากการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างของเพทายก่อนการเผาทั้งจากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา และแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ประเทศไทย ได้ถูกทำลายจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสี (self-irradiation) ทำให้เกิดความเสียหายใน

โครงสร้างไปเพียงเล็กน้อยในลักษณะที่เรียกว่า point defect หรือ Frenkel type defect เท่านั้น ซึ่งเมื่อนำผลวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Visble-near infrared และ infrared จากเครื่องมือ UV-Vis NIR spectrophotometer และ FTIR spectrophotometer ตามลำดับ มาประกอบการอธิบาย จะพบว่าในตัวอย่างพลอยเพทายก่อนเผามีลักษณะการเกิดศูนย์กลางสี (colour centre) ซึ่งมีผลให้พลอยเพทายก่อนเผามีสีน้ำตาล ผลของการวิเคราะห์ และพบ OH group ในตัวอย่างพลอยเพทายก่อนเผาซึ่งจะหายไปหลังการเผาซึ่งบ่งบอกถึงการเกิด defect ขึ้นภายในโครงสร้าง จากผลการทดลองในส่วนนี้ ยังสามารถประเมินในเบื้องต้นได้อีกว่า เพทายจากแหล่งบางกะจะ บ่อพลอยและรัตนคีรี น่าจะมีอายุทางธรณีวิทยาไม่มากนัก เนื่องจากโครงสร้างของเพทายยังไม่ถูกทำลายในระดับที่เรียกว่า metamict zircon

จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Raman Spectroscope พบว่า ลักษณะความเป็นผลึกของตัวอย่างพลอยเพทาย จากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา แหล่งบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี และแหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี ประเทศไทย หลังการเผามีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการเปลี่ยนตำแหน่งของค่า ν_3 และ FWHM (shift left และ ค่า FWHM เพิ่มขึ้น) ซึ่งอาจเกิดจากการขยายตัวของโครงสร้างผลึกเนื่องจากความร้อน เนื่องจากมีการสูญเสีย OH group ที่มีในโครงสร้าง สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ FTIR ที่พบว่า พีค OH-stretching ที่ตำแหน่ง 4072 cm^{-1} และ 4262 cm^{-1} หายไปหลังจากการเผา ซึ่งอาจเกิดจากการสูญเสียน้ำ (OH group) ที่อยู่ในเพทายที่มี defect ส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในรูปของการขยายตัวของ lattice นอกจากนี้ ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างก่อนเผาของพลอยเพทายด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer แสดง color centre เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ อรุณี และคณะ (2550) ซึ่งพบช่วงของการดูดกลืนแสง ที่ 480 nm แต่ช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวไม่ปรากฏในผลการวิเคราะห์หลังเผา สอดคล้องกับการเปลี่ยนสีของพลอยเพทายหลังเผาที่เปลี่ยนเป็นไม่มีสี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า สีน้ำตาลอมแดงที่เกิดขึ้นในเพทายก่อนเผาซึ่งเกิดขึ้นในรูปของ color centre น่าจะมีสาเหตุมาจาก Frenkel type defect อันเนื่องมาจากการแผ่รังสีของธาตุกัมมันตรังสีของ U และ Th

การทดลองเผาพลอยเพทายแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา ที่อุณหภูมิในช่วง 900 - 1000 °C ในสภาวะ reduction พบว่า พีค ν_3 เริ่มมีค่าที่คงที่และบางค่ามีการ shift ไปสู่ค่าที่มากขึ้น ซึ่งบ่งบอกถึงการเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง โดยจะแสดงถึงสภาวะที่พันธะภายในโครงสร้างสั้นลง ส่งผลให้การสั่นของพันธะสูญเสียพลังงานมากยิ่งขึ้น อรุณีและคณะ 2550 สรุปว่า การเปลี่ยนสีของเพทายจะเกิดที่อุณหภูมิ 900 °C ในสภาวะ reduction เกิดจาก U^{4+} ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสีฟ้าขึ้นในเพทาย ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ผลจากการเผาพลอยเพทายที่ 900 ถึง 1000 °C เพทายเปลี่ยนเป็นสีฟ้า สามารถอธิบายการเกิดสีฟ้าในเพทายโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis NIR spectrophotometer ซึ่งแสดงการดูดกลืนของ U^{4+} ในโครงสร้างของพลอยเพทายหลังเผา

จากการศึกษาองค์ประกอบเคมี ด้วยเครื่องมือ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDXRF) พบว่า ธาตุ Uranium (U) เป็นธาตุร่องรอย (trace element) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดสีฟ้า โดยเมื่อนำผลวิเคราะห์ของเครื่อง Laser Raman

spectroscope มาประกอบการศึกษา พบว่าโครงสร้างของเพทายมีการขยายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 800 °C โดย Zr^{4+} มีค่า ionic radius ที่ 0.84 Å ซึ่งอยู่ในตำแหน่งของ Polyhedral ในโครงสร้าง ซึ่งธาตุที่มีโอกาสที่จะเข้าไปแทนที่ (substitution) ได้นั้นต้องมีค่า ionic radius ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งโดยปกติที่พบจะเป็นธาตุในกลุ่มของ Uranium และ Thorium แต่จากการวิเคราะห์พบว่า ขนาดของยูเรเนียมไอออนที่ควรจะเข้าแทนที่ได้ในแบบ simple substitution ควรจะเป็น U^{4+} แต่จากการวิเคราะห์เพทายก่อนเผาด้วยเครื่อง UV-Vis NIR spectrophotometer จะพบ peak ของ U^{5+} เท่านั้น ซึ่งน่าจะเกิดจากการ self-irradiation โดยปกติจะไม่สามารถอยู่เดี่ยวๆ ได้เนื่องจากมีไอออนที่มากกว่า Zr^{4+} แต่เมื่อนำมารวมกับการเกิด OH^- ใน OH group ซึ่งสามารถตรวจพบด้วยเครื่อง FTIR spectrophotometer เช่นเดียวกัน ฉะนั้นจึงสามารถพบ U^{5+} ในผลึกของเพทายได้ นอกจากนี้ขนาด ionic radius ของ U^{5+} จะอยู่ที่ประมาณ 0.84 Å ซึ่งมีขนาดที่ใกล้เคียงกับ Zr^{4+} มาก

ส่วน U^{4+} ซึ่งมีค่า ionic radius ที่ 1.00 Å ซึ่งน่าจะเป็นสาเหตุของการเกิดสีฟ้าของเพทาย มีขนาดที่ใหญ่เกินกว่าจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งของ Zr^{4+} ที่อุณหภูมิห้อง แต่ผลจากการเผาส่งผลให้ crystal lattice มีการขยายตัว จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเครื่อง Laser Raman Spectroscope พบว่าโครงสร้างผลึกของเพทายมีการเปลี่ยนแปลงจากเพทายก่อนเผาอย่างเห็นได้ชัด คือ ตำแหน่งของ ν_3 มีแนวโน้มลดลงระหว่างการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C ซึ่งเป็นการขยายตัวเพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับรองรับ U^{4+} ที่มีขนาดใหญ่กว่า และที่อุณหภูมิ 900 – 1000 °C ในสภาวะ reduction U^{5+} ถูกรีดิวซ์ (reducing) ไปเป็น U^{4+} เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ Zr^{4+} ส่งผลให้ค่า ν_3 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยาวพันธะมีค่าลดลงจากการเข้าอยู่ของ U^{4+} ที่มีขนาดใหญ่กว่า Zr^{4+} เพราะฉะนั้น การเผาเพทายที่อุณหภูมิ 900 – 1000 °C ในสภาวะ reduction ทำให้เพทายเปลี่ยนสีเป็นสีฟ้าได้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR spectrophotometer และ UV-Vis NIR spectrophotometer

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของตัวอย่างพลอยเพทายสีเหลือง-เขียวจากแหล่งรัตนปุระ ประเทศศรีลังกา ด้วยเครื่อง EDXRF พบว่าพลอยเพทายจากแหล่งดังกล่าวมีปริมาณธาตุกัมมันตรังสีประกอบอยู่ในตัวแร่มากกว่าเพทายจากแหล่งอื่นๆ จึงมี degree of metamictization สูง พลอยเพทายมีการเปลี่ยนสภาพเป็นอสัณฐาน (amorphous) สีที่เกิดขึ้นจึงมีผลได้จากปริมาณธาตุยูเรเนียมที่มีอยู่มาก ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสงของแร่ เนื่องจากโครงสร้างของพลอยถูกทำลายมาก หลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 °C ในสภาวะ reduction ตัวอย่างพลอยเพทายมีการ recrystallization ซึ่งแสดงความเป็นผลึกที่ชัดเจนขึ้นเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Raman spectroscope

5.2 พลอยสปิเนล

จากการทดลองเผาพลอยสปิเนลจากทั้งสองแหล่ง ที่อุณหภูมิ 400, 500 และ 600 °C ในสภาวะ oxidation พบว่าตัวอย่างพลอยสปิเนลหลังการเผาส่วนใหญ่มีความใสสะอาดมากขึ้น แต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจน เนื่องจากโดยปกติในธรรมชาติปกติมักพบสปิเนลในรูป normal spinel แต่หากสปิเนลถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ

สูงกว่า 800 °C โครงสร้างจะเปลี่ยนไปเป็น inverse spinel ได้ (Tuyen, 2005 และ Saeseaw, et al., 2009) แต่ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองเผาพลอยสปิเนลที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 °C สามารถสรุปได้ว่ายังไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างพลอยสปิเนล จึงยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสีจากการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเครื่องมือ EDXRF พลอยสปิเนลโทนสีแดง-ชมพู มีธาตุโครเมียม (Cr) เป็นองค์ประกอบ และในพลอยสปิเนลสีน้ำเงินมีธาตุเหล็ก (Fe) สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การดูดกลืนคลื่นแสงช่วง UV-Visible พบ peaks การดูดกลืนของ Fe^{2+} (372 nm) และ Cr^{3+} (390 และ 540 nm) ส่วนในพลอยสปิเนลสีน้ำเงิน มี peaks ของ Fe^{2+} (372, 381, 455 และ 475 nm) และ Co^{2+} (550, 585 และ 625 nm) เป็นต้น ทั้งนี้ไม่พบความแตกต่างของ UV-Vis spectra ระหว่างพลอยสปิเนลก่อน และหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy จะพบพีคหลักเกิดขึ้น 4 พีค คือ E_g (413 cm^{-1}), A_{1g} (770 cm^{-1}), T_{2g} (312 cm^{-1} และ 664 cm^{-1}) พีคที่สำคัญที่นำมาใช้ในการตรวจสอบความเป็นระเบียบของผลึกจะใช้พีค E_{2g} ที่ตำแหน่ง 413 cm^{-1} โดยปกติพีคดังกล่าวจะมีค่าความกว้างสุดของพีคที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของพีค (Full width at half maximum; FWHM) อยู่ในช่วง 7-8 cm^{-1} ซึ่งหากมีค่ามากกว่านี้มีแนวโน้มว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่โครงสร้างแบบ inverse spinel (Tuyen, 2005 และ Saeseaw, et al., 2009) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้พบว่าโครงสร้างของสปิเนลยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น inverse spinel