



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาผลาญเนื้ออ่อน
ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

โดย

รศ.ดร.สุชาติพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์ และคณะ

กันยายน 2547

โครงการการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาผลาญเนื้ออ่อน
ตามแผนปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม ระยะที่ 2

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร.สุรชาติพิทย์ สิริไพศาลพัฒน์
2. น.ส.ประไพพิมพ์ หาญมั่งธรรม
3. น.ส.พณนา กิติไพศาลนนท์
4. น.ส.ณัฐกมล พึ่งสำราญ
5. น.ส.ธันววรรณ ดั่งทองอยู่
6. นงศ.พัศตร์วิภา เชาว์พานิช
7. น.ส.จุฑามณี โกวิทยา

ห้องปฏิบัติการผลึกศาสตร์และอัญมณีวิทยา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ร่วมกับสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม

ชุดโครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

Executive Summary

ชื่อโครงการวิจัย “การพัฒนาเทคโนโลยีของการเผาพลอยเนื้ออ่อน”

หัวหน้าโครงการ รศ.ดร.สุรชาติพิทย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์

สถานที่ทำวิจัย ห้องปฏิบัติการพลศาสตร์และอณูเคมีวิทยา ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพของพลอยเนื้ออ่อนซึ่งในที่นี้ หมายถึงพลอยกึ่งมีค่า (semiprecious stone) พลอยในกลุ่มนี้มีความแข็งน้อยกว่าพลอยคอร์ันดัม (<9 Mohr scale) ได้แก่พลอยตระกูลควอตซ์, พลอยตระกูลเบริล เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเผาพลอยโดยมีตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ สภาพบรรยากาศภายในห้องเผา อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาและเวลาที่ใส่เผาที่อุณหภูมิสูงสุดนั้นซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าเวลาแช่พลอย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทดลองเผาพลอยภายใต้สภาวะบรรยากาศในห้องเผา 4 แบบดังนี้

1. แบบ slightly oxidizing เป็นการเผาแบบปกติ ใช้รหัสการเผา A
2. แบบ oxidizing เป็นการเผาโดยผ่านแก๊สออกซิเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้รหัสการเผา O
3. แบบ inert เป็นการเผาโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้รหัสการเผา N
4. แบบ reducing เป็นการเผาที่ไม่มีออกซิเจนแต่มีตัวรีดิวซ์ ใช้รหัสการเผา R

อุณหภูมิที่ทดลองในแต่ละแบบอยู่ในช่วง 300-1200 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของพลอยที่เผาและเวลาแช่พลอยอยู่ในช่วง 0.5-10 ชั่วโมง ในการเผาทุกสภาวะไม่มีการเติมสารใดๆ

ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิดคือ พลอยควอตซ์(quartz) พลอยทัวมาลีน (tourmaline) พลอยโทปาซ(topaz) และพลอยเพทาย(zircon) ตัวอย่างพลอยควอตซ์ ทัวมาลีนและโทปาซได้ซื้อจากร้านค้าทั่วไปจึงทำให้ไม่ทราบแหล่งที่มาและไม่สามารถหาตัวอย่างที่มีสีต่างๆได้ ส่วนพลอยเซอร์คอนที่ใช้ในการทดลองมาจาก 4 แหล่งคือ แหล่งรัตนคีรี(ไปซื้อตัวอย่างพลอยจากจังหวัดตราด) แหล่งน้ำเย็นจังหวัดอุบลราชธานี แหล่งบ่อพลอยจังหวัดกาญจนบุรีและแหล่งอำวน้อยจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ทั้งสามแหล่งได้รับความอนุเคราะห์จากคุณรัก หารรักษาเวท

ในการดำเนินงานทดลองผู้วิจัยได้จัดวิธีการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเผาพลอยทุกตัวแปรดังนี้

1. จัดซื้อพลอยเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ
2. ในกลุ่มพลอยแต่ละชนิดจะทำการคัดแยกพลอยเป็นกลุ่มย่อยตามสีที่ปรากฏ
3. แช่พลอยในสารละลายกรด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวแล้วล้างให้สะอาด

4. จัดพลอยด้านตรงข้าม 2 ด้านให้เรียบ และเปิดหน้าพลอยเพื่อให้แสงผ่านได้
5. แช่พลอยในสารละลาย NaOH แล้งล้างให้สะอาด
6. กำหนดรหัสพลอยโดยใช้ตัวหนังสือตัวแรกของชนิดพลอยตามด้วยตัวเลข 1,2,3.....
7. วัดสมบัติทางแสง ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีหักเห และคุณลักษณะตำหนิภายในของพลอย
8. ทำการวัดสเปกตรัมต่างๆ UV/VIS/NIR , XRF , FTIR , RAMAN
9. นำพลอยไปเผาตามสภาวะที่กำหนดไว้
10. วัดสมบัติทางแสง ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีหักเห และวัดสเปกตรัมต่างๆ
11. สรุปการเปลี่ยนแปลงของพลอยก่อนเผาและหลังเผา

ผลการทดลอง

1. การเผาพลอย

เซอร์คอน

จากการศึกษาการเผาเซอร์คอนครั้งนี้สามารถสรุปผลเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเผาได้ดังนี้

1. การเผาเซอร์คอนให้เกิดสีฟ้า ทำได้ในสภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันเท่านั้น
2. การเผาเซอร์คอนให้ไม่มีสี ทำได้ในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อยและแบบออกซิเดชัน
3. ที่สภาวะการเผาแบบ R1000/300/2 สีเดิมของเซอร์คอนมีผลต่อความเข้มของสีฟ้าที่เกิดขึ้น
4. ที่สภาวะการเผาแบบ R1000/300/2 แหล่งของเซอร์คอนมีผลต่อความเข้มของสีฟ้าที่เกิดขึ้น
5. การเผาเซอร์คอนไม่จำเป็นต้องเผานาน แต่ควรมีการอบ
6. สมบัติทางเคมีภายในของเซอร์คอนมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง แต่สมบัติทางสเปกโตรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดและมีความสัมพันธ์กับการเกิดสีฟ้าของเซอร์คอนซึ่งจะอธิบายในส่วนของ 2
7. เมื่อเผาเซอร์คอนให้ได้สีฟ้าที่สภาวะรีดักชันเพื่อเพิ่มคุณภาพของพลอย พบว่าตำหนิแถบสีที่มีในเนื้อพลอยของเซอร์คอนนั้นหายไป ส่วนตำหนิของผลึกและของเหลวยังคงมีปรากฏอยู่หลังการเผาที่สภาวะนี้ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่ามีรอยขรุขระที่ผิว และใกล้ ๆ ที่ผิวนั้นหลอมรวมกันทำให้เนื้อของพลอยใสและเรียบขึ้นด้วย

ควอทซ์

จากผลการเผาสรุปได้ว่า

1. การเผาไม่ทำให้ควอทซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพ และทางเคมี
2. ตำแหน่งของแถบกว้างในสเปกตรัมดูดกลืนแสงช่วง 500 – 550 nm อาจเป็นตัวชี้ว่าควอทซ์ถูกเผาหรือไม่
3. ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผาควอทซ์

ทัวมาลีน

จากผลการทดลองพบว่า

1. ทัวมาลีนสีชมพู ที่อุณหภูมิสูงสีชมพูจางลง ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผาให้ทัวมาลีนสีชมพูมีสีเข้มขึ้น
2. ทัวมาลีนสีเขียวเข้ม ในสภาวะรีดักชันสีเขียวไม่จางลง แต่ในสภาวะออกซิเดชันสีเขียวจางลง เกิดเทคโนโลยีการเผาเพื่อลดสีเขียวเข้มของทัวมาลีน

โทปาซ

โทปาซที่ใช้ในการทดลองเป็นโทปาซไม่มีสี ผลการเผาทุกสภาวะบรรยากาศทำให้พลอยชมพูและมีรอยแตก ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผา แต่ผลการทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลต่อไปได้

2. การเกิดสีของเซอร์คอน

จากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่าการเกิดสีของเซอร์คอนน่าจะเกิดจากการดูดกลืนแสงของ U (VI) ไอออนที่เป็นผลจากการรีดักชันของ U^{6+}

กิตติกรรมประกาศ

การทำงานวิจัยครั้งนี้ที่สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีนั้นเนื่องจากการให้ความอนุเคราะห์ และการให้ความร่วมมือในหลาย ๆ ด้าน ดิฉันจึงขอขอบคุณ

1. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้
2. ดร.สุรพล ภัทรากร หัวหน้าภาควิชาเคมีที่สนับสนุนให้ทำงานวิจัยครั้งนี้ในภาควิชาเคมี
3. ดร.ไพยม อรัญยานนท์ รศ.สุวิน บุษราคัม และคุณรัก หารรักษาเวช ซึ่งเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำตลอดการวิจัยครั้งนี้
4. ศ.ดร.ทวีป ศิริวิเศษ และคุณสุกกร ลิ้มคุณธรรมโม ที่ช่วยประสานงานในงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี
5. อ.ศิวพร สหวัฒน์ จากภาควิชาฟิสิกส์ ที่ช่วยแนะนำวิธีหาดัชนีหักเห
6. คุณอาภรณ์ บุญมงคล จากโครงการเคมีและวัสดุศาสตร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ช่วยวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค Neutron Activation Analysis
7. คุณสุกักร ม่วงเมือง ที่ช่วยงานด้านธุรการ คุณภัทรี คล้ายใส คุณสุนีย์ พุระหง และคุณอำพล ทัพไชย ที่ช่วยดูแลเตาและเดินหนังสือ

และสุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้ช่วยวิจัยซึ่งเป็นนิสิตปริญญาโทดังรายนามต่อไปนี้ คือ

1. น.ส.พนนา กิติไพศาลนนท์
2. น.ส.ประไพพิมพ์ หาญมั่งธรรม
3. น.ส.ณัฐกมล พึ่งสำราญ
4. น.ส.ธันววรรณ ค้วงทองอยู่
5. น.ส.พัชร์วิภา เชาว์พานิช
6. น.ส.จุฑามณี โกวิทยา

Abstract

The development of color in gemstones depends on the atmosphere in the heating part of the furnace. Brown zircon which was heated under air, inert or oxidizing atmosphere became colorless, while heated under reducing atmosphere became light blue. Gemmological properties, elemental compositions and the XRD powder patterns of unheat-treated and heat-treated zircons revealed that they are zircons with zirconium and silicon as main components. The uranium content was determined by NAA technique. The Raman spectra of unheat-treated and heat-treated zircons gave four important peaks: two stretching vibrations of SiO_4 at $1000 - 1010 \text{ cm}^{-1}$ and $965 - 975 \text{ cm}^{-1}$ and two bending vibrations at $430 - 435 \text{ cm}^{-1}$, and 350 cm^{-1} . The electronic spectra of unheat-treated brown zircons and heat-treated blue zircons showed a broad band at 500 nm and 653 nm respectively. The former band disappeared when the zircons were heat-treated under reducing atmosphere at 1000°C . The latter band may be a result of electronic transition of tetravalent uranium ions in the blue zircons.

The heat treatments of colorless quartz under air, inert, oxidizing and reducing atmosphere caused no change in color except cracking with small orange patches on the surface. All gemmological and chemical properties of unheat-treated and heat-treated quartz were similar as expected. The broad band at 500 – 550 nm of unheat-treated quartz spectra disappeared when quartz was heated.

The heat treatments of pink tourmaline under air, inert and reducing atmosphere caused the pink color of tourmaline lighter. When the temperature was above 600°C the pink tourmaline became colorless. The intensity of weak band at 680 nm decreased as the temperature increased and this band disappeared when pink tourmaline was heated up above 600°C . For dark green tourmaline, the dark color turn lighter tourmaline was heated under oxidizing atmosphere. The heat treatment of colorless topaz under air and inert atmosphere caused no change in color.

การพัฒนาเทคโนโลยีการเผาพลอยเนื้ออ่อน

Development of Heating Technology of Semi-Precious Stones

บทคัดย่อ

การพัฒนาสีของพลอยขึ้นอยู่กับสภาวะบรรยากาศในห้องเผา การเผาพลอยเซอร์คอนในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบออกซิเดชัน ทำให้เซอร์คอนเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นไม่มีสี แต่การเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันเปลี่ยนสีของพลอยเซอร์คอนจากสีน้ำตาลเป็นสีฟ้า สมบัติทางอัญมณี เราดูองค์ประกอบและแบบ XRD พงของเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผา แสดงให้เห็นว่าเป็นเซอร์คอนและมีเซอร์โคเนียมและซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก ปริมาณของยูเรเนียมหาโดยวิธีนิวตรอนแอคติเวชัน ในสเปกตรัมรามานของเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผา มีพีคที่สำคัญ 4 พีค ประกอบด้วย การสั่นแบบยืดของของ SiO_4 2 พีค เกิดที่ $1000\text{-}1010\text{ cm}^{-1}$ และ $965\text{-}975\text{ cm}^{-1}$ และการสั่นแบบงอมุมอีก 2 พีค เกิดที่ $430\text{-}435\text{ cm}^{-1}$ และ 350 cm^{-1} สเปกตรัมอิเล็กโตรนิคของเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผามีแถบกว้างที่ 500 และ 653 nm ตามลำดับ แถบที่ 500 cm^{-1} หายไปเมื่อเซอร์คอนถูกเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันที่ 1000°C และแถบที่ 653 cm^{-1} น่าจะเกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนในไอออนยูเรเนียม (IV)

เมื่อเผาควอตซ์ไม่มีสี ภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศเฉื่อย แบบออกซิเดชันและแบบรีดักชัน ไม่ทำให้ควอตซ์มีสี แต่มีหย่อมสีส้มๆบนผิว สมบัติทางอัญมณีและทางเคมีของควอตซ์ก่อนเผาและหลังเผาเหมือนกันตามที่คาดไว้ แถบกว้างที่ 500-550 nm ในสเปกตรัมอิเล็กโตรนิคหายไปเมื่อควอตซ์ถูกเผา เมื่อเผาทัวมาลีนสีชมพูภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบรีดิวซ์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600°C ทำให้สีชมพูจางลง เมื่อเผาสูงกว่า 600°C ทัวมาลีนสีชมพูกลายเป็นไม่มีสี พีคที่มีความเข้มต่ำที่ 680 nm ในสเปกตรัมอิเล็กโตรนิคของทัวมาลีนสีชมพูหายไปเมื่อเผาที่ 600°C การลดสีเขียวเข้มของทัวมาลีนทำได้โดยการเผาทัวมาลีนภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน การเผาโทปาซไม่มีสีในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศและแบบเฉื่อยไม่มีผลต่อการเกิดสี

สารบัญ

	หน้า
บทนำ	1
ส่วนที่ 1 การเผาผลายถึงมีค่า	3
เซอร์คอน	5
ควอทซ์	58
ทัวมารีน	69
โทปาซ	80
ส่วนที่ 2 การเกิดสีของเซอร์คอน	81
สรุปผลการทดลอง	83
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	
- Neutron Activation Analysis Spectra	85
ภาคผนวก ข.	
- Raman Spectra	93
ภาคผนวก ค.	
- UV/VIS/NIR Spectra	104
ภาคผนวก ง.	
- ตัวอย่างทัวมารีนก่อนเผาและหลังเผา	140

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รหัสการเผาเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีเพื่อหาสภาวะการเผาและเวลาแช่พลอย	8
ตารางที่ 2 รหัสการเผาเซอร์คอนแหล่งน้ำเย็นจังหวัดอุบลราชธานีเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	8
ตารางที่ 3 เซอร์คอนที่นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA	10
ตารางที่ 4 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ อากาศเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	12
ตารางที่ 5 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ เฉื่อยเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	12
ตารางที่ 6 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ ออกซิเดชันเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	13
ตารางที่ 7 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ รีดักชันเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	13
ตารางที่ 8 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งน้ำเย็นหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ รีดักชันเพื่อหาอุณหภูมิการเผา	19
ตารางที่ 9 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ อากาศเพื่อหาเวลาในการแช่พลอย	19
ตารางที่ 10 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ รีดักชันเพื่อหาเวลาแช่พลอย	23
ตารางที่ 11 ผลการเผาพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่มีสีน้ำตาลเข้ม สีน้ำตาลอมแดง และสีน้ำตาลอมเหลืองในสภาวะ R/1000/300/2	23
ตารางที่ 12 เปรียบเทียบผลการเผาเซอร์คอนแบบแยกในแต่ละอุณหภูมิและ แบบต่อเนื่อง	26
ตารางที่ 13 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่ สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ	28
ตารางที่ 14 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะ บรรยากาศแบบออกซิเดชัน	29
ตารางที่ 15 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่ สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย	30

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 16 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่ สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน	31
ตารางที่ 17 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุในพลอยเซอร์คอนจากแหล่งต่างๆ ก่อนเผา	32
ตารางที่ 18 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุที่พบในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผา	33
ตารางที่ 19 ปริมาณธาตุยูเรเนียมในเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผา	33
ตารางที่ 20 พิการามานในสเปกตรัมของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี	39
ตารางที่ 21 ผลของการเผา เซอร์คอนที่อุณหภูมิ 300 – 1200 °C	56
ตารางที่ 22 รหัสการเผาควอทซ์	59
ตารางที่ 23 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ เพื่อหาอุณหภูมิการเผา	60
ตารางที่ 24 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย เพื่อหาอุณหภูมิการเผา	60
ตารางที่ 25 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน เพื่อหาอุณหภูมิการเผา	61
ตารางที่ 26 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในบรรยากาศออกซิไดซ์ เพื่อหาอุณหภูมิการเผา	61
ตารางที่ 27 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุในควอทซ์	62
ตารางที่ 28 รหัสการเผาทัวมาลีนสีชมพู	70
ตารางที่ 29 รหัสการเผาทัวมาลีนสีเขียวเข้ม	70
ตารางที่ 30 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ	72
ตารางที่ 31 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย	72
ตารางที่ 32 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน	72
ตารางที่ 33 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ และแบบเฉื่อยเพื่อหาเวลาแช่พลอย	73
ตารางที่ 34 ลักษณะของพลอยทัวมาลีนสีเขียวเข้มหลังการเผาภายใต้สภาวะ บรรยากาศแบบอากาศ	74
ตารางที่ 35 ลักษณะของพลอยทัวมาลีนสีเขียวเข้มหลังการเผาภายใต้สภาวะ บรรยากาศแบบอากาศและกลบทราย	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 36 เปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ของธาตุในทัวมาลีน	76
ตารางที่ 37 รหัสการเผาโทปาซ	80

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 รูปโครงสร้างของเซอร์คอน	5
รูปที่ 2 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ (ก) A 300/300/2 และ (ข) A 500/300/2	14
รูปที่ 3 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (ก) O 500/300/2 และ (ข) O 700/300/2	15
รูปที่ 4 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย (ก) N 500/300/2 และ (ข) N 700/300/2	16
รูปที่ 5 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน (ก) R 400/300/2 และ (ข) R 800/300/2	17
รูปที่ 6 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน (ก) R 900/300/2 และ (ข) R 1000/300/2	18
รูปที่ 7 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี (ก) ก่อนเผา และ (ข) หลังเผา ที่ 500°C ในสภาวะ บรรยากาศแบบรีดักชัน	20
รูปที่ 8 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี (ก) ก่อนเผา และ (ข) หลังเผา ที่ 700°C ในสภาวะ บรรยากาศแบบรีดักชัน	21
รูปที่ 9 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี (ก) ก่อนเผา และ (ข) หลังเผา ที่ 900°C ในสภาวะ บรรยากาศแบบรีดักชัน	22
รูปที่ 10 เปรียบเทียบสีของเซอร์คอน ZrR, ZrN, และ ZrK ที่เผาในสภาวะ R 1000/300/2	24
รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงสีของเซอร์คอนที่เผาแบบต่อเนื่อง	25
รูปที่ 12 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผา	34
รูปที่ 13 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะ (ก) R 300/300/2 และ (ข) R 400/300/2	35
รูปที่ 14 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาที่สภาวะ (ก) R 600/300/2 และ (ข) R 700/300/2	36
รูปที่ 15 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาที่ สภาวะ (ก) R800/300/2 และ (ข) R	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 16 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาที่ สภาวะ (ก) O 600/300/2 และ (ข) O 1000/300/2	38
รูปที่ 17 รามานสเปกตรัมของ (ก) เซอร์คอนก่อนเผา และ (ข) เซอร์คอนที่เผาใน สภาวะบรรยากาศแบบอากาศที่ 1000 องศาเซลเซียส (A 1000/300/2)	40
รูปที่ 18 รามานสเปกตรัมของ (ก) เซอร์คอนก่อนเผา และ (ข) เซอร์คอนที่เผาใน สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียส (O 1000/300/2)	41
รูปที่ 19 รามานสเปกตรัมของ (ก) เซอร์คอนก่อนเผา และ (ข) เซอร์คอนที่เผาใน สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อยที่ 1000 องศาเซลเซียส (N 1000/300/2)	42
รูปที่ 20 รามานสเปกตรัมของ (ก) เซอร์คอนก่อนเผา (ข) เซอร์คอนที่เผาใน สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันที่ 1000 องศาเซลเซียส (R 1000/300/2)	43
รูปที่ 21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผา	45
รูปที่ 22 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 300/300/2	45
รูปที่ 23 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 400/300/2	46
รูปที่ 24 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 500/300/2	46
รูปที่ 25 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 600/300/2	47
รูปที่ 26 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 700/300/2	47
รูปที่ 27 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 800/300/2	48
รูปที่ 28 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 900/300/2	48
รูปที่ 29 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน R 1000/300/2	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 30 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี (ก) ก่อนเผา (ข) เผาที่ A 500/300/2 (ค) เผาที่ N 500/300/2 และ (ง) เผาที่ O 500/300/2	50
รูปที่ 31 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี หลังจากเผาที่สภาวะ (ก) R 300/300/2 และ (ข) R 700/300/2	51
รูปที่ 32 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี หลังจากเผาที่สภาวะ (ก) R 800/300/2 และ (ข) R 900/300/2	52
รูปที่ 33 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี หลังจากเผาที่สภาวะ (ก) R 1000/300/2 และ (ข) R 1200/300/2	53
รูปที่ 34 กำหนดแถบสีน้ำตาลในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา	54
รูปที่ 35 กำหนดของเหลวในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา	54
รูปที่ 36 กำหนดของผลึกในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา	55
รูปที่ 37 กำหนดของผงผลึกในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา	56
รูปที่ 38 รามานสเปกตรัมของควอตซ์หลังเผาที่สภาวะบรรยากาศ (ก) แบบอากาศ A800/300/2 (ข) แบบเฉื่อย N 800/300/2	63
รูปที่ 39 อินฟราเรดสเปกตรัมของควอตซ์ (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา	64
รูปที่ 40 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(บน) และควอตซ์หลังเผา รหัส A 300/300/2 (ล่าง)	65
รูปที่ 41 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอตซ์หลังเผา รหัส A 400/300/2 (บน)	65
รูปที่ 42 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(บน) และควอตซ์หลังเผา รหัส A 500/300/2 (ล่าง)	66
รูปที่ 43 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอตซ์หลังเผา รหัส A 600/300/2 (บน)	66
รูปที่ 44 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(บน) และควอตซ์หลังเผา รหัส N 300/300/2 (ล่าง)	67
รูปที่ 45 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอตซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอตซ์หลังเผา รหัส N 400/300/2 (บน)	67

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 46 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผา รหัส N 500/300/2 (บน)	68
รูปที่ 47 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผา รหัส N 600/300/2 (บน)	68
รูปที่ 48 ทัวมารีนก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะรีดักชัน	73
รูปที่ 49 รามานสเปกตรัมของทัวมาลีนหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศ (ก) แบบอากาศ A 800/300/2 (ข) แบบเฉื่อย N 500/300/2	77
รูปที่ 50 อินฟราเรดสเปกตรัมของทัวมาลีน (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา	78
รูปที่ 51 UV/VIS/NIR สเปกตรัมของทัวมาลีน (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผาในสภาวะ บรรยากาศแบบอากาศ A 800/300/2	79

คำนำ

พลอยเนื้ออ่อนในการวิจัยครั้งนี้ หมายถึง แร่ที่มีความแข็งน้อยกว่า 9 และมีสมบัติความคงทนทางกายภาพและทางเคมีที่สามารถนำมาทำเป็นพลอยหรือหินประดับได้ มีความสวยงาม ราคาปานกลาง นิยมนำมาใช้ทำเครื่องประดับและเครื่องใช้ หรือเครื่องตกแต่งๆ อัญมณีที่มีคุณภาพต่ำได้ถูกนำมาปรับปรุงให้มีคุณภาพดีขึ้นโดยวิธีต่างๆ เช่น การเผาหรืออบรังสี ผู้เผาพลอยในประเทศไทยส่วนใหญ่มักทำการเผาโดยขาดหลักวิชาการ ทำให้เกิดการสูญเสียพลอยไปเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันผู้ประกอบการบางแห่งได้ลดความสูญเสีย โดยส่งพลอยดิบไปปรับปรุงคุณภาพที่ต่างประเทศแถบยุโรป เช่น ประเทศเยอรมันนี แล้วนำเข้ามาเจียรไนในประเทศไทย ทำให้สูญเสียมูลค่า

การเข้าใจกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางวิทยาศาสตร์ภายในพลอยก่อนเผาและหลังเผา นับว่าเป็นความจำเป็นต่อการพัฒนาสถานะการเผาพลอยอย่างยิ่ง ซึ่งในการศึกษาวิจัยกระบวนการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาช่วยให้เกิดความรู้ความเข้าใจ อันจะนำไปสู่การพัฒนาสถานะการเผา ซึ่งในอนาคตจะนำไปสู่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับครบวงจรภายในประเทศได้

ปัจจัยสำคัญในการเผาพลอยมีอยู่หลายประการ ได้แก่ (1) อุณหภูมิในการเผาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนสีในพลอย (2) ระยะเวลาในการแช่พลอย ณ อุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสี (3) อัตราการเพิ่มและลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสี (4) อัตราการลดอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนสีจนถึงอุณหภูมิห้อง และ (5) สภาพบรรยากาศในเตาเผาพลอย อันได้แก่สภาพบรรยากาศแบบมีออกซิเจนมาก และสภาพบรรยากาศแบบมีออกซิเจนน้อย

พลอยเนื้ออ่อนมีอยู่หลายชนิดได้แก่ ควอตซ์ , เบอริล , โทปาซ , ทัวมาลีน , เซอร์คอน และอัมพัน พลอยเหล่านี้มีสีแตกต่างกัน เนื่องจากความแตกต่างขององค์ประกอบภายในพลอย ในการเผาพลอยที่ต่างชนิดกันนี้ จึงอาจต้องใช้เทคโนโลยีกระบวนการเผาแตกต่างกัน

ในปัจจุบันสถานะการเผาพลอยที่เหมาะสม ตลอดจนรายละเอียดในการเผายังเป็นความลับ ทำให้มีการเผาพลอยแบบลองผิดลองถูกอยู่ตลอดเวลา เป็นเหตุให้สูญเสียพลอยดิบไปเป็นจำนวนมาก ปัญหาเหล่านี้จะสามารถแก้ไขได้โดยใช้หลักวิชาการและความรู้ทางวิทยาศาสตร์ตรวจสอบ ติดตามการเปลี่ยนแปลงและองค์ประกอบภายในพลอย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการเผาเซอร์คอน, ควอตซ์ และทัวมาลีนและโทปาซ

2. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค วิธีการตรวจสอบและวิเคราะห์พลอยด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ขั้นสูง
3. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยให้ผู้ประกอบการและบุคคลที่สนใจ

ขอบเขตงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งงานวิจัยเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 เกี่ยวกับการเผาพลอยเซอร์คอนสีน้ำตาล, ควอตซ์ไม่มีสี ทัวมาลีนสีชมพูและสีเขียวเข้มและโทปาซ ส่วนที่ 2 เกี่ยวกับการอธิบายการเกิดสีฟ้าในเซอร์คอน

ในรายงานการวิจัยจึงได้แยกรายงานเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนที่ 1 การเผาพลอยถึงมีค่า 4 ชนิด ซึ่งได้แก่ เซอร์คอน, ควอตซ์และทัวมาลีนและโทปาซ
- ส่วนที่ 2 การอธิบายการเกิดสีฟ้าในเซอร์คอน

ส่วนที่ 1 การเผาพลอยเนื้ออ่อน

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณภาพของพลอยเนื้ออ่อนซึ่งในที่นี้ หมายถึงพลอยกึ่งมีค่า (semiprecious stone) พลอยในกลุ่มนี้มีความแข็งน้อยกว่าพลอยคอร์ันดัม (<9 Mohr scale) ได้แก่ พลอยตระกูลควอตซ์, พลอยตระกูลเบริล เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเผาพลอยโดยมีตัวแปรทั้งหมด 3 ตัวแปรคือ สภาพบรรยากาศภายในห้องเผา อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาและเวลาที่ใช้เผาที่อุณหภูมิสูงสุคนั้นซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าเวลาแช่พลอย

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทดลองเผาพลอยภายใต้สภาวะบรรยากาศในห้องเผา 4 แบบดังนี้

1. แบบ slightly oxidizing เป็นการเผาแบบปกติ ใช้รหัสการเผา A
2. แบบ oxidizing เป็นการเผาโดยผ่านแก๊สออกซิเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้รหัสการเผา O
3. แบบ inert เป็นการเผาโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้รหัสการเผา N
4. แบบ reducing เป็นการเผาที่ไม่มีออกซิเจนแต่มีตัวรีดิวซ์ ใช้รหัสการเผา R

อุณหภูมิที่ทดลองในแต่ละแบบอยู่ในช่วง 300-1200 °C ขึ้นอยู่กับชนิดของพลอยที่เผาและเวลาแช่พลอยอยู่ในช่วง 0.5-10 ชั่วโมง ในการเผาทุกสภาวะไม่มีการเติมสารใดๆ

ตัวอย่างพลอยที่ใช้ในการทดลองมี 4 ชนิดคือ พลอยควอตซ์(quartz) พลอยทัวร์มาลีน(tourmaline) พลอยโทปาส(topaz) และพลอยเพทาย(zircon) ตัวอย่างพลอยควอตซ์ ทัวร์มาลีนและโทปาสได้ซื้อจากร้านค้าทั่วไปจึงทำให้ไม่ทราบแหล่งที่มาและไม่สามารถหาตัวอย่างที่มีสีต่างๆได้ ส่วนพลอยเซอร์คอนที่ใช้ในการทดลองมาจาก 4 แหล่งคือ แหล่งรัตนศิริ(ไปซื้อตัวอย่างพลอยจากจังหวัดตราด) แหล่งน้ำเย็น จังหวัดอุบลราชธานี แหล่งบ่อพลอยจังหวัดกาญจนบุรีและแหล่งอ่าวน้อยจังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ทั้งสามแหล่งได้รับความอนุเคราะห์จากคุณรัก ธรรมชาติ

ในการดำเนินงานทดลองผู้วิจัยได้จัดวิธีการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเผาพลอยทุกตัวแปรดังนี้

1. จัดซื้อพลอยเนื้ออ่อนชนิดต่างๆ
2. ในกลุ่มพลอยแต่ละชนิดจะทำการคัดแยกพลอยเป็นกลุ่มย่อยตามสีที่ปรากฏ
3. แช่พลอยในสารละลายกรด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวแล้วล้างให้สะอาด
4. จัดพลอยด้านตรงข้าม 2 ด้านให้เรียบ และเปิดหน้าพลอยเพื่อให้แสงผ่านได้
5. แช่พลอยในสารละลาย NaOH แล้งล้างให้สะอาด
6. กำหนดรหัสพลอยโดยใช้ตัวหนังสือตัวแรกของชนิดพลอยตามด้วยตัวเลข 1,2,3.....
7. วัดสมบัติทางแสง ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีหักเห และดูลักษณะด้านหน้าภายในของพลอย
8. ทำการวัดสเปกตรัมต่างๆ UV/VIS/NIR , XRF , FTIR , RAMAN
9. นำพลอยไปเผาตามสภาวะที่กำหนดไว้
10. วัดสมบัติทางแสง ความถ่วงจำเพาะ ค่าดัชนีหักเห และวัดสเปกตรัมต่างๆ
11. สรุปการเปลี่ยนแปลงของพลอยก่อนเผาและหลังเผา

อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องวัดพลอย
2. เครื่องชั่งพร้อมอุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะยี่ห้อ Sartorius AG GOTTINGEN Model AC 2115
3. เครื่องโพลาไรสโคป (Polariscope) Model no.415 GIA
4. เครื่องหาค่าดัชนีหักเห (Refractometer) Model Duplex II, GIA.GEA
5. UV viewer ยี่ห้อ GIA GEM
6. กล้องจุลทรรศน์ชนิด 2 ตา
7. เตาเผาอุณหภูมิสูง ผลิตโดย รศ.ดร.พิเชษฐ ลิมสุวรรณ
8. เป้าอะลูมินาทนความร้อนสูง และเป้าแกรไฟต์
9. Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy ยี่ห้อ PHILIPS PW 2400 Spectrometer ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
10. Neutron Activation Analyzer รุ่น GEM-25185 ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ
11. X-Ray Diffraction Spectrometer รุ่น PHILIPS X' Pert Spectrometer ที่ภาควิชาวัสดุวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
12. Raman Spectrometer รุ่น Renishaw system 2000
13. UV/VIS/NIR Spectrophotometer รุ่น Jasco V-530
14. FTIR Spectrophotometer รุ่น Equinox 55
15. เครื่องวัดเวอร์เนีย ยี่ห้อ Mitutoyo

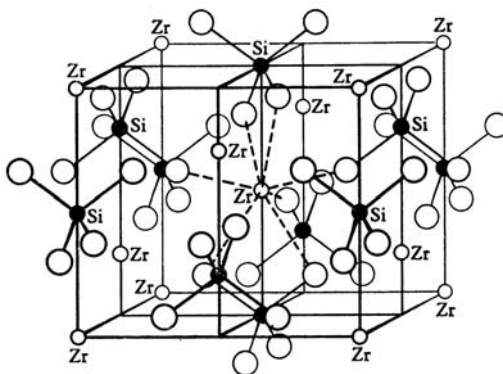
สารเคมี

1. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99% (ห้างหุ้นส่วนจำกัด วัฒนโชค)
2. ถ่านกัมมันต์ (APS Ajax Finechem)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (บริษัท Carlo Erba)
4. แอลกอฮอล์ (บริษัท J.T. Barker)
5. ซีเมนต์ทนไฟ
6. น้ำมันมะพร้าวและผงขัดเพชร

1. Zircon (เพทาย)

เซอร์คอนหรือเพทายมีหลากหลายสี เช่น ไม่มีสี เหลือง แดง ส้ม น้ำตาล ฟ้า เขียว เหลือง-เขียว มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น เซอร์คอนสีน้ำตาลเรียกว่า ไฮยาซินธ์ (Hyacinth) สีแดงส้มเรียกว่า จาซินธ์ (Jacinth) เซอร์คอนไม่มีสีเรียกว่า เพชรมาทารา เซอร์คอนเป็นแร่ซิลิเกตที่ตกผลึกจากเย็นตัวของแมกมา นอกจากนี้ยังพบในหินแกรนิต หินทราย หินไนส์ และพบบ่อยๆ อยู่ในสภาพของเม็ดแร่กลมๆ หรือผลึกเล็กๆ ตามลำธารหรือริมฝั่งทะเลโดยปนอยู่กับทองคำ

เซอร์คอนเป็นแร่ที่จัดตามองค์ประกอบทางเคมีแล้วอยู่ในกลุ่มแร่ซิลิเกต (silicate minerals) โครงสร้างของแร่ซิลิเกตโดยทั่วไปประกอบด้วย ซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) ยึดติดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่แข็งแรง อยู่ในรูป SiO_4 ซึ่งมีรูปทรงเป็นทรงสี่หน้า อนุมูล SiO_4^{4-} อาจเกิดอยู่เดี่ยวๆหรือต่อ



รูปที่ 1 รูปโครงสร้างของเซอร์คอน

เป็นโซ่ยาวหรือเป็นโครงตาข่าย ส่วนแร่เซอร์คอนมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยอนุมูล SiO_4 เกิดในรูปของเตตระฮีดรอนเดี่ยวเรียกโครงสร้างนี้ว่า nesosilicate หรือ orthosilicate ซึ่งโครงสร้างเตตระฮีดรอนนี้ยึดติดกับไอออนบวกของเซอร์โคเนียมด้วยพันธะไอออนิก (รูปที่ 1)

ในเซอร์คอนทั่วไปมีธาตุยูเรเนียมและทอริียมเป็นธาตุปริมาณน้อย ธาตุทั้งสองเกิดการแผ่รังสีแกมมา (γ -radiation) เมื่อเวลาผ่านไปนานๆ การแผ่รังสีนี้จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกอาจกลายเป็นของแข็งอสัณฐาน กระบวนการที่เกิดขึ้นเรียกว่า Matamictization (Wenk et.al, 2004) มีการจัดแบ่งเซอร์คอนในธรรมชาติเป็น 3 ระดับคือ เซอร์คอนสมบัติสูง เซอร์คอนสมบัติกลางและเซอร์คอนสมบัติต่ำ

เซอร์คอนสมบัติสูง หมายถึงเซอร์คอนที่มีความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหสูง (RI 1.90 – 1.94 ถึง 1.95 – 2.01) แสดง Birefringence ที่ชัดเจน ส่วนมากมาจากกัมพูชา มีสีน้ำตาลอมเหลืองอ่อนถึงสีน้ำตาลแดงเข้ม เมื่อเผาจะเปลี่ยนเป็นไม่มีสี สีฟ้าและเหลืองอมทอง (พลอยแต่ละบ่อให้สีไม่เหมือนกันเมื่อถูกเผา)

เซอร์คอนสมบัติกลาง หมายถึงเซอร์คอนที่มีค่าความหนาแน่นและดัชนีหักเหอยู่ระหว่างชนิดสมบัติสูงและชนิดสมบัติต่ำ ส่วนมากมีสีเหลืองอมเขียว เขียวอมน้ำตาล ถ้าเผาประมาณ 1450 องศาเซลเซียส อาจเปลี่ยนเป็นพายุชนิดคุณภาพสูงได้

เซอร์คอนสมบัติต่ำ หมายถึงเซอร์คอนที่มีความหนาแน่นและดัชนีหักเหต่ำที่สุด (RI 1.78 – 1.783 ถึง 1.81 – 1.815) ที่พบส่วนมากเป็นพลอยสีเขียว เขียวอมเหลืองหรือเทา ถ้าเผาด้วยความร้อนสูงเกินไป อาจเปลี่ยนเป็นพลอยทึบแสงไม่มีความวาว

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเผาเซอร์คอน ได้แก่

1. สภาพบรรยากาศในห้องเผา
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ซึ่งหมายถึง อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการเผาพลอย
3. เวลาแช่พลอย ซึ่งหมายถึง เวลารานที่เผาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา
4. แหล่งของเซอร์คอน
5. สีเดิมของเซอร์คอนก่อนเผา
6. รูปแบบการเผา หมายถึง การเผาต่อเนื่องหรือการเผาแยกครั้งเดียวในแต่ละอุณหภูมิ

ในงานวิจัยนี้ใช้พลอยเซอร์คอนจากแหล่งรัตนคีรีประเทศกัมพูชาเป็นพลอยตัวอย่างในการศึกษาปัจจัยในข้อ 1-3 เมื่อได้สภาวะเหมาะสมแล้วจึงทดลองเผาเพื่อศึกษาว่าแหล่ง และสีเดิมของ zircon มีผลต่อการเปลี่ยนสีของเซอร์คอนอย่างไร รูปแบบการเผาก็เป็นปัจจัยอีกอันที่ได้ทำการทดลอง

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

พลอยที่นำมาศึกษามาจากแหล่งต่างๆรวม 3 แหล่ง ได้แก่

- (1) แหล่งรัตนคีรี ประเทศกัมพูชา ใช้สัญลักษณ์พลอยเป็น ZrR
- (2) แหล่งน้ำเย็น จังหวัดอุบลราชธานี ใช้สัญลักษณ์พลอยเป็น ZrN
- (3) แหล่งบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี ใช้สัญลักษณ์พลอยเป็น ZrK

พลอยตัวอย่างที่ซื้อมามีสีน้ำตาลทั้งที่อมเหลืองหรืออมส้ม จึงได้ทำการแยกสีเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มสีน้ำตาลเข้ม (dark brown) กลุ่มสีน้ำตาลแดง (red brown) และกลุ่มสีน้ำตาลเหลือง (yellow brown) นำพลอยที่ต้องการเผาไปแช่ในกรดและหลังจากนั้นนำไปขัด เปิดหน้าพลอย 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกัน แล้วนำไปแช่ในสารละลาย NaOH และอะซิโตน แล้วล้างให้สะอาด

2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาเซอร์คอน

ในการทดลองการเผาทุกสภาวะไม่มีการเติมสารเติมแต่งและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ 300°C/hr คงที่ตลอดทุกการทดลอง อัตราการลดอุณหภูมิให้ลดตามธรรมชาติของเตาเผาไม่มีการจัดอัตราการลดอุณหภูมิ การศึกษาเวลาแช่พลอยทำภายใต้สภาวะรีดักชันที่อุณหภูมิ 1000°C เพื่อเปรียบเทียบความเข้มของสีฟ้าที่เกิดขึ้น สภาพบรรยากาศที่ศึกษามี 4 สภาวะคือ

(1) สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ เป็นการเผาแบบไม่ใส่แก๊สใดๆ ทำให้มีออกซิเจนในห้องเผา ประมาณ 21% เป็นสภาวะออกซิเดชันแบบอ่อนๆ (slightly oxidizing atmosphere) ใช้สัญลักษณ์ การเผาเป็น A

(2) สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย (inert atmosphere) เป็นการเผาที่ผ่านแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้สัญลักษณ์การเผาเป็น N

(3) สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน (oxidizing atmosphere) เป็นการเผาที่ผ่านแก๊สออกซิเจนเข้าไปในห้องเผา ใช้สัญลักษณ์การเผาเป็น O

(4) สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน (reducing atmosphere) เป็นการเผาในถ่าน ใช้สัญลักษณ์การเผาเป็น R

อุณหภูมิที่ทดลองเริ่มที่ 300 ถึง 1200° C การเผาในแต่ละครั้งใช้ตัวอย่างเซอร์คอน 3-4 ชิ้น แต่ละเม็ดจะเผาเพียงครั้งเดียว สภาวะการเผาทั้งหมดได้สรุปไว้ในตาราง 1 และ 2

3. การศึกษาปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเกิดสีฟ้าของเซอร์คอน

3.1 สีเดิมของเซอร์คอน

เซอร์คอนที่นำมาศึกษานั้นสามารถคัดแยกสีออกมาได้ 3 สี คือ สีน้ำตาลเข้ม (dark brown) สีน้ำตาลแดง (red brown) สีน้ำตาลเหลือง (yellow brown) นำเซอร์คอนที่คัดแยกออกมาได้ทั้ง 3 สี มาเผาในสภาวะรีดักชัน ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2 แหล่งของเซอร์คอน

เซอร์คอนที่นำมาศึกษาได้มาจาก 3 แหล่ง คือ รัตนคีรี ประเทศกัมพูชา, อ. น้ำยืน จ. อุบลราชธานี และอ. บ่อพลอย จ. กาญจนบุรี เลือกเซอร์คอนที่มีสีน้ำตาลเข้มจากทั้ง 3 แหล่ง ให้รหัสพลอยดังนี้

เซอร์คอนจากรัตนคีรีใช้ ZrR

เซอร์คอนจากน้ำยืนใช้ ZrN

เซอร์คอนจากบ่อพลอยใช้ ZrK

3.3 รูปแบบการเผา

รูปแบบการเผาที่ศึกษามี 2 รูปแบบ ได้แก่ (1) การเผาแบบแยก เป็นการเผาพลอย 1 ชุดต่ออุณหภูมิ และ (2) การเผาแบบต่อเนื่อง เป็นการเผาพลอย 1 ชุดตลอดการเผาจาก 300-1200 °C

คัดเลือกเซอร์คอนจากแหล่งรัตนคีรีที่มีสีน้ำตาลเข้มมาใช้ในการเผา แล้วแบ่งออกเป็น 2 ชุด เผาเซอร์คอนชุดที่ 1 ในสภาวะรีดักชันที่อุณหภูมิ 300, 500, 600, 800, 1000 และ 1200 องศาเซลเซียส แบบแยกเผา ส่วนชุดที่ 2 ให้เผาต่อเนื่องตามอุณหภูมิดังกล่าว โดยใส่พลอยทั้ง 2 ชุดในถ้วยแกรไฟต์เดียวกัน และเผาพร้อมกัน

ตารางที่ 1 รหัสการเผาเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีเพื่อหาสภาวะการเผาและเวลาแช่พลอย

รหัสการเผา * X a/b/c					
A	O	A	N	R	R
A 300/300/2	O 300/300/2	A 1000/300/2	N 300/300/2	R 300/300/2	R 1000/300/0.5
A 400/300/2	O 400/300/2	A 1000/300/6	N 400/300/2	R 400/300/2	R 1000/300/1
A 500/300/2	O 500/300/2	A 1000/300/10	N 500/300/2	R 500/300/2	R 1000/300/2
A 600/300/2	O 600/300/2		N 600/300/2	R 600/300/2	R 1000/300/6
A 700/300/2	O 700/300/2		N 700/300/2	R 700/300/2	R 1000/300/10
A 800/300/2	O 800/300/2		N 800/300/2	R 800/300/2	
A 900/300/2	O 900/300/2		N 900/300/2	R 900/300/2	
A 1000/300/2	O 1000/300/2		N 1000/300/2	R 1000/300/2	
A 1200/300/2	O 1200/300/2		N 1200/300/2	R 1200/300/2	

* X หมายถึง สภาวะบรรยากาศในห้องเผา

a หมายถึง อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)

b หมายถึง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส/ชั่วโมง)

c หมายถึง เวลาแช่พลอย (ชั่วโมง)

ตารางที่ 2 รหัสการเผาเซอร์คอนแหล่งน้ำเย็นจังหวัดอุบลราชธานีเพื่อหาอุณหภูมิการเผา

สภาวะการเผา	อุณหภูมิ °C	รหัสการเผา
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 300 °C/ชม.	300	R 300/300/2
เวลาแช่พลอย 2 ชั่วโมง	400	R 400/300/2
	500	R 500/300/2
	600	R 600/300/2
	700	R 700/300/2
	800	R 800/300/2
	900	R 900/300/2
	1000	R 1000/300/2
	1200	R 1200/300/2

4. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

4.1 สมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพ

ตรวจสอบสมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนทุกเม็ดก่อนและหลังเผา วัดสมบัติทางแสงและการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น(254 nm) และคลื่นยาว(356 nm) และหาความถ่วงจำเพาะของพลอยเซอร์คอน

ค่าดัชนีหักเหหาได้โดยการวัดระยะจาก table ถึง cullet ด้วยเวอร์เนีย (ระยะจริง) แล้วหารด้วยระยะปรากฏ ที่ได้จากผลต่างของระยะห่างระหว่าง table กับ cullet จากกล้องจุลทรรศน์

$$\text{ค่าดัชนีหักเห (RI)} = \frac{\text{ระยะจริง}}{\text{ระยะปรากฏ}}$$

4.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF มี 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นพลอยเซอร์คอนก่อนเผาและกลุ่มที่สองเป็นพลอยเซอร์คอนที่เผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบต่างๆ

ทำการบันทึกสเปกตรัม XRF โดยวางพลอยให้อยู่ในระหว่างแผ่นฟิล์มโพลีโพรพิลีน ในถ้วยสำหรับวางตัวอย่าง ปล่อยให้รังสี X จากหลอดผ่านตัวอย่าง ใช้วิธีวิเคราะห์แบบไม่มีพลอยมาตรฐาน (Standardless Method) คำนวณปริมาณธาตุเป็นเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์

4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุยูเรเนียมด้วยวิธี Neutron Activation Analysis (NAA)

เซอร์คอนในธรรมชาติมักมียูเรเนียมไอออน ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวทางกัมมันตภาพรังสีตามธรรมชาติ ทำให้เกิดธาตุเซอร์โคเนียมซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของพลอยเซอร์คอน การเปลี่ยนแปลงสีของเซอร์คอนอาจเนื่องมาจากธาตุยูเรเนียมที่อยู่ในรูปของไอออน ผู้วิจัยจึงได้ส่งตัวอย่างพลอยเซอร์คอนไปทำการวิเคราะห์หาเลขออกซิเดชันของยูเรเนียมในพลอยด้วยเทคนิค XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy) ที่ La Trobe University ประเทศออสเตรเลียและที่ Yamanashi University เมือง Kofu ประเทศญี่ปุ่น ผลการวิเคราะห์พบว่าไม่มี U^{4+} และ U^{6+} พบแต่ Zr^{4+} เท่านั้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ก็ไม่พบยูเรเนียม จากผลการทดลองทั้งสองอาจสรุปได้ว่า ปริมาณของยูเรเนียมในตัวอย่างมีน้อยมากจนไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเหล่านี้ แต่ในงานวิจัยนี้ยังต้องการทราบปริมาณยูเรเนียมในพลอยเซอร์คอนที่ไม่ได้เผาและที่เผาแล้ว จึงได้เลือกเทคนิค NAA วิเคราะห์ยูเรเนียมในพลอยเซอร์คอน เทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยได้ต่ำถึง 10 ppm ผู้วิจัยจึงได้ขอความร่วมมือจากสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติโดยให้ คุณอาภรณ์ บุญมงคล จากโครงการเคมีและวัสดุศาสตร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นผู้วิจัยร่วมกับนักวิจัยของโครงการ ในการวิเคราะห์ใช้ตัวอย่างเซอร์คอน

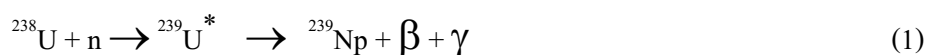
7 ตัวอย่าง (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 เซอร์คอนที่นำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค NAA *

แหล่งเซอร์คอน (รหัสพลอย)	สี	รหัสการเผา
กัมพูชา – รัตนคีรี (ก1)	น้ำตาล	ไม่ได้เผา
กัมพูชา – ไพลิน (ก2)	น้ำตาล	ไม่ได้เผา
อุบลราชธานี – น้ำยี่น (ก3)	น้ำตาล	ไม่ได้เผา
ประจวบคีรีขันธ์ – อ่าวน้อย (ก4)	น้ำตาล	ไม่ได้เผา
กัมพูชา – รัตนคีรี (ก5)	ไม่มีสี	R600/300/2
กัมพูชา – รัตนคีรี (ก6)	สีฟ้า	R1000/300/2

* เซอร์คอนที่ใช้ทั้งหมด 7 เม็ด ไม่มีเซอร์คอนที่ซ้ำกัน

บดตัวอย่างพลอยให้เป็นผงแบ่งเป็น 2 ส่วน ซึ่งและใส่ขวด (polymer vials) 2 ขวด เตรียมยูเรเนียมมาตรฐานที่มีความเข้มข้น 75 ppm แล้วใส่ในขวดอีกขวดหนึ่ง นำขวดตัวอย่างและขวดสารมาตรฐานวางในอ่างนิวตรอนนาน 1.5 ชั่วโมง เพื่อให้นิวตรอนเข้าไปกระตุ้น ^{238}U เกิดเป็น $^{238}\text{U}^*$ ที่ถูกกระตุ้น แล้วนำออกมาตั้งทิ้งไว้ 2 วัน เพื่อปลดปล่อยรังสีแกมมาที่เกิดขึ้น แล้วนำไปวัด NAA spectra ของ ^{239}Np ที่เป็นผลจากการสลายตัวของ U ตามสมการ (1) สเปกตรัม NAA และรายละเอียดการคำนวณได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก



4.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

จากผลการเผาพลอยเซอร์คอนในสภาวะรีดักชัน พบว่ามีการเปลี่ยนสีเกิดขึ้นในช่วงการเผาตั้งแต่ 300-1200 °C จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบ powder X-ray diffraction pattern ของพลอยก่อนเผาและหลังเผา ทำการบันทึกสเปกตรัม XRD ที่อุณหภูมิห้อง ค่ามุม 2θ อยู่ในช่วง 10-80 องศา และใช้รังสี $\text{CuK}\alpha$

4.5 การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปี

ในการบันทึกสเปกตรัมของพลอยเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผา ได้วางตัวอย่างพลอยในตำแหน่งและลักษณะทิศทางเดิม เพื่อให้เป็นผลการเปรียบเทียบที่ตำแหน่งเดียวกัน

4.5.1 Raman Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง 0-4000 cm^{-1}

4.5.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง 500-4000 cm^{-1}

4.4.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง 200-1100 nm

5. การศึกษาลักษณะภายในของพลอย

โดยทั่วไปตำหนิของพลอยมักจะพบมากในพลอยพวกคอรันดัม ส่วนพลอยเซอร์คอนจะพบตำหนิเกิดขึ้นในบางเม็ดเท่านั้น เซอร์คอนที่นำมาศึกษาเป็นเซอร์คอนสีน้ำตาลซึ่งมาจากแหล่งรัตนคีรี เมื่อนำมาตรวจหาตำหนิที่อยู่ในเนื้อพลอยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์พบว่า มีตำหนิที่พบมากที่สุดคือ ตำหนิของผลึก (negative crystal) ตำหนิแถบสี (color zoning) และตำหนิของเหลว (liquid inclusion)

การศึกษาค้างนี้ได้นำเซอร์คอนสีน้ำตาลที่มีตำหนิมาเผาในสภาวะรีดักชัน ($R\ 1000/300/2$) ให้ได้สีฟ้า เพื่อนำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตำหนิในพลอยก่อนและหลังการเผา ทำการทดลองดังนี้

1. นำพลอยเซอร์คอนสีน้ำตาลมาตรวจหาตำหนิโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ แล้วถ่ายรูปเก็บไว้
2. เผาเซอร์คอนในสภาวะรีดักชัน ($R\ 1000/300/2$)
3. นำเซอร์คอนสีฟ้ามาดูการเปลี่ยนแปลงของตำหนิในเนื้อพลอยที่ตำแหน่งเดิม แล้วถ่ายรูปเก็บไว้

ผลการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

ได้คัดแยกพลอยเป็นกลุ่มตามสีได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มสีน้ำตาลเข้ม, กลุ่มสีน้ำตาลแดงและกลุ่มสีน้ำตาลเหลือง วิธีดูสีให้ใช้แสงสีขาว

2. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาพลอยเซอร์คอน

2.1. การเปลี่ยนแปลงของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี และแหล่งน้ำยั้งจังหวัดอุบลราชธานีที่อุณหภูมิต่างๆและในสภาวะบรรยากาศแบบต่างๆ

การเผาเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่อุณหภูมิต่างๆ ตามตารางที่ 1 พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ $400 - 800\ ^\circ\text{C}$ แห่พลอย 2 ชั่วโมง ทั้งในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศแบบเฉื่อย แบบออกซิเดชันและแบบรีดักชัน พลอยเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นไม่มีสี การเผาเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีในสภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันที่อุณหภูมิ $300\ ^\circ\text{C}$ พบว่าพลอยเปลี่ยนเป็นสีส้มซึ่งเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเดิม (สีน้ำตาล) เมื่อโดนแสงไฟและที่อุณหภูมิ $1000\ ^\circ\text{C}$ ได้พลอยที่มีสีฟ้า การเปลี่ยนแปลงของเซอร์คอนที่สภาวะต่างๆได้ แสดงในตารางที่ 4-7 และรูปที่ 2-6 จากการทดลองพบว่า ปริมาณถ่านในถ้วยแกรไฟต์ต้องมีปริมาณพอเหมาะ ถ้ามกเกินไปทำให้ไม่ได้สีฟ้า

การเผาเซอร์คอนแหล่งน้ำยั้งภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชันตามตารางที่ 2 ได้ผลการเผาแบบเดียวกับการเผาเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี ผลการเผาได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 และรูปที่ 7-9 เมื่อเปรียบ

เกี่ยวกับการเผาพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีพบว่า เซอร์คอนแหล่งน้ำเย็นให้สีฟ้าอ่อนกว่าเมื่อเผาที่สถานะเดียวกัน (R1000/300/2) แต่เมื่อทดลองเผาเซอร์คอนแหล่งน้ำเย็นที่สถานะ R 1300/300/2 และ R 1400/300/2 เพิ่มเติม พบว่าสีฟ้าหายไปกลายเป็นเซอร์คอนที่มีลักษณะขุ่น

ตารางที่ 4 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศเพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 300/300/2	ผิวคล้ำยกระจก พลอยเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นไม่มีสี
A 400/300/2	ผิวคล้ำยกระจก พลอยเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นไม่มีสี
A 500/300/2	ผิวคล้ำยกระจก ผลึกรูปเข็มภายใน (สีแดง) หายไป
A 600/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก
A 700/300/2	พลอยมี 2 สี (ส้ม+ใส) สีกระจายไม่ทั่วเม็ด
A 800/300/2	ผิวคล้ำยกระจก สีเทาภายในหายไป ผลึกยังเหมือนเดิม
A 900/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก
A 1000/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก
A 1200/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก

ตารางที่ 5 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อยเพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
N 300/300/2	ลักษณะภายในไม่เปลี่ยนแปลง พอออกจากเตามีสีแดงตั้งทิ้งไว้เป็นสีเหลือง
N 400/300/2	ออกจากเตาใหม่ๆพลอยสีแดงเมื่อตั้งทิ้งไว้เปลี่ยนเป็นสีเหลือง
N 500/300/2	ผิวสะท้อน ตัวพลอยใส สีไม่ทั่วซึ่งไม่มีสีกับสีเหลือง
N600/300/2	พลอยใสไม่มีสี สีแดงที่ผิวลดลง
N700/300/2	พลอยใสไม่มีสี
N800/300/2	พลอยใสไม่มีสีและมีสีเหลืองปนในเนื้อพลอย
N 900/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก
N 1000/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก
N 1200/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวสะท้อนคล้ำยกระจก

ตารางที่ 6 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชันเพื่อหา
อุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
O 300/300/2	พลอยมีสีส้ม เมื่อตั้งทิ้งไว้สีส้มจางลง และเปลี่ยนเป็น สีน้ำตาลเมื่อทิ้งไว้นาน
O 400/300/2	พลอยมีสีส้ม และเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเมื่อตั้งทิ้งไว้
O 500/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
O 600/300/2	พลอยใส ไม่มีสี รอยแตกข้างในยังคงเดิม
O 700/300/2	พลอยใส ไม่มีสี มีสีแดงกระจายในเนื้อ
O 800/300/2	พลอยใส ไม่มีสี มีรอยแตกมากขึ้นและมีสีแดงที่ผิว
O 900/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
O 1000/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
O 1200/300/2	พลอยใส ไม่มีสี

ตารางที่ 7 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาพบรรยากาศแบบรีดิวซ์เพื่อหา
อุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
R 300/300/2	พลอยสีส้ม เมื่อตั้งทิ้งไว้พลอยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน
R 400/300/2	พลอยสีส้มอ่อน ใส เมื่อตั้งทิ้งไว้พลอยเปลี่ยนเป็น สีน้ำตาลอ่อน
R 500/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
R 600/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
R 700/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
R 800/300/2	พลอยใส ไม่มีสี
R 900/300/2	พลอยใส สีเขียวอมฟ้า
R 1000/300/2	พลอยใส สีฟ้า
R 1200/300/2	พลอยใส สีฟ้า



ก่อนเผา



หลังเผา

(ก)



ก่อนเผา



หลังเผา

(ข)

รูปที่ 2 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ
(ก) A 300/300/2 (ข) A 500/300/2



ก่อนเผา



หลังเผา

(ก)



ก่อนเผา



หลังเผา

(ข)

รูปที่3 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน

(ก) O 500/300/2 (ข) O 700/300/2



ก่อนเผา



หลังเผา

(ก)



ก่อนเผา



หลังเผา

(ข)

รูปที่ 4 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย

(ก) N 500/300/2 (ข) N 700/300/2



ก่อนเผา



หลังเผา

(ก)



ก่อนเผา



หลังเผา

(ข)

รูปที่ 5 เซอร์คอนรัตนกิริก่อนเผาและหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน

(ก) R 400/300/2 (ข) R 800/300/2



ก่อนเผา



หลังเผา

(ก)



ก่อนเผา



หลังเผา

(ข)

รูปที่ 6 เซอร์คอนรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน

(ก) R 900/300/2 (ข) R 1000/300/2

ตารางที่ 8 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งน้ำเย็น จ.อุบลราชธานีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบรีดิวซ์ เพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
R 300/300/2	พลอยสีอ่อนลงเล็กน้อย
R 400/300/2	พลอยสีอ่อนลง(สีออกเหลือง)
R 500/300/2	พลอยไม่มีสี ความใสเพิ่มขึ้น
R 600/300/2	พลอยไม่มีสี ความใสเพิ่มขึ้น
R 700/300/2	พลอยไม่มีสี ความใสเพิ่มขึ้น
R 800/300/2	พลอยไม่มีสี ความใสเพิ่มขึ้น
R 900/300/2	พลอยสีอมฟ้าเล็กน้อย ความใสเพิ่มขึ้น
R 1000/300/2	พลอยสีอมฟ้าเล็กน้อย ความใสเพิ่มขึ้น
R 1200/300/2	พลอยสีอมฟ้าเล็กน้อย ความใสเพิ่มขึ้น
R 1300/300/2	พลอยไม่มีสี เริ่มขุ่น
R 1400/300/2	พลอยไม่มีสี ขุ่น และเริ่มหลอมติดเบ้า

2.2 อิทธิพลของเวลาแช่พลอย

การทดลองหาเวลาในการแช่พลอยที่ 1000 °C ภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ พบว่า การแช่พลอย 2 , 6 และ 10 ชั่วโมง พลอยเปลี่ยนเป็นไม่มีสีเหมือนกัน แต่ภายใต้สภาวะบรรยากาศ แบบรีดักชัน พลอยที่แช่ 10 ชั่วโมง มีสีฟ้าอ่อนกว่าพลอยที่แช่ 2 ชั่วโมง ดังนั้นเวลาแช่พลอยจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ผลต่อสีของพลอยไม่มีความจำเป็นที่ต้องเผานานๆ ผลการทดลองได้แสดงในตารางที่ 9-10

ตารางที่ 9 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศเพื่อหาเวลาในการแช่พลอย

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 1000/300/2	พลอยใสไม่มีสี ผิวมันคล้ายกระจก
A 1000/300/6	พลอยใสไม่มีสี ผิวมันคล้ายกระจก
A 1000/300/10	พลอยใสไม่มีสี ผิวมันคล้ายกระจก



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา ที่ 500°C ในสภาวะบรรยากาศแบบ
รีดักชัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี(ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา ที่ 700°C ในสภาวะบรรยากาศแบบ
รีดักชัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 เซอร์คอนจากอุบลราชธานี(ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา ที่ 900°C ในสภาวะบรรยากาศแบบ
รีดักชัน

ตารางที่ 10 ลักษณะของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาในสภาวะบรรยากาศแบบ
รีดักชัน เพื่อหาเวลาแช่พลอย

สภาวะของการเผา	สี
R 1000/300/0.5	สีฟ้าอมเขียว
R 1000/300/1	สีฟ้าอมเขียว
R 1000/300/2	สีฟ้า
R 1000/300/6	ฟ้าอ่อน
R 1000/300/10	ฟ้าอ่อน

3. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเข้มของสีฟ้าของพลอยเซอร์คอน

3.1 สีเดิมของเซอร์คอน

เมื่อเปรียบเทียบสีฟ้าที่เกิดขึ้นในพลอยเซอร์คอน พบว่า พลอยเซอร์คอนที่มีสีน้ำตาลเข้มให้สีฟ้าเข้มมากที่สุด ส่วนพลอยเซอร์คอนที่มีสีน้ำตาลเหลืองให้พลอยไม่มีสีค่อนข้างใส บางเมื่อบางมีสีส้มอ่อน (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 ผลการเผาพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่มีสีน้ำตาลเข้ม น้ำตาลอมแดงและน้ำตาลอม
เหลืองในสภาวะ R/1000/300/2

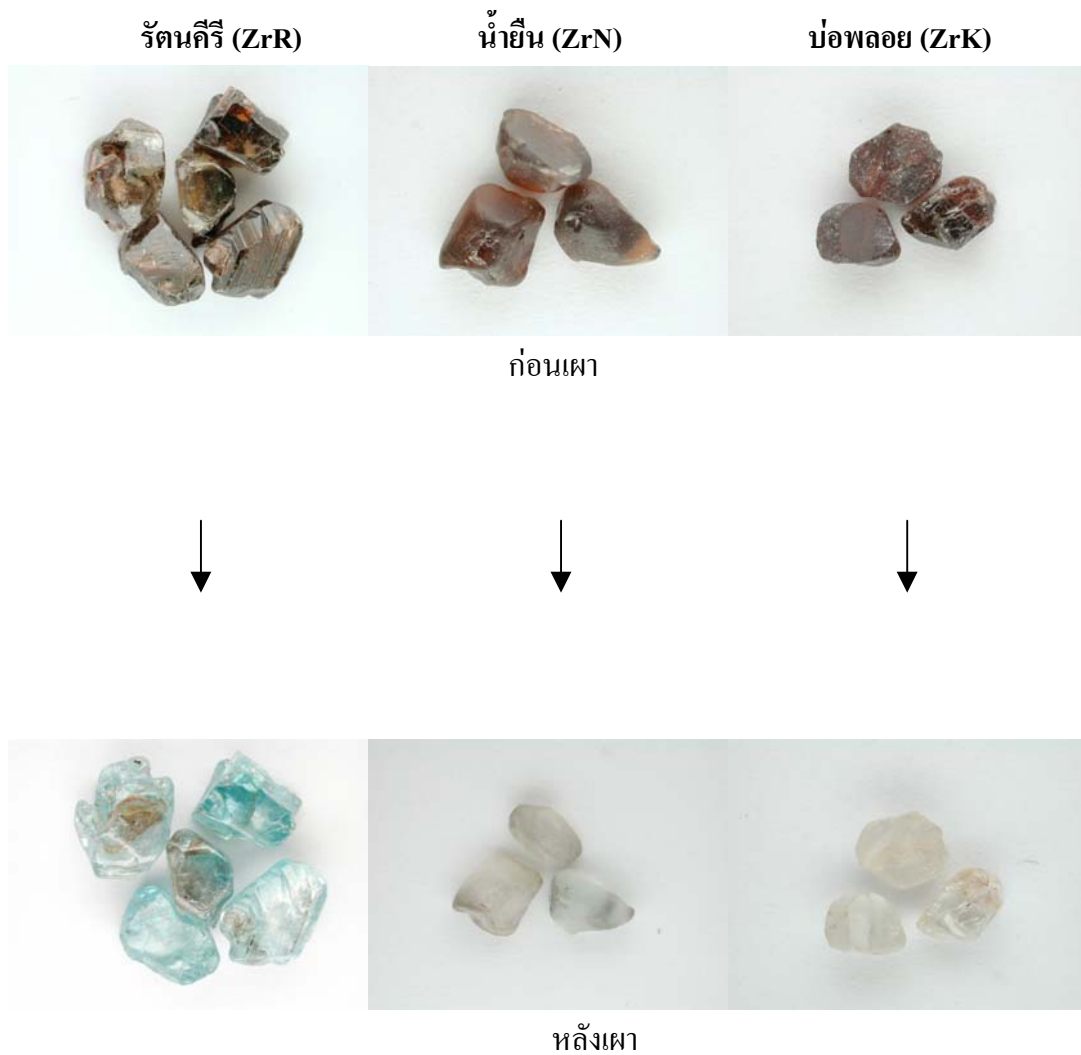
สีเดิมของพลอยเซอร์คอน	ผลการเปลี่ยนแปลงหลังการเผา
สีน้ำตาลเข้ม	สีฟ้าเข้ม
สีน้ำตาลแดง	สีฟ้าเข้ม
สีน้ำตาลเหลือง	สีส้มอ่อน ค่อนข้างใสไม่มีสี

3.2 แหล่งของพลอยเซอร์คอน

เมื่อเผาที่สภาวะเดียวกัน พบว่าพลอยจากแหล่งรัตนคีรีให้สีฟ้าเข้มที่สุด รองลงมาเป็นเซอร์คอนจากแหล่ง น้ำยีน และ บ่อพลอย ตามลำดับ รูปที่ 10 แสดงสีฟ้าของพลอยที่เผาแล้วจากทั้ง 3 แหล่ง R1000/300/2

3.3 รูปแบบการเผา

การเผาแบบเผาต่อเนื่องได้เซอร์คอนที่มีสีฟ้าอ่อนกว่าการเผาแบบแยก (รูปที่ 11) และ สรุปผล
การเปรียบเทียบในตารางที่ 12



รูปที่ 10 เปรียบเทียบสีของเซอร์คอน ZrR, ZrN, และ ZrK ที่เผาในสภาวะ R1000/300/2



ก่อนเผา



R 300/300/2



R 500/300/2



R 600/300/2



R 800/300/2



R 1000/300/2



R 1200/300/2

รูปที่ 11 การเปลี่ยนแปลงสีของเซอร์คอนที่เผาแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบผลการเผาเซอร้คอนแบบแยกในแต่ละอุณหภูมิและแบบต่อเนื่อง

สภาวะของการเผา	การเปลี่ยนแปลงหลังการเผา
1. เผาแยกในแต่ละอุณหภูมิ	
R 300/300/2	ตอนแรกเป็นสีส้มเข้ม สักพักจะเปลี่ยนกลับมาเป็นสีน้ำตาลเหมือนเดิม
R 500/300/2	ใสไม่มีสี
R 600/300/2	ใสไม่มีสี
R 800/300/2	สีฟ้าอ่อน
R 1000/300/2	สีฟ้าเข้ม
R 1200/300/2	สีฟ้าเข้ม
2. เผาต่อเนื่อง	
R 300/300/2	ตอนแรกเป็นสีส้มเข้ม สักพักจะเปลี่ยนกลับมาเป็นสีน้ำตาลเหมือนเดิม
R 500/300/2	สีส้มอ่อน
R 600/300/2	สีเหลืองอ่อน
R 800/300/2	สีเหลืองอมฟ้าอ่อน ๆ
R 1000/300/2	สีฟ้า
R 1200/300/2	สีฟ้าเข้ม

4. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

4.1 สมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี

เนื่องจากเซอร์คอนเป็นพลอยที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (สูงกว่าน้ำยา RI) ทำให้ไม่สามารถหาค่าดัชนีหักเหของพลอยตัวอย่างโดยวิธีธรรมดาได้ จึงไม่ได้วัดค่าดัชนีหักเหของพลอย จากการศึกษาสมบัติทางแสงของพลอยเซอร์คอนก่อนเผาด้วยเครื่องโพลาไรสโคปแสดงว่า เซอร์คอนเป็นพลอยที่มีสมบัติทางแสงแบบหักเหคู่ (DR) เมื่อศึกษาสมบัติการเรืองแสงในช่วง UV ความยาวคลื่นสั้น (254 nm) และในช่วงความยาวคลื่นยาว (366 nm) ให้ผลแบบเดียวกันคือไม่เรืองแสง (inert) ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) ของเซอร์คอนที่หาได้อยู่ในช่วง 4.5342 – 4.7003 ซึ่งเป็นช่วงที่จัดว่าเป็นพลอยเซอร์คอนสมบัติสูง

สมบัติทางกายภาพของเซอร์คอนที่ผ่านการเผา พบว่าการเรืองแสงในช่วงความยาวคลื่นยาว (366 nm) และในช่วงความยาวคลื่นสั้น (254 nm) ให้ผลแบบเดียวกับก่อนเผาคือไม่เรืองแสง (inert) ค่าความถ่วงจำเพาะ (SG) ที่หาได้อยู่ในช่วง 4.5707 – 4.6887 และเป็นพลอยที่มีสมบัติทางแสงแบบหักเหคู่ (DR) ข้อมูลสมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนที่ทดลองได้แสดงในตารางที่ 13-16

ค่าดัชนีหักเหของเซอร์คอนก่อนเผา (สีน้ำตาล) ที่วัดได้จริงจากตัวอย่าง 2 เม็ดเท่ากับ 2.012 และ 1.978 ส่วนค่าดัชนีหักเหของเซอร์คอนหลังเผา (สีฟ้า) ที่วัดได้จริงจากตัวอย่าง 2 เม็ดเท่ากับ 2.053 และ 2.070

4.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

ตัวอย่างพลอยเซอร์คอนก่อนเผา ใช้วิธีเลือกกลุ่มจากตัวอย่างพลอยทั้งหมด 138 เม็ด ค่าเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 17 ในพลอยเซอร์คอนมี Zr และ Si เป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุ Al, Mg, Fe, Na, Ca และ Hg เป็นธาตุปริมาณน้อย ในรายงานการวิเคราะห์ของพลอยเซอร์คอนจากออสเตรเลีย พบธาตุ Zr, Si, Al, Er, Tm, Ca และ Lu แต่ไม่พบ Fe (Faulkner et.al 1989) หลังจากเผาได้ทำการวิเคราะห์พลอยจากการเผาทุกสภาวะโดยจะเน้นที่ปริมาณธาตุ Zr, Si, Al, Mg, Fe, Na, Ca และ Hg เพื่อเปรียบเทียบกับพลอยก่อนเผา ในตารางที่ 18 ได้สรุปปริมาณสัมพัทธ์ของพลอยที่เผาในสภาวะต่าง ๆ ปริมาณ Zr และ Si ไม่เปลี่ยนแปลงตามที่คาดไว้ อยู่ในช่วง 50 และ 12-15 เปอร์เซ็นต์

4.3 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุยูเรเนียมด้วยวิธี Neutron Activation Analysis (NAA)

สเปกตรัม NAA ของพลอยเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผามีรูปแบบเหมือนกันคือมีพีคที่ 277.53, 228.20 และ 106.10 keV. แต่ละสเปกตรัมบันทึกในช่วงพลังงาน 0 ถึง 500 keV. ปริมาณของยูเรเนียมคำนวณจากสัดส่วนของพื้นที่พีคที่ 277.53 และ 228.20 keV. ตามสมการ (1)

$$\text{ปริมาณของยูเรเนียม (ppm)} = \left[\frac{\text{พื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐาน}} \right] \times \left[\frac{\text{น้ำหนักของสารมาตรฐาน}}{\text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}} \right] \quad (1)$$

ตารางที่ 13 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศ
แบบอากาศ

รหัสการเผา	(74	ความถ่วงจำเพาะ	การเรืองแสงใน UV		สมบัติทางแสง*
			คลื่นสั้น	คลื่นยาว	
300/300/2	ก่อนเผา	4.6541	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6707	inert	inert	DR
400/300/2	ก่อนเผา	4.6809	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6794	inert	inert	DR
500/300/2	ก่อนเผา	4.6286	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6202	inert	inert	DR
600/300/2	ก่อนเผา	4.6194	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.5916	inert	inert	DR
700/300/2	ก่อนเผา	4.6436	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6365	inert	inert	DR
800/300/2	ก่อนเผา	4.5538	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6145	inert	inert	DR
900/300/2	ก่อนเผา	4.6432	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6411	inert	inert	DR
1000/300/2	ก่อนเผา	4.6591	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6582	inert	inert	DR
1200/300/2	ก่อนเผา	4.6546	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6532	inert	inert	DR

คลื่นสั้น = 254 nm คลื่นยาว = 366 nm

* สมบัติทางแสงแบบ DR = double refractive optic character (ดัชนีหักเหคู่)

ตารางที่ 14 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศแบบออกซิเจน

รหัสการเผา	เซอร์คอน	ความถ่วงจำเพาะ	การเรืองแสงใน UV		สมบัติทางแสง*
			คลื่นสั้น	คลื่นยาว	
300/300/2	ก่อนเผา	4.6027	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6723	inert	inert	DR
400/300/2	ก่อนเผา	4.6150	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6887	inert	inert	DR
500/300/2	ก่อนเผา	4.5943	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6592	inert	inert	DR
600/300/2	ก่อนเผา	4.5949	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6190	inert	inert	DR
700/300/2	ก่อนเผา	4.6715	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6762	inert	inert	DR
800/300/2	ก่อนเผา	4.5342	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.5613	inert	inert	DR
900/300/2	ก่อนเผา	4.6571	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6499	inert	inert	DR
1000/300/2	ก่อนเผา	4.6599	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6484	inert	inert	DR
1200/300/2	ก่อนเผา	4.6579	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6454	inert	inert	DR

คลื่นสั้น = 254 nm คลื่นยาว = 366 nm

* สมบัติทางแสงแบบ DR = double refractive optic character (ดัชนีหักเหคู่)

ตารางที่ 15 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศแบบ
เฉื่อย

รหัสการเผา	เซอร์คอน	ความถ่วงจำเพาะ	การเรืองแสงใน UV		สมบัติทางแสง*
			คลื่นสั้น	คลื่นยาว	
300/300/2	ก่อนเผา	4.6692	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6352	inert	inert	DR
400/300/2	ก่อนเผา	4.6774	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6634	inert	inert	DR
500/300/2	ก่อนเผา	4.6855	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6690	inert	inert	DR
600/300/2	ก่อนเผา	4.6770	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6799	inert	inert	DR
700/300/2	ก่อนเผา	4.6773	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.5603	inert	inert	DR
800/300/2	ก่อนเผา	4.7003	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6280	inert	inert	DR
900/300/2	ก่อนเผา	4.6471	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6469	inert	inert	DR
1000/300/2	ก่อนเผา	4.6375	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6484	inert	inert	DR
1200/300/2	ก่อนเผา	4.6484	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6587	inert	inert	DR

คลื่นสั้น = 254 nm คลื่นยาว = 366 nm

* สมบัติทางแสงแบบ DR = double refractive optic character (ดัชนีหักเหคู่)

ตารางที่ 16 สมบัติทางอัญมณีของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน

รหัสการเผา	เซอร์คอน	ความถ่วงจำเพาะ	การเรืองแสงใน UV		สมบัติทางแสง*
			คลื่นสั้น	คลื่นยาว	
300/300/2	ก่อนเผา	4.5795	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.5883	inert	inert	DR
400/300/2	ก่อนเผา	4.6138	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6165	inert	inert	DR
500/300/2	ก่อนเผา	4.6653	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6412	inert	inert	DR
600/300/2	ก่อนเผา	4.4777	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.4945	inert	inert	DR
700/300/2	ก่อนเผา	4.6352	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6119	inert	inert	DR
800/300/2	ก่อนเผา	4.6592	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6255	inert	inert	DR
900/300/2	ก่อนเผา	4.6668	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6610	inert	inert	DR
1000/300/2	ก่อนเผา	4.6403	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6175	inert	inert	DR
1200/300/2	ก่อนเผา	4.6293	inert	inert	DR
	หลังเผา	4.6054	inert	inert	DR

คลื่นสั้น = 254 nm คลื่นยาว = 366 nm

* สมบัติทางแสงแบบ DR = double refractive optic character (ดัชนีหักเหคู่)

ตารางที่ 17 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุในพลอยเซอร์คอนจากแหล่งต่างๆก่อนเผา

แหล่ง	สี	รหัสพลอย	เปอร์เซนต์สัมพัทธ์*								
			Zr (%)	Si (%)	Al (%)	Fe (%)	Hg (%)	Y (%)	Ca (%)	Na (%)	Cl (%)
กัมพูชา	น้ำตาล	ZrR-1	51.906	13.970	-	trace	-	-	-	-	-
		ZrR-2	52.816	13.395	trace	trace	trace	-	-	-	-
อุบลฯ	น้ำตาล-แดง	ZrU-1	52.906	12.927	0.147	trace	trace	-	trace	trace	trace
		ZrU-2	51.587	14.171	trace	-	trace	-	-	-	trace

* วิเคราะห์แบบ standardless

ตารางที่ 18 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุที่พบในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผา

	รหัสการเผา	เปอร์เซนต์สัมพัทธ์					
		Zr	Si	Al	Mg	Fe	Y
A 500/300/2		52.584	13.558	trace	trace	trace	trace
A 800/300/2		52.428	13.335	trace	trace	trace	trace
O 500/300/2		48.130	13.448	0.545	trace	3.644	trace
O 800/300/2		49.779	14.543	0.420	trace	0.596	trace
N 300/300/2		49.700	14.991	0.078	trace	trace	trace
N 1000/300/2		49.148	15.648	0.072	trace	trace	trace
R 500/300/2		52.638	13.000	0.074	trace	0.105	trace
R 900/300/2		53.136	13.193	trace	trace	trace	trace
R 1000/300/2		53.680	12.850	trace	trace	trace	trace

* วิเคราะห์แบบ standardless

ผลการคำนวณปริมาณยูเรเนียมได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 19 ปริมาณยูเรเนียมในเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีต่ำกว่าในเซอร์คอนจากแหล่งน้ำเย็นและอ่าวน้อย เซอร์คอนแหล่งอ่าวน้อยมีปริมาณยูเรเนียมสูงมากถึง 527 ppm จากผลการทดลองสรุปได้ว่า ยูเรเนียมเป็นธาตุปริมาณน้อยในพลอยเซอร์คอนตามที่คาดไว้ สเปกตรัม NAA ทั้งหมดและวิธีการคำนวณได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

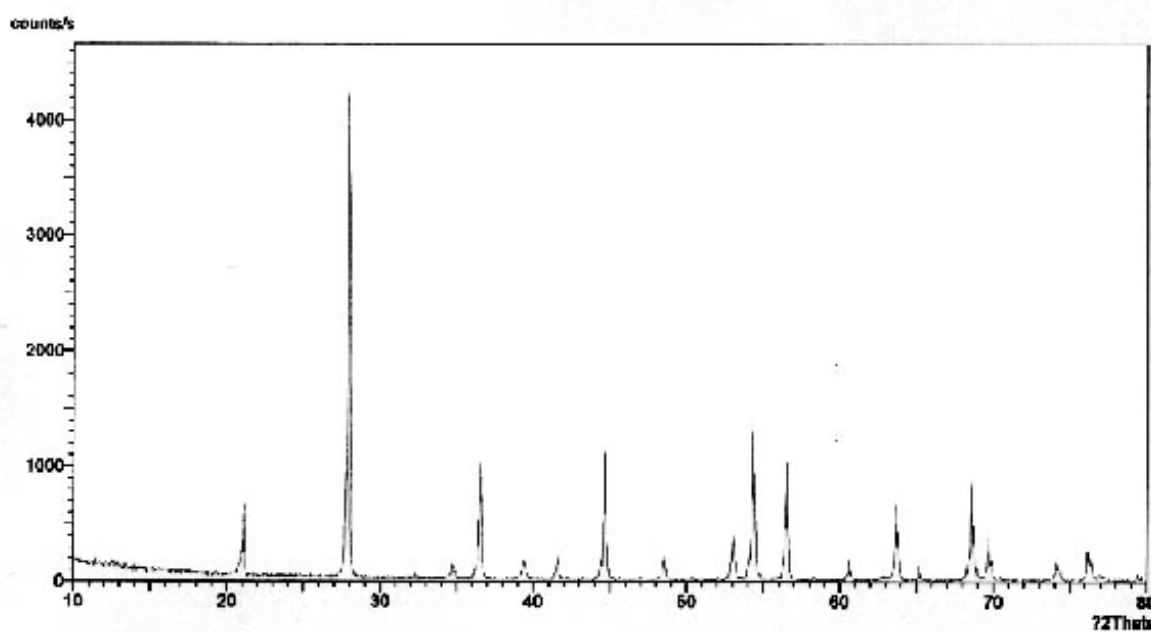
ตารางที่ 19 ปริมาณธาตุยูเรเนียมในเซอร์คอนที่ไม่ได้เผาและที่เผาแล้ว

แหล่งเซอร์คอน	ปริมาณยูเรเนียมในตัวอย่าง (ppm)
ก1. กัมพูชา – รัตนคีรี (ก่อนเผา)	52.19
ก2. กัมพูชา (ไพลิน) (ก่อนเผา)	44.73
ก3. อุบลราชธานี (น้ำเย็น) (ก่อนเผา)	82.54
ก4. ประจวบคีรีขันธ์ (อ่าวน้อย) (ก่อนเผา)	527.39
ก5. กัมพูชา – รัตนคีรีไม่มีสี (หลังเผา) R 600/300/2	38.11
ก6. กัมพูชา – รัตนคีรีสีฟ้า (หลังเผา)	60.51

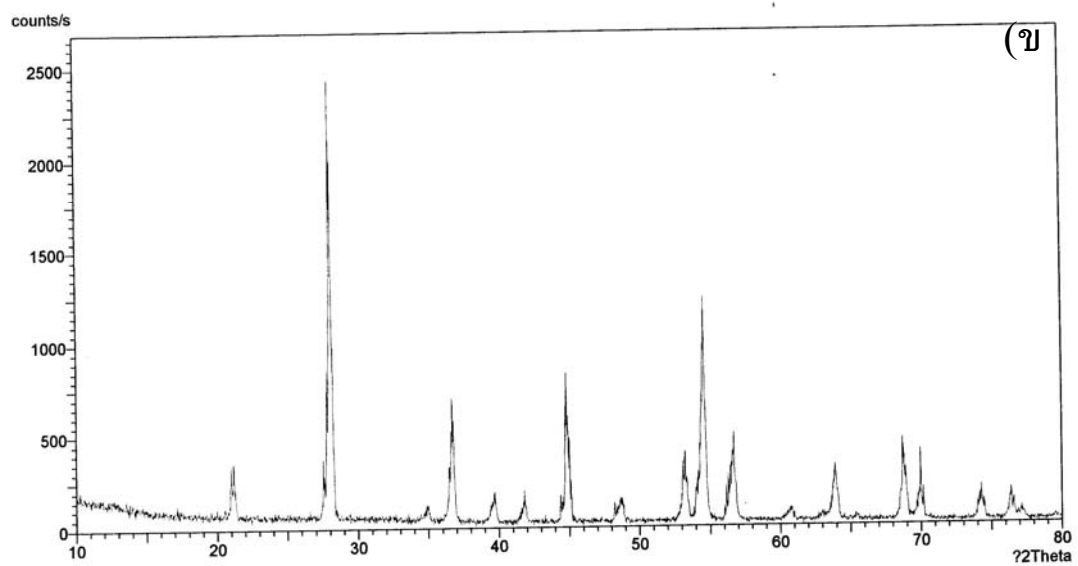
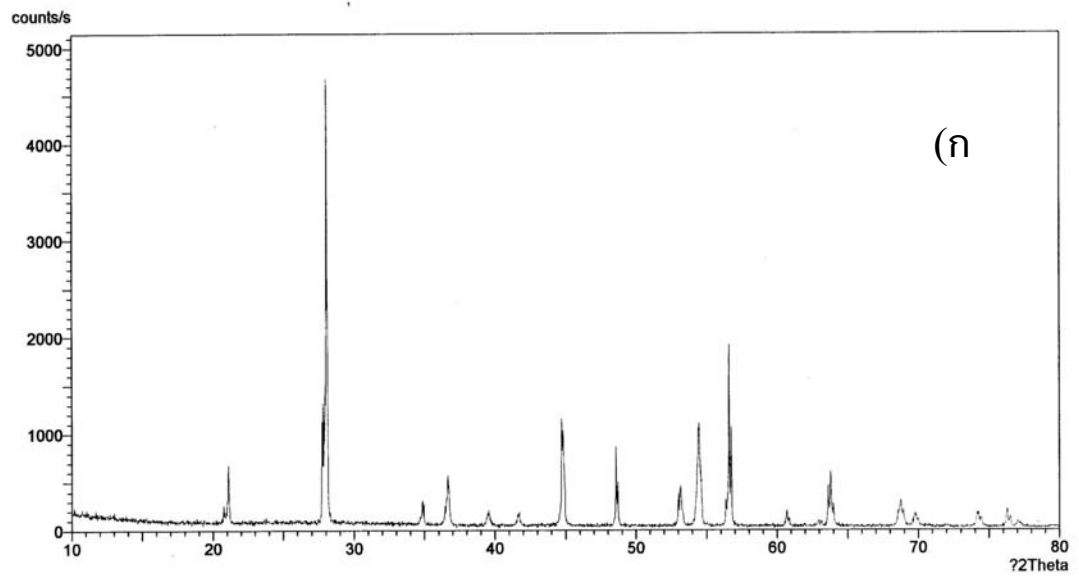
* วิธีคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก

4.4 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

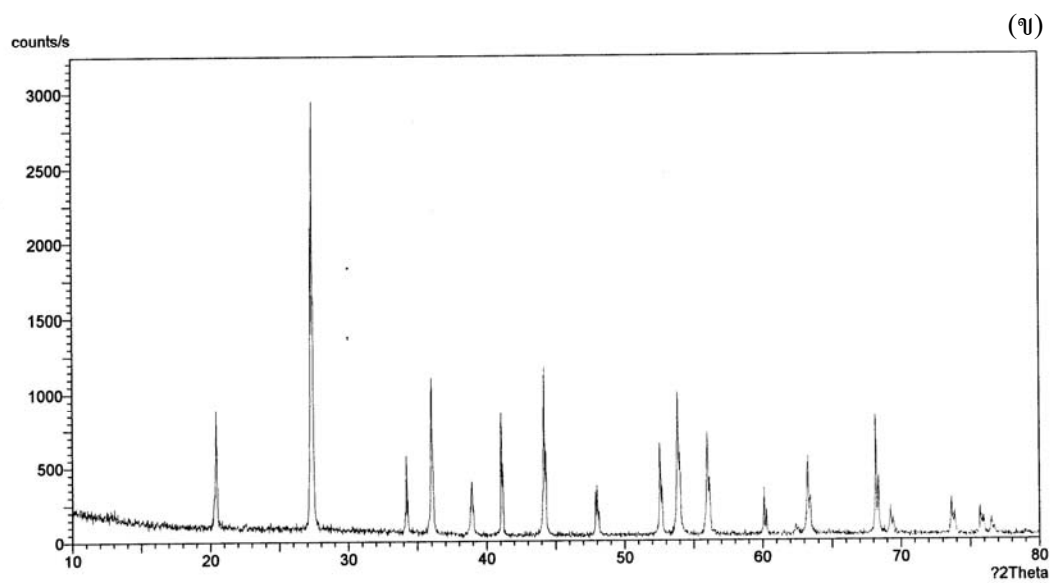
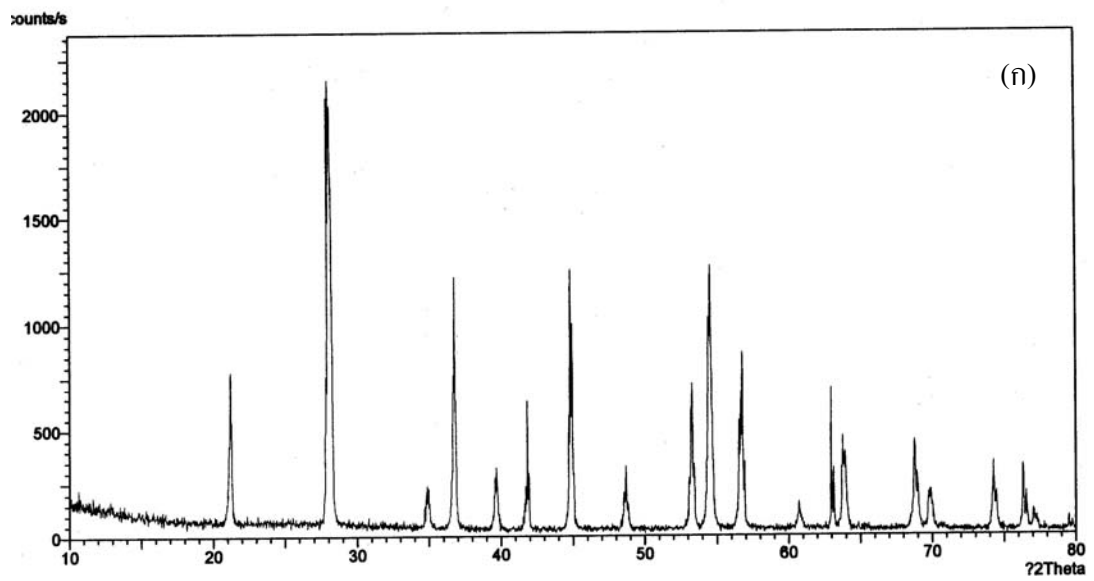
การที่เซอร์คอนเกิดการเปลี่ยนสีเมื่อเผาในสภาวะรีดักชัน ทำให้เกิดข้อสงสัยว่ามีการเปลี่ยนโครงสร้างของผลึกของพลอยหรือไม่ เทคนิค XRD จะให้ข้อมูลเหล่านี้ได้ รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยก่อนเผาและหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชันและแบบรีดักชันได้แสดงไว้ในรูป 12-16 ลักษณะสำคัญที่เห็นได้จากการเปรียบเทียบรูปแบบ XRD แบบผง มี 3 ลักษณะ คือ (1) มีรูปแบบเหมือนกันกล่าวคือมีจำนวนพีคเท่ากัน (2) มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคเล็กน้อยและ (3) อัตราส่วนความเข้มสัมพัทธ์ของพีคเปลี่ยนไป ลักษณะดังกล่าวอาจอธิบายได้ว่า โครงผลึกของเซอร์คอนไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนเพียงแต่อาจมีการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนเซลล์ในทิศทางต่างๆเล็กน้อย จึงทำให้ความเข้มสัมพัทธ์ของพีคเปลี่ยนไป รายละเอียดการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ควรมีการทดลองต่อไป



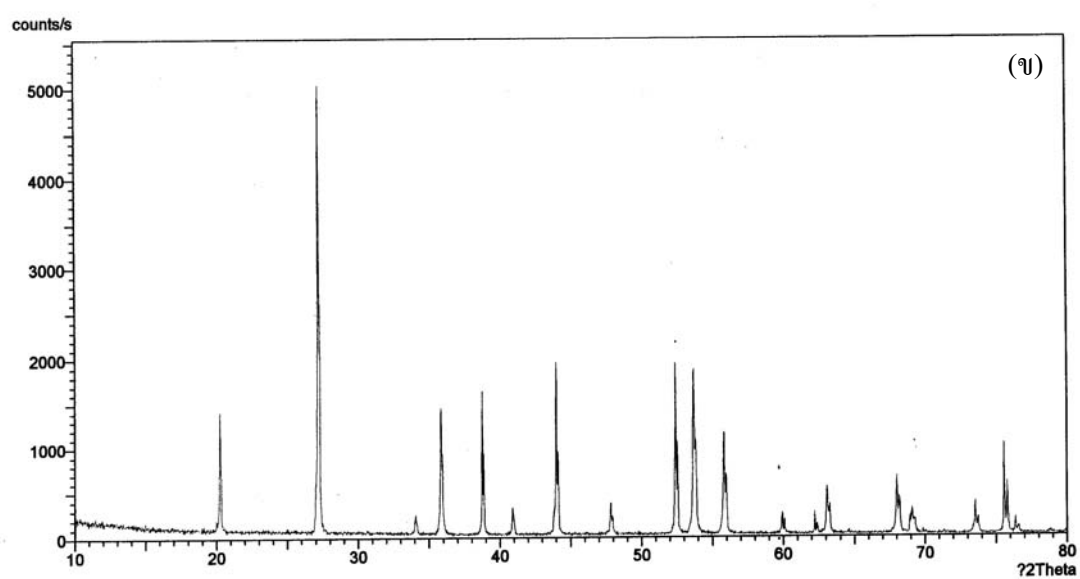
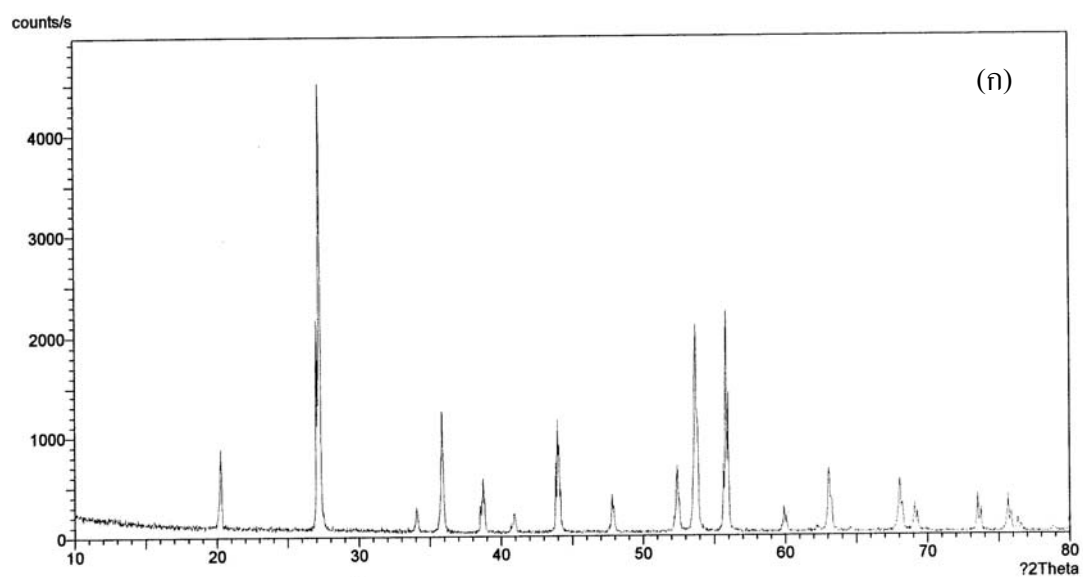
รูปที่ 12 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีก่อนเผา



รูปที่ 13 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผาที่ สภาวะ(ก) R300/300/2 และ (ข) R400/300/2

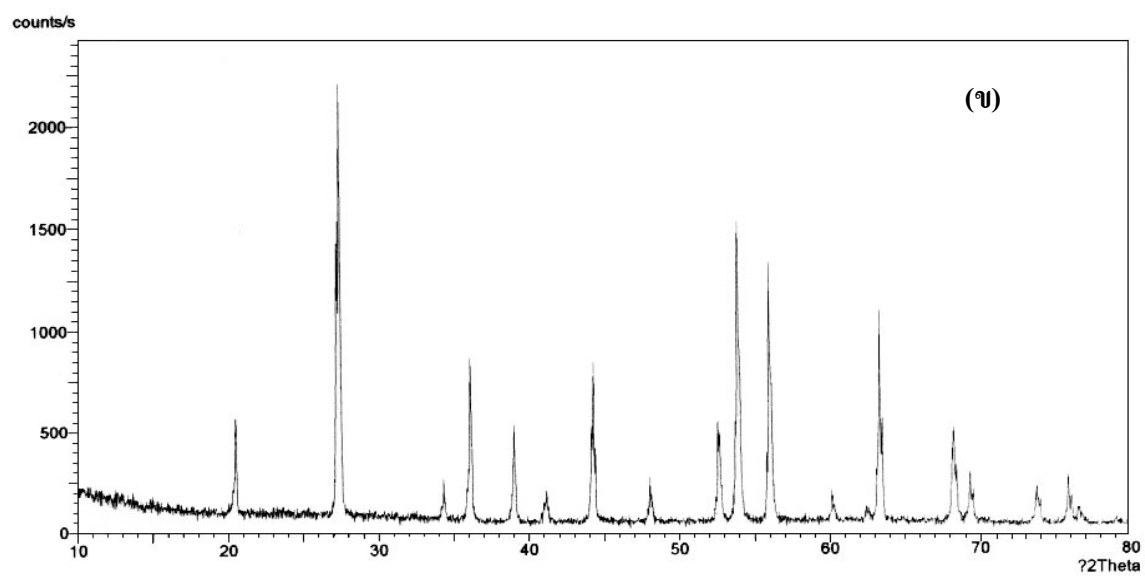
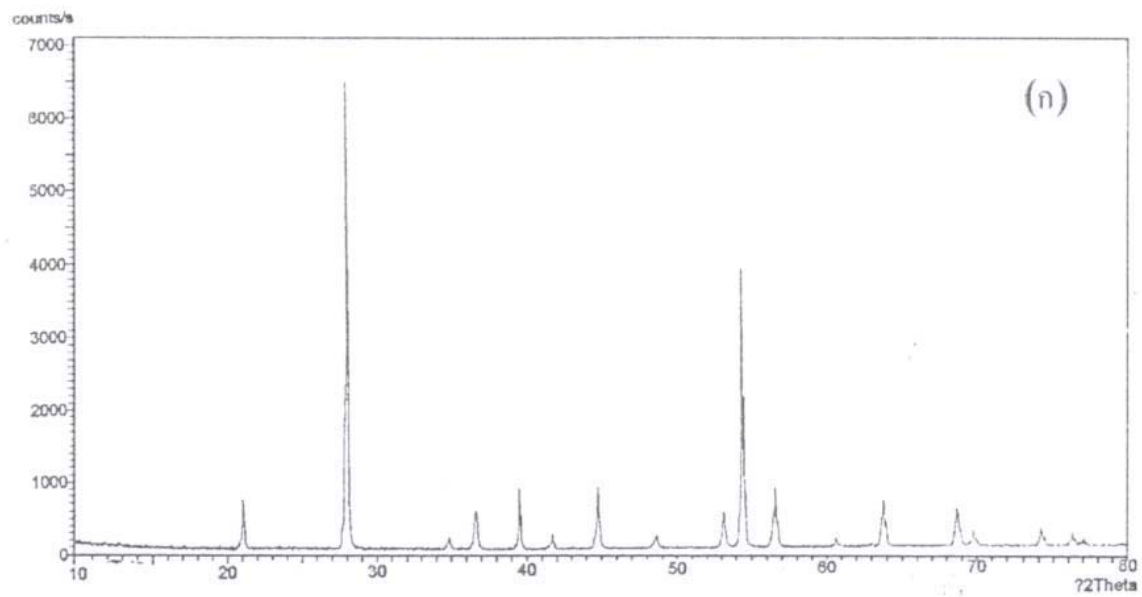


รูปที่ 14 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผาที่ สภาวะ(ก) R 600/300/2 และ (ข) R700/300/2



รูปที่ 15 รูปแบบ XRD แบบผงของฟลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผาที่ สภาวะ

(ก) R 800/300/2 และ (ข) R 1000/300/2



รูปที่ 16 รูปแบบ XRD แบบผงของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังเผาที่ สภาวะ(ก) O 600/300/2
และ (ข) O 1000/300/2

4.5 การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี

4.4.1 Raman Spectroscopy

สเปกตรัมรามานของพลอยเซอร์คอน 36 เม็ดที่เผาตามสภาวะการเผาในตารางที่ 1 ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข รูปที่ 17-20 เป็นสเปกตรัมรามานของพลอยเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะการเผา A1000/300/2 N1000/300/2 O1000/300/2 และ R1000/300/2 แต่ละสเปกตรัมประกอบด้วยพีคใน 2 ช่วงดังนี้ ช่วงที่ 1 อยู่ระหว่าง $900-1100\text{ cm}^{-1}$ มี 2 พีคที่ $1000-1010\text{ cm}^{-1}$ และ $965-975\text{ cm}^{-1}$ ช่วงที่ 2 อยู่ระหว่าง $300-500\text{ cm}^{-1}$ ในช่วงนี้มี 3 พีคที่ช่วง $430-435\text{ cm}^{-1}$ 386 และ 350 cm^{-1} พีคที่เห็นในทั้ง 2 ช่วง เกิดจากการสั่นของพันธะในหมู่ซิลิเกต สเปกตรัมรามานของพลอยที่เผาแล้ว มีพีคในช่วงทั้ง 2 เช่นเดียวกันแต่ตำแหน่งของพีคเลื่อนเล็กน้อยไปที่ความถี่ต่ำลงและความเข้มสัมพัทธ์ของพีคแตกต่างกันบ้าง ตารางที่ 20 เปรียบเทียบพีคในสเปกตรัมรามานของเซอร์คอนที่ทดลองกับที่บันทึกโดยนักวิจัยอื่น

ตารางที่ 20 พีครามานในสเปกตรัมของเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี

Raman Shift (cm ⁻¹)						
ν_1	ν_2	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	
1010	975	460	439	392	356	Griffith (1969)
1011	977	-	436	-	358	Hanni (1997)
1008	974		439	386	349	Kolesov (2001)
1004	970	-	434	388	353	Phromsurin (2002)
1007 ^a	975	-	438	392	356	this study
1002 ^b	971	-	435	387	351	this study
1004 ^c	970	-	434	389	351	this study
1002 ^d	959	-	433	387	350	this study
1001 ^e	968	-	432	366	349	this study

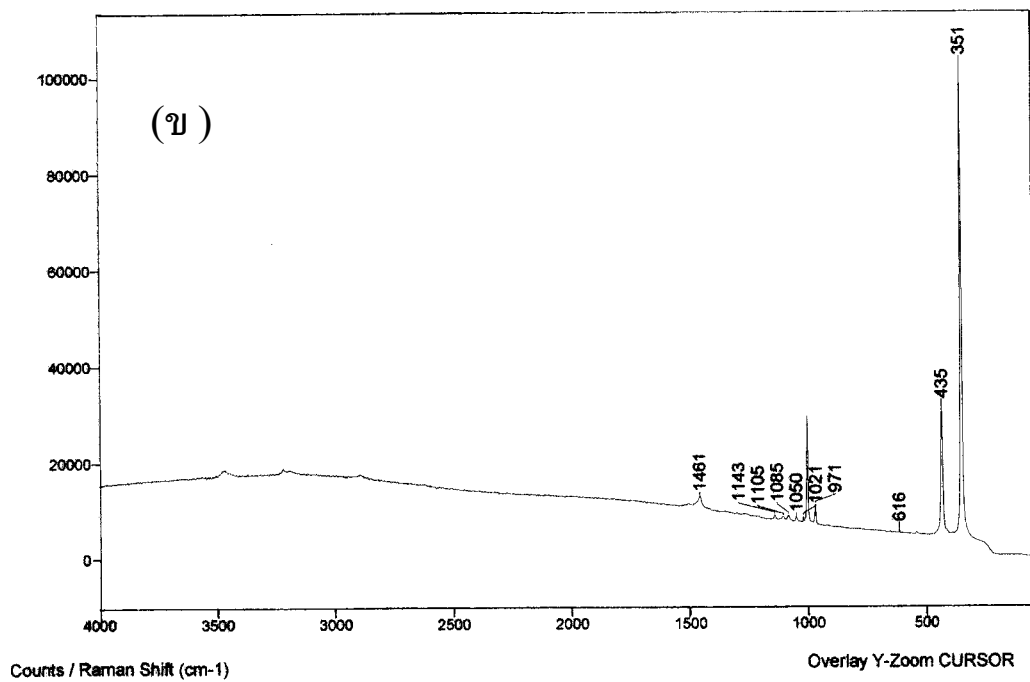
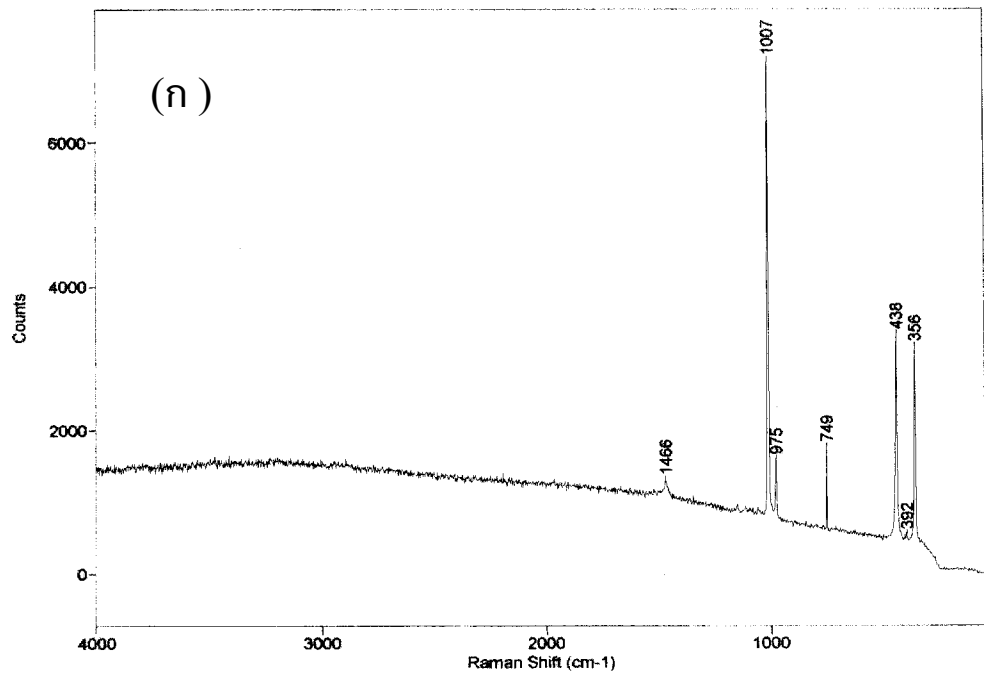
a : เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่ไม่ได้เผา

b : เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาในสภาวะ A 1000/300/2

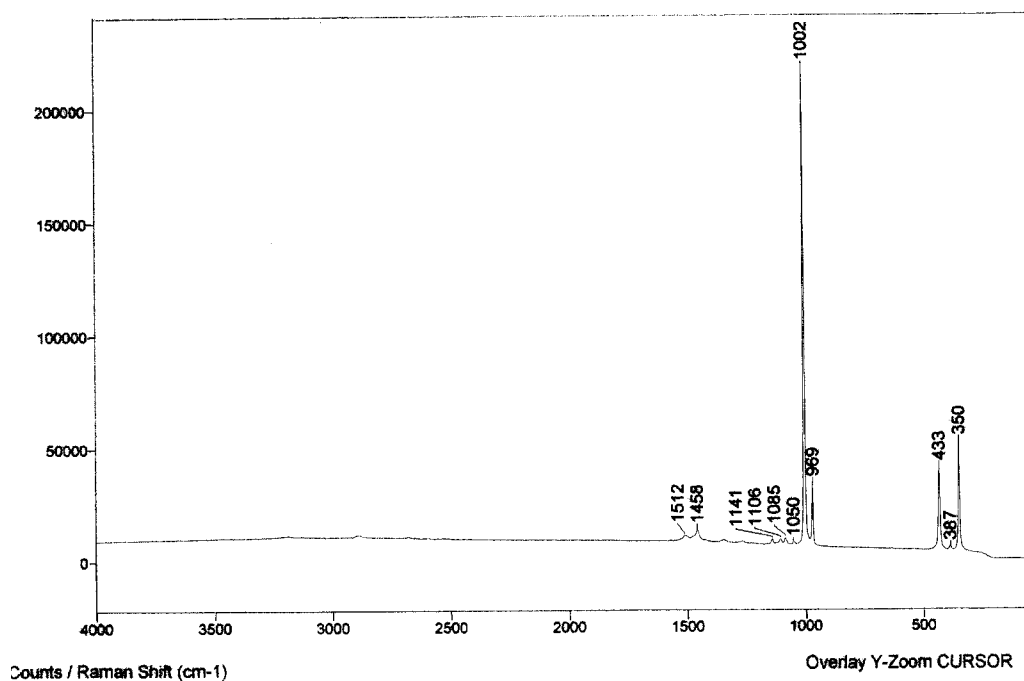
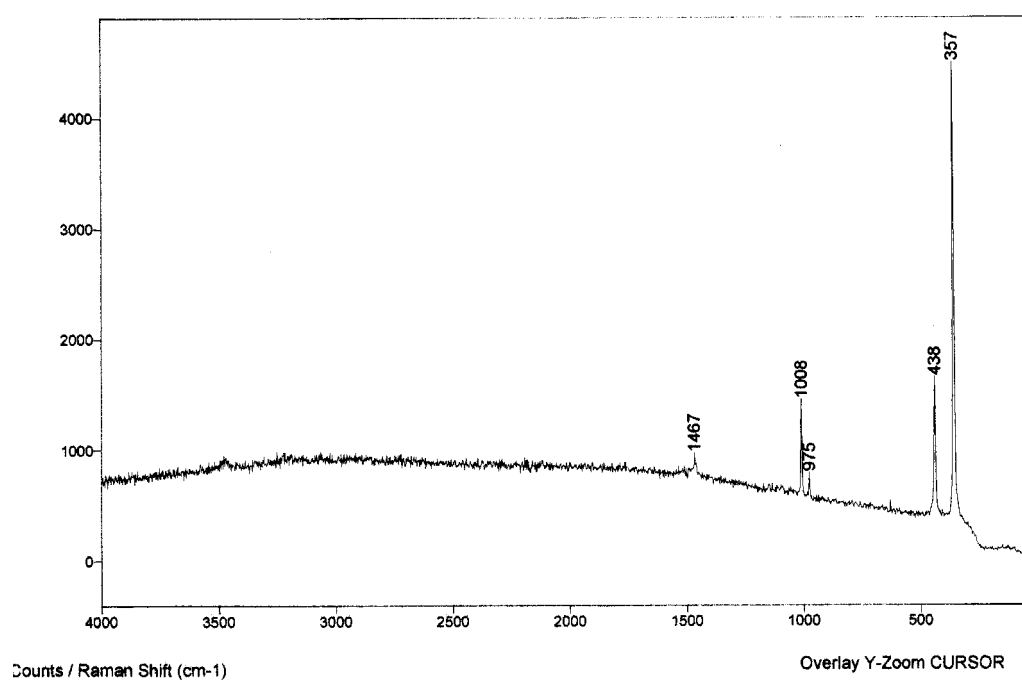
c : เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาในสภาวะ O 1000/300/2

d : เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาในสภาวะ N 1000/300/2

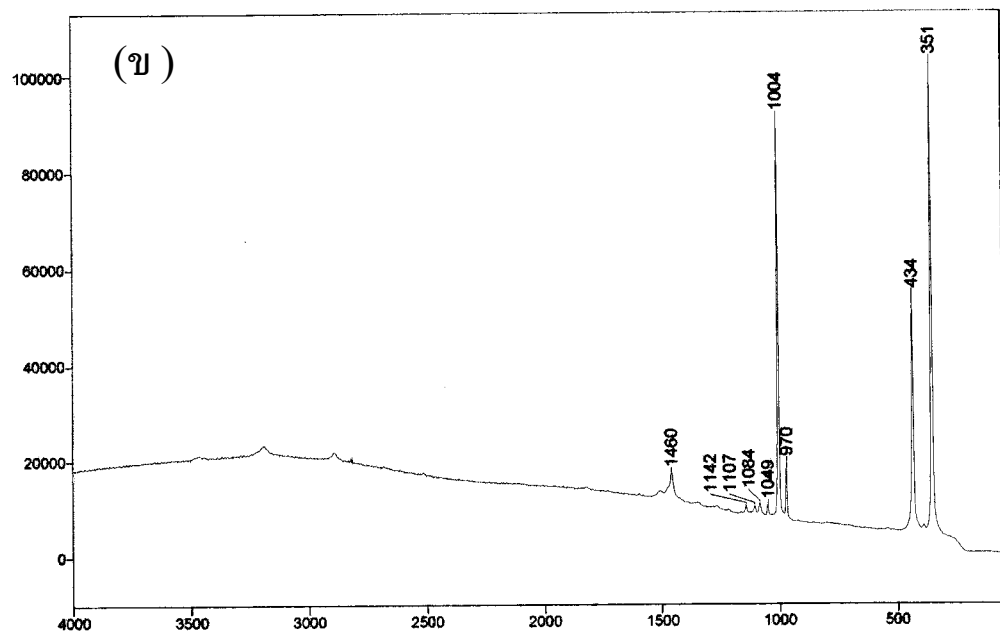
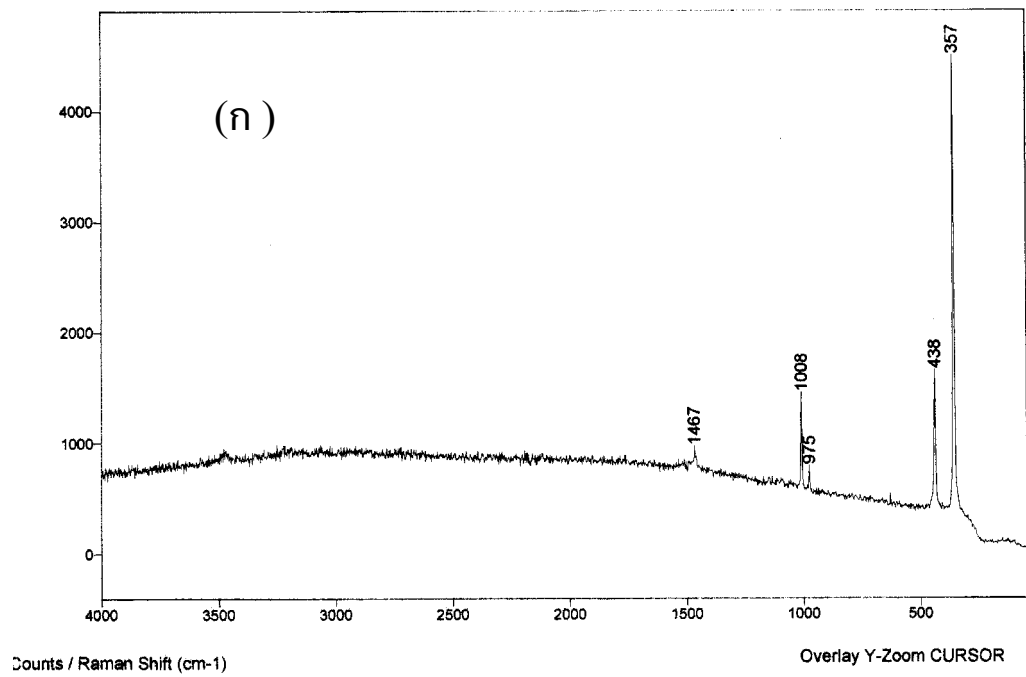
e : เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาในสภาวะ R 1000/300/2



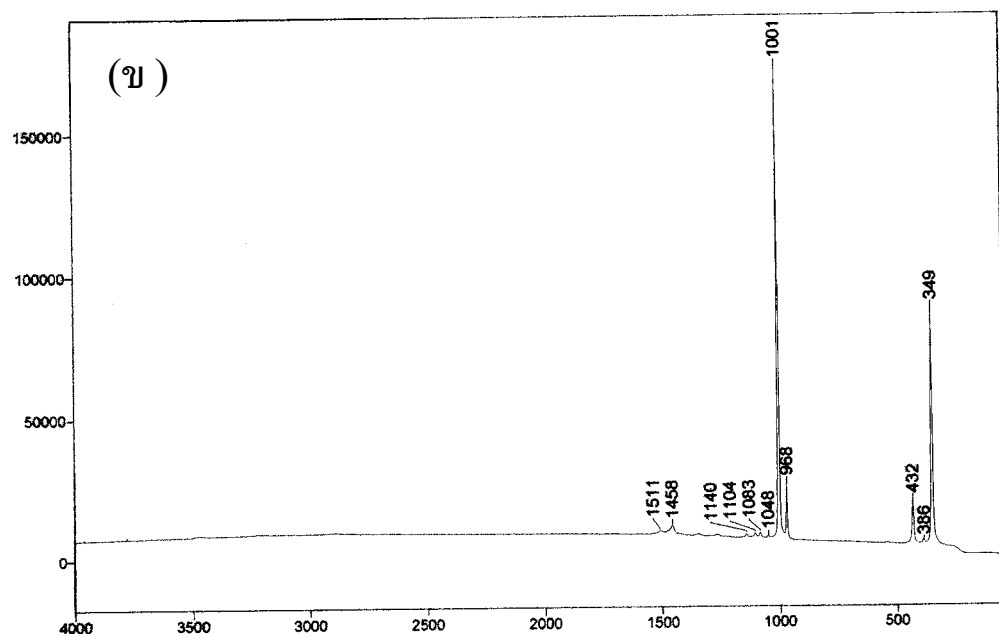
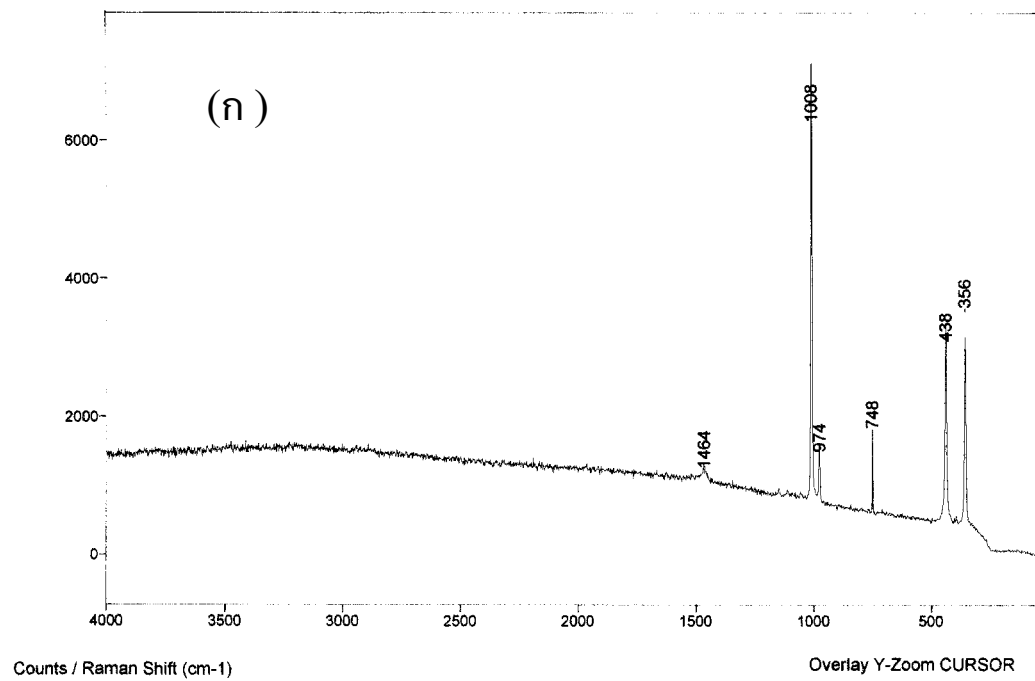
รูปที่ 17 รามานสเปกตรัม (ก) เซอร์คอนก่อนเผา (ข) เซอร์คอนที่เผาในสภาวะบรรยากาศแบบ
อากาศที่ 1000 องศาเซลเซียส : A 1000/300/2



รูปที่ 18 รามานสเปกตรัม (ก) เซอร์คอนก่อนเผา (ข) เซอร์คอนที่เผาในสภาวะบรรยากาศแบบ
เฉื่อยที่ 1000 องศาเซลเซียส : N 1000/300/2



รูปที่ 19 รามานสเปกตรัม (ก) เซอร์คอนก่อนเผา (ข) เซอร์คอนที่เผาในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียส : O 1000/300/2



รูปที่ 20 รามานสเปกตรัม (ก) เซอร์คอนก่อนเผา (ข) เซอร์คอนที่เผาในสภาวะบรรยากาศแบบ
รีดักชันที่ 1000 องศาเซลเซียส : R 1000/300/2

4.4.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

พลอยที่ใช้เป็นตัวอย่างในการบันทึกสเปกตรัมเป็นพลอยแหล่งรัตนกิริที่เผาใน

สภาวะบรรยากาศรีดักชันอุณหภูมิ 300-1000 °C สเปกตรัมทุกอันมีลักษณะเหมือนกันและเหมือนกับสเปกตรัมของพลอยก่อนเผา (รูปที่ 21-29) สเปกตรัมอินฟราเรดไม่ให้อะไรที่เป็นประโยชน์ จึงไม่ได้บันทึกสเปกตรัมอินฟราเรดของพลอยที่เหลือ

4.4.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเซอร์คอนก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศในตารางที่ 1 ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก. ทุกสเปกตรัมของพลอยก่อนเผามีแถบการดูดกลืนเกิดขึ้นในช่วง 490-510 nm ลักษณะของแถบดูดกลืนกว้างมากอาจเป็นผลมาจาก color center ส่วนสเปกตรัมของเซอร์คอนที่เผาแล้วในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบออกซิเดชันมีลักษณะเหมือนกันคือ แถบดูดกลืนที่ 490-510 nm ค่อยๆหายไปและหายไปหมดเมื่อพลอยเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 900 °C รูปที่ 29 เปรียบเทียบสเปกตรัมของเซอร์คอนที่เผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 500°C จะเห็นว่าแถบที่ 490-510 nm หายไป แสดงว่าศูนย์กลางสี (color center) ถูกทำลายด้วยความร้อนซึ่งอาจกลายเป็นศูนย์กลางสีที่มีพลังงานสูงขึ้น ทำให้น้ำตาลหายไป เมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 800°C ก็ไม่มีแถบใหม่เกิดขึ้นในบริเวณ 600-700 nm

สเปกตรัมดูดกลืนของเซอร์คอนที่เผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน มีลักษณะแตกต่างกันตามอุณหภูมิการเผาดังนี้

1. เมื่อเผาที่ 400-700 °C สีของพลอยเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นไม่มีสี แถบดูดกลืนที่ 490-510 nm ค่อยๆหายไป (รูปที่ 30) นั่นคือแถบดูดกลืนหายไปพร้อมศูนย์กลางสีที่มีสีน้ำตาล ทฤษฎีที่เกี่ยวกับศูนย์กลางสีได้กล่าวไว้ว่า เมื่ออนุภาคที่มีประจุเช่นอิเล็กตรอนถูกยึดไว้และล้อมรอบด้วยอะตอมออกซิเจนในผลึก อนุภาคนั้นสามารถดูดกลืนแสงได้ทำให้เกิดสีได้จึงเรียกว่า ศูนย์กลางสี (color center) เมื่อได้รับความร้อนศูนย์กลางสีนี้ถูกทำลายได้ (Faulkner and Shigley, 1989) ดังนั้นจึงน่าจะสรุปได้ว่า แถบดูดกลืนนี้ที่ 440-510 nm เกี่ยวข้องกับสีน้ำตาลของเซอร์คอน

2. เมื่อเผาที่ 800-900 °C สีของพลอยเปลี่ยนเป็นไม่มีสี ในสเปกตรัมเกิดชุดของพีคเล็กๆจำนวนมาก ในช่วง 400-750 nm โดยมีพีคแหลมที่มีความเข้มต่ำที่ 653 nm (รูปที่ 31) พีคเหล่านี้คือ jailhouse peak เมื่อดูจากกล้องสเปกโตรสโคป (spectroscope)

3. เมื่อเผาที่ 1000-1200 °C สีของพลอยเป็นสีฟ้ามีแถบดูดกลืนที่กว้างเกิดขึ้นที่ 653 nm (รูปที่ 33) เมื่อเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนจะไม่มีแถบดูดกลืนนี้เกิดขึ้น