เพทายและการปรับปรุงคุณภาพความร้อน
Zircon and Its Heat Treatment

ภูวดล วรรธนะชัยแสง*
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี
Bhuwadol Wanthanachaisaeng*
Faculty of Gems, Burapha University Chanthaburi Campus

บทคัดย่อ

เพทายเป็นอัญมณีที่นิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ สามารถพบได้ในหลายประเทศทั่วโลกและมีหลากหลายสี แต่ที่ได้รับความนิยมที่สุดคือเพทายจากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา ซึ่งมีสีน้ำตาลอมแดง การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนจะสามารถเปลี่ยนจากสีน้ำตาลอมแดงไปเป็นสีฟ้าในสภาวะการเผาแบบไร้ออกซิเจน

คำสำคัญ : เพทาย การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน รัตนคีรี

Abstract

Zircon is an important gem in the jewelry market. It can be found in many countries. There are also various colors from many origins. The famous origin is the Ratanakiri region in Cambodia. The original unheated color is reddish brown. The heat treatment method can change the reddish brown color to nice blue color in the reduction condition.

Keywords : zircon, heat treatment, Ratanakiri

***E-mail: bhuwadol@yahoo.com**

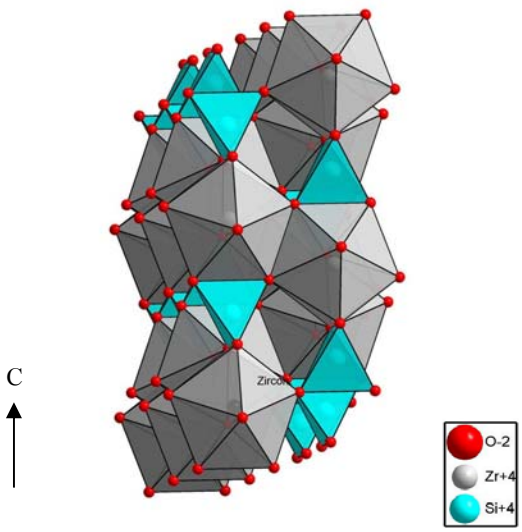
บทนำ

เพทาย (Zircon; ZrSiO4) เป็นชื่อที่ได้จากภาษาอาราบิค “Zargoon” ซึ่งหมายถึง สีทอง โดยคำที่ได้อาจมาจากสีน้ำตาลอมแดงของเพทายที่สามารถพบได้ในแหล่งเพทายทั่วไป แต่นอกจากสีดังกล่าวแล้ว ยังสามารถพบเพทายสีอื่นๆได้อีกหลากหลายสี เช่น ใสไม่มีสี สีเหลือง สีส้ม สีเขียว และสีฟ้า เป็นต้น (ภาพที่ 1) จึงนิยมนำเพทายมาใช้เป็นอัญมณีอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ นอกจากนี้เพทายยังเป็นแร่ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผงขัด อุตสาหกรรมเซรามิค และอุตสาหกรรมนิวเคลียร์

ภาพที่ 1 ความหลากหลายสีของเพทาย (Photo by Bhuwadol Wanthanachaisaeng)

ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับปัจจุบัน เพทายเป็นพลอยที่ได้รับความนิยมของผู้บริโภคเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีประกายและความวาวที่โดดเด่น และยังมีสีให้เลือกหลากหลายสี สีที่เป็นที่นิยมที่สุดคือสีฟ้า ซึ่งเป็นสีที่ไม่พบในธรรมชาติ แต่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพของเพทายสีน้ำตาลอมแดงด้วยความร้อน แหล่งเพทายที่สามารถนำมาใช้เป็นอัญมณีที่สำคัญ เช่น ประเทศไทย กัมพูชา เวียดนาม ศรีลังกา พม่า และแทนซาเนีย โดยเฉพาะแหล่งเพทายจากรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา เป็นแหล่งที่มีประวัติการค้นพบอันยาวนานกว่าร้อยปี (Walter *et al*., 2009) และสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน ทำให้ได้สีฟ้าที่สวยงาม โดยเพทายมีลักษณะทั่วไป ดังนี้

โครงสร้างของเพทาย (ภาพที่ 2) เป็นแบบ nesosilicate (orthosilicate) ในระบบผลึกเตตระโกนอล (tetragonal) มีอัตราส่วนระหว่างแกน c ต่อแกน a ที่ 0.906 ภายในโครงสร้างประกอบด้วย ZrO_8 โพลีฮีดรา (polyhedral) เรียงตัวตามแนวแกน c และล้อมรอบด้วยอินดิเพนเด้น (independent) SiO_4 เตตระฮีดรอล (tetrahedral) ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของแร่ในตระกูล nesosilicate แคตไอออนหลักของเพทายคือ Zr^{4+} เช่นเดียวกับในสูตรเคมีของแร่ มีขนาด 0.84 Å มักพบธาตุที่มีขนาดใกล้เคียงกันแทนที่ในตำแหน่งของ ZrO_8 polyhedra เช่น Hf^{4+} ซึ่งมีขนาด 0.83 Å ใกล้เคียงกับ Zr^{4+} ทำให้สามารถแทนที่ในโครงสร้างตำแหน่ง Zr^{4+} ได้ประมาณ 0.5-4% นอกจากนี้ ยังสามารถพบธาตุกัมมันตรังสีอื่นๆ เช่น ยูเรเนียม (U) และทอเรียม (Th) ซึ่งมีขนาดประมาณ 1.00 Å และ 1.05Å ตามลำดับ (Harley and Kelly, 2007) ใกล้เคียงกับ Zr^{4+} ทำให้ธาตุกัมมันตรังสีดังกล่าวสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Zr^{4+} ในโครงสร้างได้เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2 โครงสร้างผลึกของเพทายแสดงการเรียงตัวของ ZrO_8 polyhedra และ independent SiO_4 tetrahedron

ธาตุกัมมันตรังสีที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างของเพทายสามารถแผ่รังสีได้ตลอดเวลา (self-irradiation) ในภาพของอนุภาคอัลฟา (alpha) เบต้า (beta) และแกมมา (gamma) พลังงานที่แผ่ออกมาส่งผลให้โครงสร้างเพทายถูกทำลาย สลายตัวในสภาพของ ZrO_2 และ SiO_2 กระบวนการการทำลายโครงสร้างผลึกด้วยการแผ่รังสีนี้เรียกว่า กระบวนการ “metamictization” และเรียกเพทายที่ถูกทำลายโครงสร้างผลึกว่า “metamict zircon” (Webster, 1994 และ Zhang *et al*., 2000) กระบวนการ metamictization ในเพทายส่งผลกระทบโดยตรงทั้งทางด้านกายภาพและเคมีของแร่ เช่นการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีหักเห (refractive index) ทำให้

เพทายในธรรมชาติมีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วงกว้าง มีค่าตั้งแต่ 1.78 ถึง 2.01 สอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) มีค่าแปรผันตามกันอยู่ในช่วง 3.90 ถึง 4.73 โดยค่าที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับระดับความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่เกิดจากกระบวนการ metamictization ทำให้สามารถแบ่งระดับการแปรสภาพของเพทายได้ 3 ระดับ คือ low type (amorphous) ซึ่งมีความเป็นผลึกต่ำ มีสภาพเป็นอสัณฐาน intermediate type มีการถูกทำลายโครงสร้างปานกลาง และ high type (crystalline) มีความเป็นผลึกสูง ค่าดัชนีหักเหและค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับความเป็นผลึกของเพทาย และจะมีค่าต่ำเมื่อผลึกถูกแปรสภาพเป็นอสัณฐาน แหล่งกำเนิดของเพทายแต่ละแหล่งจะมีระดับการแปรสภาพของผลึกที่แตกต่างกัน เช่น เพทายจากแหล่งรัตนคีรี เป็นเพทายที่มีความเป็นผลึกสูง ในขณะที่เพทายจากแหล่งรัตนปุระ มีความเป็นผลึกต่ำ ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่นปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีที่เป็นองค์ประกอบ อายุของแร่ และสภาพทางธรณีวิทยาของหินต้นกำเนิด

เพทายในแต่ละแหล่งจะมีองค์ประกอบของธาตุร่องรอย (trace elements) ที่แตกต่างกัน ธาตุร่องรอยที่เป็นกัมมันตภาพรังสีที่สำคัญคือ ยูเรเนียมและทอเรียม สามารถพบได้มากในเพทาย ทั้งนี้ในแต่ละแหล่งจะมีปริมาณที่แตกต่างกัน แหล่งที่มีปริมาณธาตุกัมมันตภาพรังสีสูง จะส่งผลให้มีการแผ่รังสีและทำลายโครงสร้างของเพทายสูง ทำให้มีการทำลายโครงสร้างผลึกเป็นอสัณฐาน นอกจากนี้ยังทำให้ค่าดัชนีหักเห ค่าความถ่วงจำเพาะลดลง และอาจมีผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีได้อีกด้วย เช่น เพทายอาจเปลี่ยนจากสีใสไม่มีสีเป็นสีน้ำตาลแดง สีชมพู หรือสีเขียว โดยมีสาเหตุจากธาตุกัมมันตรังสี

นอกจากนี้ อายุของแร่เพทายมีผลกับระดับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเช่นเดียวกัน เนื่องจากเพทายมีองค์ประกอบของธาตุกัมมันตรังสีไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิด การที่แร่เพทายมีอายุมากย่อมทำให้มีการแผ่กัมมันตภาพรังสีของธาตุกัมมันตรังสีเป็นเวลานาน ส่งผลให้มีโอกาสในการถูกทำลายโครงสร้างได้มากกว่าแร่ที่มีอายุน้อยกว่า จึงมีโอกาสพบเพทายชนิด low type มากกว่าในแหล่งดังกล่าว

การเปลี่ยนแปลงของสภาพทางธรณีวิทยาของหินต้นกำเนิดมักจะมีความสัมพันธ์กับความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่มีการเปลี่ยนสภาพต่างๆ ทางธรณีวิทยาที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก โดยความร้อนจะส่งผลกับเพทายที่อยู่ในบริเวณที่มีการแปรสภาพทางธรณีวิทยาในแง่ของความร้อนที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของโครงสร้าง ทำให้เพทายมีโอกาสเกิดการเรียงตัวของโครงสร้างที่ถูกเปลี่ยนแปลงโดยกระบวนการ metamictization เปรียบเสมือนการตกผลึกใหม่ของแร่เพทาย ดังนั้น เพทายในบริเวณที่มีอายุทางธรณีวิทยามาก จึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่ผิดกับความเป็นจริงได้ ดังนั้นจึงพึงระวังในการใช้เพทายในการวิเคราะห์หาอายุทางธรณีวิทยาที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างทางธรณีวิทยาสูง

จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุกัมมันตรังสีในเพทายจากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา มีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในช่วง 30-300 ppm. ซึ่งถือว่ามีปริมาณน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณยูเรเนียมในเพทายจากแหล่งรัตนปุระ ประเทศศรีลังกา ซึ่งมีปริมาณยูเรเนียมอยู่ในช่วง 2000-10000 ppm. ส่งผลให้เพทายจากแหล่งรัตนคีรียังคงมีความเป็นผลึกสูงแต่เพทายจากแหล่งรัตนปุระมีความเป็นผลึกต่ำ (ภูวดล วรรธนะชัยแสง และคณะ 2553)

ลักษณะที่ปรากฏของเพทาย

- โปร่งใส
- ใสไม่มีสี สีน้ำตาลแดง สีส้ม สีแดง สีชมพูอมม่วง สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน
- ปรากฏการณ์ทางแสง ตาแมว (Chatoyancy)

ชนิดและชื่อทางการค้า

- High และ intermediate type: โปร่งใส ใสไม่มีสี สีเหลืองถึงสีเหลืองอมเขียว และสีเขียวอมน้ำตาล
- Low type (metamict type): สีน้ำตาลถึงสีเขียวอมเหลือง โปร่งใส มีลักษณะของเนื้อพลอยที่มีความขุ่น (cloudy) พบในเพทายสีเขียวจากรัตนปุระ ประเทศศรีลังกา
- Hyacinth หรือ Jargon: สีเหลืองอ่อนถึงใสไม่มีสี พบในเพทายจากประเทศศรีลังกา
- Sparklite: เพทายใสไม่มีสี
- Starlite และ Stremlite: เพทายสีฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่ได้จากการเผา

การวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติต่างๆ

ลักษณะทางแสง (Optical character): Anisotropic (Tetragonal system) แบบ Uniaxial (+) มักแสดงปรากฏการณ์ doubling ซึ่งเกิดจากการเดินทางของแสงผ่านเนื้อพลอยในลักษณะ double refraction ในเพทายชนิด high type แต่หากเป็นชนิด low type จะมีภาพทางแสงที่เปลี่ยนไป อาจยังคงสภาพของผลึกที่แสดงภาพทางแสงของระบบผลึกแบบ Tetragonal อยู่ หรืออาจแปรสภาพไปจากการเสียสภาพของโครงสร้างผลึกเนื่องจากธาตุกัมมตรังสี ทำให้โครงสร้างผลึกอยู่ในสภาพอสัณฐาน และ

แสดงภาพทางแสงเป็นแบบ single refraction (SR) หรืออาจเป็น anomalous double refraction (ADR) ก็เป็นไปได้ และจะไม่แสดงปรากฏการณ์ doubling

แหล่งแร่เพทายจากจังหวัดรัตนคีรี

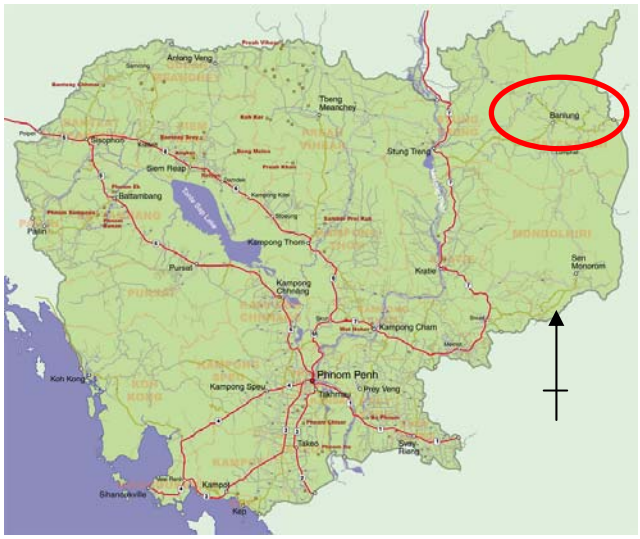
จังหวัดรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา ตั้งอยู่ทางฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศกัมพูชา (ภาพที่ 3) ชื่อ “รัตนคีรี” เป็นภาษาสันสกฤต มีความหมายบ่งบอกถึงการพบอัญมณีในบริเวณที่เป็นภูเขา โดยอ้างอิงถึงการศึกษาของ Saurin (1957) ได้กล่าวถึงการทำเหมืองเพทายในช่วงกลางทศวรรษที่ 1930 ซึ่งบ่งบอกถึงมีการทำเหมืองเพทายและเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญที่ป้อนสู่ตลาดอัญมณีและเครื่องประดับของโลก จากการสอบถามคนทำธุรกิจเพทายในจังหวัดรัตนคีรี (personal communication) ได้ข้อมูลว่ามีประวัติการทำเหมืองเพทายตั้งแต่ยุค French Colonial ในประเทศกัมพูชา ซึ่งจะหมายถึงช่วงปี ค.ศ. 1904 ถึง 1930 ซึ่งตรงกับการกล่าวถึงของ Saurin (1957) ในปัจจุบันอาชีพของประชาชนในจังหวัดรัตนคีรี นอกจากการทำเหมืองเพทายแล้ว จะเป็นการปลูกต้นมะม่วงหิมพานต์ และการทำสวนยางเป็นหลัก เนื่องจากผลผลิตทางการเกษตรมีราคาดี ทำให้การทำเหมืองมีปริมาณที่ลดลงอย่างมาก ส่งผลต่อราคาของเพทายปัจจุบันขยับตัวสูงขึ้น ธรณีวิทยาของจังหวัดรัตนคีรีประกอบด้วยหินหลายชนิดอายุในช่วงมหายุค Proterozoic ถึง Paleozoic ซึ่งหินชุดดังกล่าวจะเป็นหินดาล โดยจะมีหินภูเขาไฟซึ่งมีอายุอยู่ในช่วง Pliocene ถึง Pleistocene ปิดทับ สามารถแบ่งหินภูเขาไฟออกได้เป็น 3 ชุด จากอายุน้อยไปมากตามลำดับดังนี้

1. ชุดหินที่มีอายุอยู่ในช่วง Upper Pleistocence ถึง Holocene ประกอบไปด้วยหิน basalt และ scoria ที่แสดงลักษณะการไหลของลาวา ไม่พบเพทายในหินชุดนี้

2. ชุดหินที่มีอายุในช่วง Middle ถึง Upper Pleistocence ประกอบไปด้วยหิน basalt และ scoria และจะพบภูเขายอดตัดที่เกิดจากภูเขาไฟจากหินชุดนี้ได้ ไม่พบเพทายในหินชุดนี้

3. ชุดหินที่มีอายุอยู่ในช่วง Lower ถึง Middle Pleistocence ประกอบไปด้วยหิน massive และ columnar basalt ซึ่งมีความเป็น alkaline สูง สามารถพบเพทายเป็น Xenocryst ในหินชุดนี้

อำเภอบานลุง จังหวัดรัตนคีรี เป็นอำเภอเล็กๆ ที่ตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือของกรุงพนมเปญ ห่างจากชายแดนประเทศเวียตนามประมาณ 40 กิโลเมตร มีประชากรอยู่จำนวน 16,999 คน (ข้อมูลปี ค.ศ. 1998) มีถนนราดยางอยู่เพียงในตัวเมือง



ภาพที่ 3 แผนที่เส้นทางถนนจากกรุงพนมเปญไป เมืองบานลุง (Banlung) จังหวัดรัตนคีรี (แผนที่ประเทศกัมพูชา เข้าถึงเมื่อ 10 สิงหาคม 2555 จากเวป http://www.ravyangkortours.com/pages.php?profile_id=15)

โดยรอบเป็นถนนลูกรังบดอัด สามารถพบร้านค้าพลอยและร้านทองได้ในตลาดกลางเมือง ภายในร้านค้าพลอยจำหน่ายพลอยเพทายเป็นหลัก ประกอบด้วยสีฟ้า (blue zircon) เหลือง (yellow zircon) และใสไม่มีสี (colorless zircon) มีขนาดตั้งแต่ต่ำกว่า 1 กะรัต จนถึงมากกว่า 20 กะรัต (ภาพที่ 4) ซึ่งเป็นพลอยที่สามารถขุดพบในพื้นที่โดยรอบอำเภอบานลุง นอกจากนี้ยังมีการจำหน่ายพลอยชนิดอื่น เช่น อะเนทิสต์ (amethyst) ซิทริน (citrine) โทพาซ (topaz) และแก้วธรรมชาติ (natural glass) ซึ่งผู้ค้าพลอยแจ้งว่าเป็นพลอยที่พบในพื้นที่นี้เช่นเดียวกัน โดยจะมีเหมืองอยู่ทางตอนใต้ของอำเภอบานลุง

การทำเหมืองเพทาย

จากลักษณะทางธรณีวิทยาที่กล่าวไปแล้วข้างต้น พื้นที่โดยรอบอำเภอบานลุงเป็นเขตภูเขาไฟที่ประกอบไปด้วยหินบะซอลต์ โดยส่วนใหญ่จะเป็นหิน Tholeiitic basalt ซึ่งไม่พบเพทายในหินชนิดนี้ แต่มีบางพื้นที่จะพบหิน Alkaline basalt ซึ่งมีอายุแก่กว่า สามารถพบพลอยเพทายและแร่ชนิดอื่นเป็น xenocryst เช่น เพทาย ไพลินและมุกดาหาร เป็นต้น

ในอดีตมีการทำเหมืองในจังหวัดรัตนคีรีเป็นจำนวนมาก มีพื้นที่ที่สามารถขุดพบเพทายหลายพื้นที่รอบอำเภอบานลุง การทำเหมืองเพทายนี้ มีทั้งการขออนุญาตทำเหมืองที่ถูกกฎหมาย และการลักลอบทำโดยชาวบ้านในพื้นที่ พ่อค้าพลอยที่มีฐานะ

ภาพที่ 4 ร้านค้าพลอยบริเวณตลาดสดอำเภอบานลุง

บางคนจะซื้อที่ดินในบริเวณที่มีเพทายและอนุญาตให้คนที่ต้องการเสี่ยงโชคในการขุดหาเพทาย สามารถเข้าขุดในพื้นที่ดินของตนได้ แต่มีเงื่อนไขว่าต้องขายเพทายที่ขุดได้ให้กับเจ้าของที่ดินเท่านั้น การทำเหมืองของชาวกัมพูชาส่วนใหญ่จะใช้เครื่องมือพื้นฐานทั่วไป ไม่มีเครื่องจักรทุ่นแรงมาใช้ในการทำงาน มีเพียงนักลงทุนของชาวต่างชาติที่มีการขอสัมปทานพื้นที่นอกเขตอำเภอบานลุงในการทำเหมืองขนาดใหญ่ เช่น นักลงทุนชาวเกาหลีใต้ ได้เข้ามาขออนุญาตทำเหมืองอย่างถูกกฎหมาย และใช้เครื่องจักรเข้าช่วยในการทำเหมืองเพื่อให้ได้ผลผลิตที่คุ้มค่า แต่ปัจจุบันได้ยุติการทำเหมืองในบริเวณดังกล่าวแล้ว (ภาพที่ 5)

นอกจากการทำเหมืองขนาดใหญ่แล้ว มีการทำเหมืองขนาดเล็กกระจายเป็นหย่อมๆ โดยรอบอำเภอบานลุงในรัศมีไม่เกิน 25 กิโลเมตร ซึ่งเป็นเขตที่เป็นหินภูเขาไฟที่ให้พลอย ในปัจจุบันยังคงมีการทำเหมืองอยู่หลายแห่ง เช่น ในบริเวณบ่อแก้ว (Bo Keo) ซึ่งอยู่ห่างจากอำเภอบานลุงทางทิศตะวันออกประมาณ 23 กิโลเมตร ในบริเวณบ่อลอย (Bo Loy) อยู่ห่างจากอำเภอบานลุงทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือประมาณ 25 กิโลเมตร และในบริเวณไบซร็อค (Bei Srok) อยู่ห่างจากอำเภอบานลุงทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ประมาณ 17 กิโลเมตร เหมืองเหล่านี้ดำเนินการโดยชาวบ้านที่อาศัยในละแวกนั้นและบางส่วนเป็นคนจากพื้นที่อื่นเข้ามาเสี่ยงโชค เช่น คนงานเหมืองจากเมืองไพลิน การทำเหมืองขนาดเล็กในบริเวณรอบอำเภอบานลุงสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ การทำเหมืองเปียกและการทำเหมืองแห้ง โดยจะมีความแตกต่างกันคือ การทำเหมืองแบบเปียกจะเป็นการขุดหาเพทายบริเวณที่ใกล้แหล่งน้ำ เนื่องจากหินให้แร่ในบริเวณดังกล่าวมีการผุกร่อนแต่ยังมีบางส่วนที่เป็นก้อนกรวด จึงต้องมีการร่อนแร่โดยใช้น้ำช่วยในการคัดแยกเพทายออกจากตะกอนอื่นๆ ปัจจุบันไม่พบการทำเหมืองในภาพแบบนี้มากนัก เพราะต้องเป็นแหล่งที่อยู่ใกล้ทางน้ำ และต้องลงทุนใช้เครื่องปั๊มน้ำในการทำเหมือง (ภาพที่ 6) ส่วนการทำเหมืองแห้งจะทำในบริเวณที่หินให้แร่มีการผุกร่อนไปโดยสมบูรณ์ หินดังกล่าวมีการผุเป็นดิน และแร่เพทายซึ่งมีความคงทนกว่ายังคงสภาพของผลึกอยู่ในบริเวณนั้นๆ ทำให้สามารถคัดเพทายออกจากดินได้โดยง่าย (ภาพที่ 7)

ภาพที่ 5 บริเวณที่มีการทำเหมืองขนาดใหญ่ในอดีตและเครื่องมือสำหรับร่อนแร่

การทำเหมืองของทั้งสองลักษณะจะเป็นการขุดโดยใช้แรงคน ไม่มีการใช้เครื่องมือหนัก โดยคนทำเหมืองจะหาพื้นที่ที่มีศักยภาพ หลังจากนั้นจะเริ่มขุดหาเพทายแบบเป็นทีม โดยแต่ละทีมจะมีผู้ร่วมงานอยู่อย่างน้อย 3 คน แบ่งเป็นคนขุด คนลำเลียงดินที่ได้จากการขุดออกจากหลุม และคนร่อนเพทาย จนได้เป็นผลึกเพทายเพื่อนำไปจำหน่ายต่อไป (ภาพที่ 8) ความลึกของชั้นที่พบเพทายจะขึ้นอยู่กับบริเวณที่ทำเหมือง บางบริเวณขุดลงไปลึกประมาณ 5 เมตร ก็สามารถพบชั้นที่มีเพทาย แต่บางบริเวณต้องขุดลึกถึง 15 เมตร ลักษณะของหลุมที่ขุดจะเป็นท่อกลมและจะเซาะร่องที่ผนังของหลุมเพื่อใช้ข้อศอกในการปีนป่ายขึ้นลงหลุม เมื่อขุดไปถึงชั้นที่พบเพทายจะเปลี่ยนเป็นการขุดในแนวราบตามแนวชั้นที่พบ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการถล่มของหลุมสูง

ภาพที่ 6 การทำเหมืองแบบเปียก มีการร่อนแร่โดยใช้น้ำช่วยในการคัดแยกเพทายออกจากตะกอนอื่นๆ

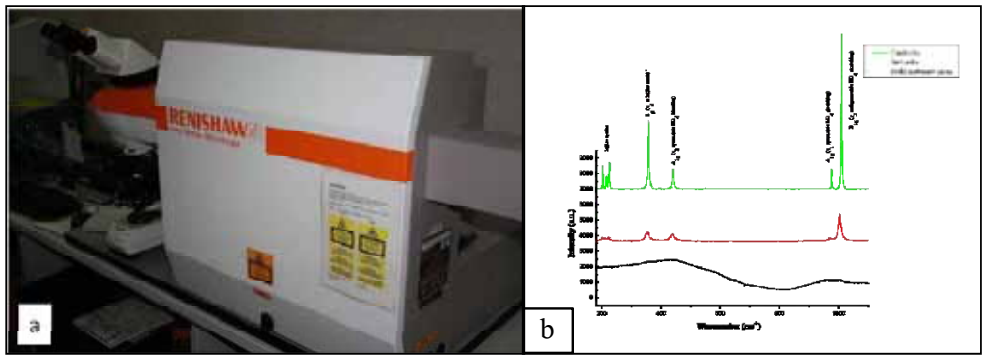
ภาพที่ 7 การทำเหมืองแบบแห้ง โดยการแยกเพทายออกจากดินซึ่งเกิดจากการผุของชั้นหินให้พลอย

ภาพที่ 8 ขั้นตอนการทำเหมืองเพทายในจังหวัดรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา

การเผาพลอยเพทาย

ส่วนใหญ่เพทายที่คนทำเหมืองขุดได้จะมีสีน้ำตาลอมแดง มีโทนสีตั้งแต่สีเข้มจนถึงสีอ่อน เมื่อได้ปริมาณเพทายจำนวนหนึ่งก็จะทำการขายให้กับพ่อค้าคนกลางซึ่งมักจะเข้าไปซื้อถึงเหมือง มีการตกลงราคากันตามคุณภาพและขนาดของเพทาย หลังจากนั้นพ่อค้าคนกลางก็จะนำเพทายมาขายให้กับพ่อค้าในเมืองบานลุง ซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงคุณภาพโดยการเผาเพื่อนำไปเจียระไนและขายต่อไป

โดยทั่วไปเพทายที่นิยมนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาจะเป็นเพทายจากแหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา ซึ่งเป็นเพทายที่มีสีน้ำตาลอมแดง สีดังกล่าวเกิดจากความบกพร่องทางโครงสร้างภายในของเพทาย เนื่องจากมีธาตุกัมมันตรังสีเป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้เกิดการแผ่รังสีในภาพของพลังงานภาพแบบต่างๆ ทางนิวเคลียร์ เช่น อัลฟา เบต้า และแกมมา พลังงานที่มีผลทำให้เกิดสีน้ำตาลแดงขึ้นในเพทายเป็นหลักคือ อนุภาคอัลฟา ซึ่งจะมีมวลที่มีผลต่อการทำลายโครงสร้างมากที่สุด โดยจะพบว่าในบริเวณใดที่มีปริมาณของธาตุกัมมันตรังสีมาก จะมีการปล่อยอนุภาคอัลฟา (alpha particles) มาก ทำให้โครงสร้างในบริเวณนั้นๆ ถูกทำลายสูง การเกิดการบกพร่องของโครงสร้าง (defect) สามารถวิเคราะห์ระดับของการถูกทำลายของโครงสร้างได้ด้วยเครื่อง Raman spectrometer (ภาพที่ 9a) ซึ่งใช้ค่า Full Width at Half Maximum (FWHM) ในการวิเคราะห์ระดับการถูกทำลาย



ภาพที่ 9 (a) เครื่อง Raman spectroscopy ใช้ในการวิเคราะห์หาระดับของกระบวนการ metamictization โดยสังเกตุจากความกว้างของพีค (b) สเปกตรัมแสดงความกว้างของพีคที่แตกต่างกันของเพทายที่มีความเป็นผลึกจากมากไปน้อย จากแหล่งกัมพูชา ศรีลังกา และเพทายที่อยู่ในสภาพอสัณฐาน

ภาพที่ 10 เพทายก่อนเผาและเพทายหลังเผาแสดงการเปลี่ยนสีของเพทายหลังปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนในสภาวะไร้ออกซิเจน

ของโครงสร้าง (Nasdala *et al*., 1995; Zhang *et al*., 2000; Geisler & Pidgeon, 2002; Titorenkova *et al*., 2006) หากมีการทำลายของโครงสร้างสูง ความกว้างของพีคในสเปกตรัมจะมีความกว้างมากกว่าในเพทายที่มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากการจับตัวกันระหว่างพันธะไม่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของความเป็นผลึกที่มีการจับตัวของพันธะที่สม่ำเสมอ (ภาพที่ 9b) ความบกพร่องนี้จะส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่เปลี่ยนไป และส่วนใหญ่จะให้สีน้ำตาลแดง ซึ่งจะมีโทนสีเข้มหรืออ่อนตามความรุนแรงของโครงสร้างที่ถูกทำลาย

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนโดยการเผา เป็นการให้ความร้อนซึ่งมีผลทำให้เกิดการเรียงตัวของโครงสร้างภายในเพทายใหม่ (recrystallization) โดยจากการทดลองพบว่า เพทายที่มีสีน้ำตาลอมแดง เมื่อถูกความร้อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เพทายจะเปลี่ยนสีเป็นสีใสไม่มีสี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความรุนแรงของโครงสร้างที่ถูกทำลาย และเวลาที่ให้ความร้อน การเปลี่ยนสีของเพทายในลักษณะนี้ เกิดจากการที่ความร้อนที่ให้กับเพทายนั้นเปรียบเสมือนการให้พลังงานกับโครงสร้างของเพทายที่มีความบกพร่องทางโครงสร้างที่เกิดกัมมันตภาพรังสีซึ่ง ความบกพร่องเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะรับพลังงานความร้อนและเกิดการตกผลึกใหม่ให้เข้าสู่ผลึกที่สมบูรณ์ ส่งผลให้การดูดกลืนแสงซึ่งเกิดจากโครงสร้างที่บกพร่องลดน้อยลงจนถึงไม่มีการดูดกลืนแสงเลย จึงเป็นสาเหตุให้เห็นเพทายที่อบด้วยความร้อนต่ำเปลี่ยนสีเป็นใสไม่มีสีได้

ส่วนการเผาเพทายด้วยความร้อนสูง ประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสโดยส่วนใหญ่จะเป็นการเผาในสภาวะรีดักชั่น ซึ่งคือการเผาแบบไร้ออกซิเจน มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนสีของเพทายจากสีน้ำตาลอมแดงไปเป็นสีฟ้า หากเผาในสภาวะบรรยากาศปกติ จะได้สีเหลืองอ่อนจนถึงใสไม่มีสี ดังนั้นการเปลี่ยนสีที่ได้จากการเผาเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเพียงอย่างเดียว แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชั่นของธาตุให้สีภายในแร่เพทายอีกด้วย (ภาพที่ 10)

นอกจากนี้การเผาเพทายต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้ไม่เกิน 1400 องศาเซลเซียส เพราะสีที่ได้จะเปลี่ยนไปเนื่องจากโดยปกติในการเผาเพทายจะใช้ถ้วยเบ้าซึ่งเป็นอลูมิเนียมออกไซด์เป็นภาชนะในการบรรจุเพทายเพื่อเผาในเตาเผา แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 1400 องศาเซลเซียสนั้น เพทายจะมีการสลายตัวเปลี่ยนสภาพเป็น monoclinic ZrO_2 และ amorphous SiO_2 เมื่อสัมผัสกับอลูมิเนียมออกไซด์ ณ บริเวณที่เป็นผิวสัมผัสระหว่างเพทายกับเบ้า (Váczi *et al*., 2009) เมื่อนำออกจากเตาเผา เพทายจะเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นซึ่งไม่เป็นการเพิ่มคุณภาพของเพทายที่ต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินในการเดินทางและการทำวิจัย และทีมงานที่ร่วมเดินทาง อาจารย์บุญทวี ศรีประเสริฐ Mr. Mark H. Smith Dr.Walter Balmer และ Mr. Votha Un

เอกสารอ้างอิง

ภูวดล วรรธนะชัยแสง, นันทรัตน์ บุนนาค, ปีติชา ภัทรวารินทร์, ปภาวรินท์ อุ่นอ่อน, วิสุทธิ์ พิสุทธอานนท์, จักรพันธ์ สุทธิรัตน์. (2553). *กระบวนการ Metamictization และการเปลี่ยนสีด้วยความร้อนของเพทายจากแหล่งจันทบุรี กาญจนบุรี กัมพูชา และศรีลังกา*. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) 147 หน้า

Geisler, T. & Pidgeon, R.T. (2002). Raman scattering from metamict zircon: comments on "Metamictisation of natural zircon: accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage" by Nasdala et al. 2001 (Contribution to Mineralogy and Petrology 141: 125-144). *Contribution to Mineralogy and Petrology, 143*, 750-755.

Harley, S.L. & Kelly, N.M. (2007). Zircon tiny but timely. *Elements, An international Magazine of Mineralogy, Geochemisty, and Petrology, 3*(1), 13-18.

Nasdala, L., Irmer, G., & Wolf, D. (1995). The degree of Metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study. *European Journal of Mineralogy, 7*, 471-478.

Saurin, E. (1957). Some gem occurrences in Cambodia. *Rocks and Minerals Magazine*, 397.

Titorenkova, R., Mihailova, B., & Konstantinov, L. (2006). Raman spectroscopic study of variably recrystallized metamict zircon from amphibolite-facies metagranites, Serbo-Macedonian Massif, Bulgaria. *The Canadian Mineralogist, 44*, 1357-1366.

Váczi, T., Nasdala L., Wirth, R,, Mehofer, M., Libowitzky, E., & Häger, T. (2009). On the breakdown of zircon upon "dry" thermal annealing. *Mineralogy and Petrology, 97*, 129-138.

Walter, A., Smith, M.H., Sriprasert, B., & Wanthanachaisaeng, B. (2009). Ratanakiri, the legendary zircon province of Cambodia. *3rd European Gemmological Symposium*, Bern June 4th to 7th.

Webster, R. (1994). *Gems: their sources, descriptions, and identification*: 5th ed. Revised by Peter G. Read. Nutterworth-Heinemann, Oxford. 1026.

Zhang, M., Salje, E.K.H., Farnan, I., Graeme-Barber, A., Daniel, P., Ewing, R.C., Clark, A.M., & Leroux, H. (2000). Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. *Journal of Physics: Condensed Matter, 12*(8), 1915-1925.