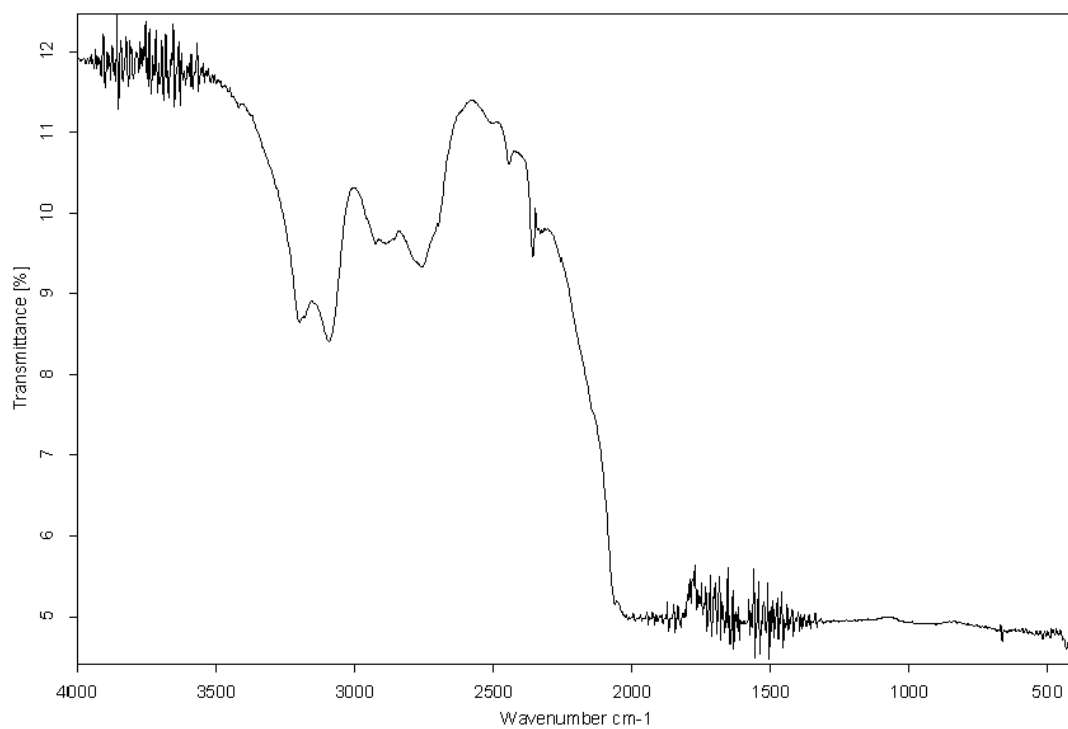
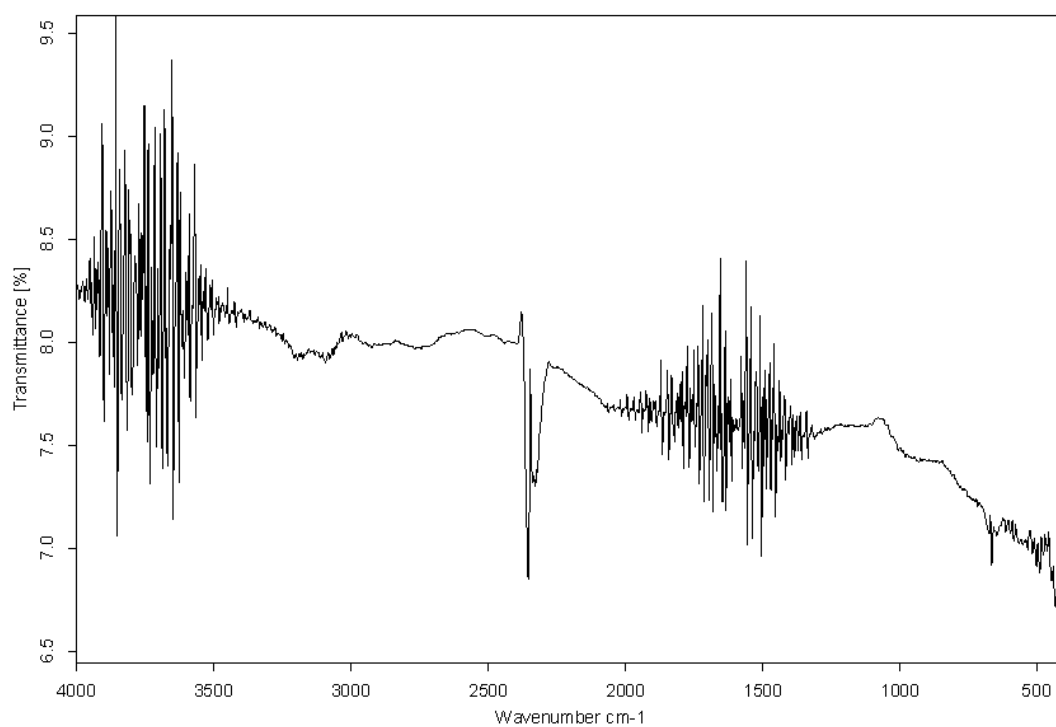


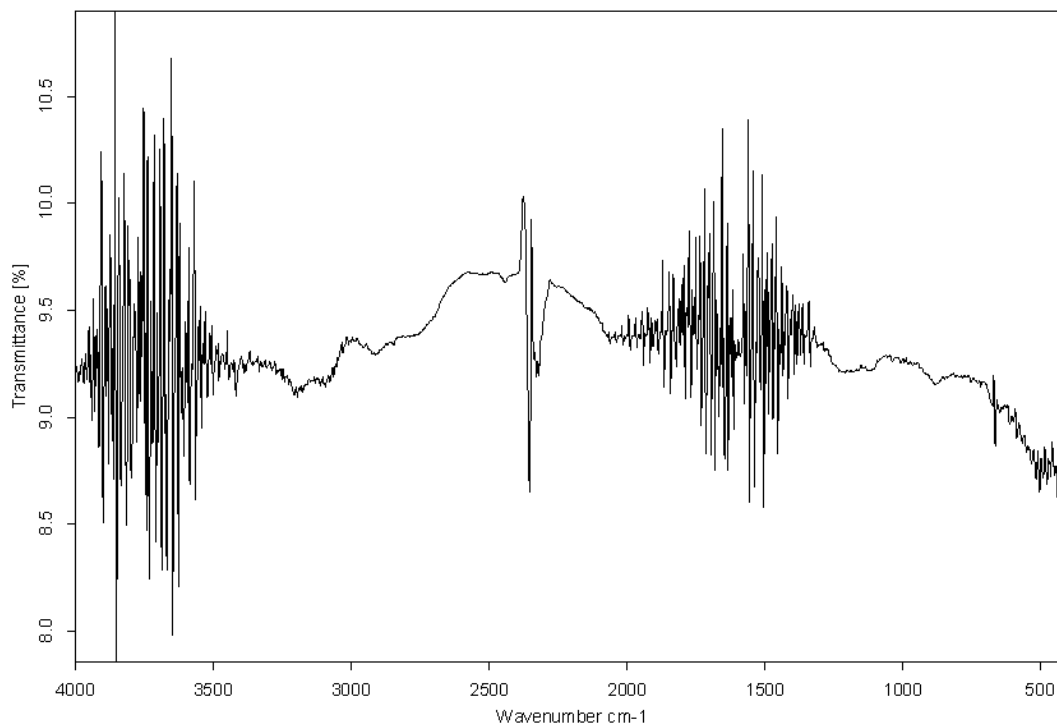


รูปที่ 21 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรันทันคิริก่อนเผา



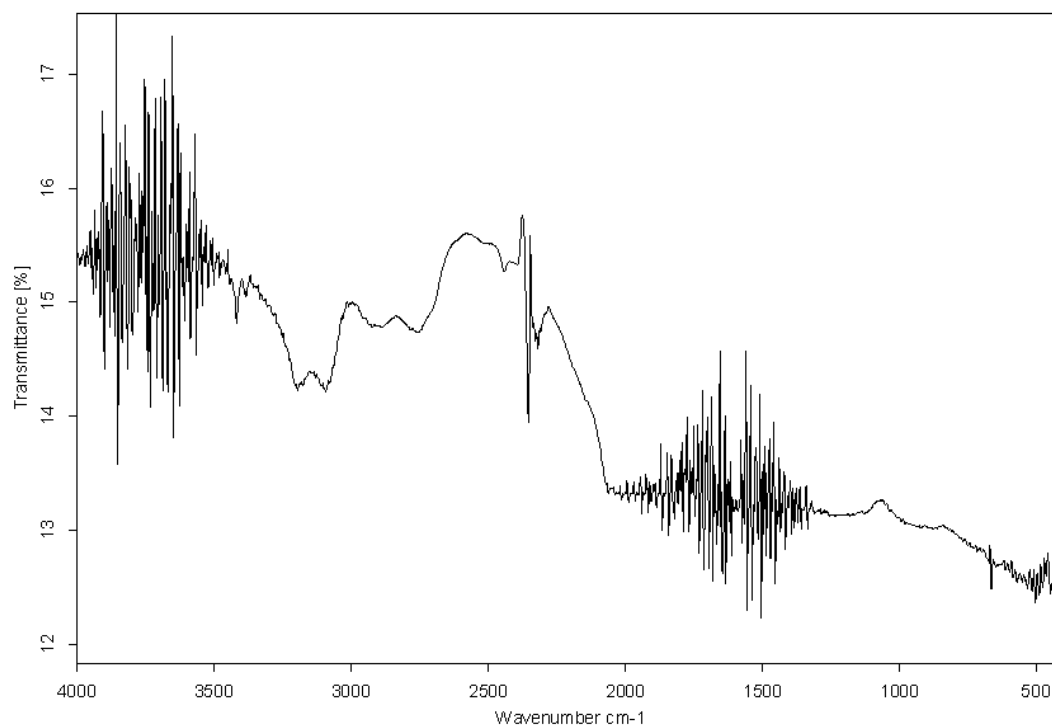
รูปที่ 22 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรันทันคิริหลังเผาที่สภาวะแบบบริดักชัน

R 300/300/2



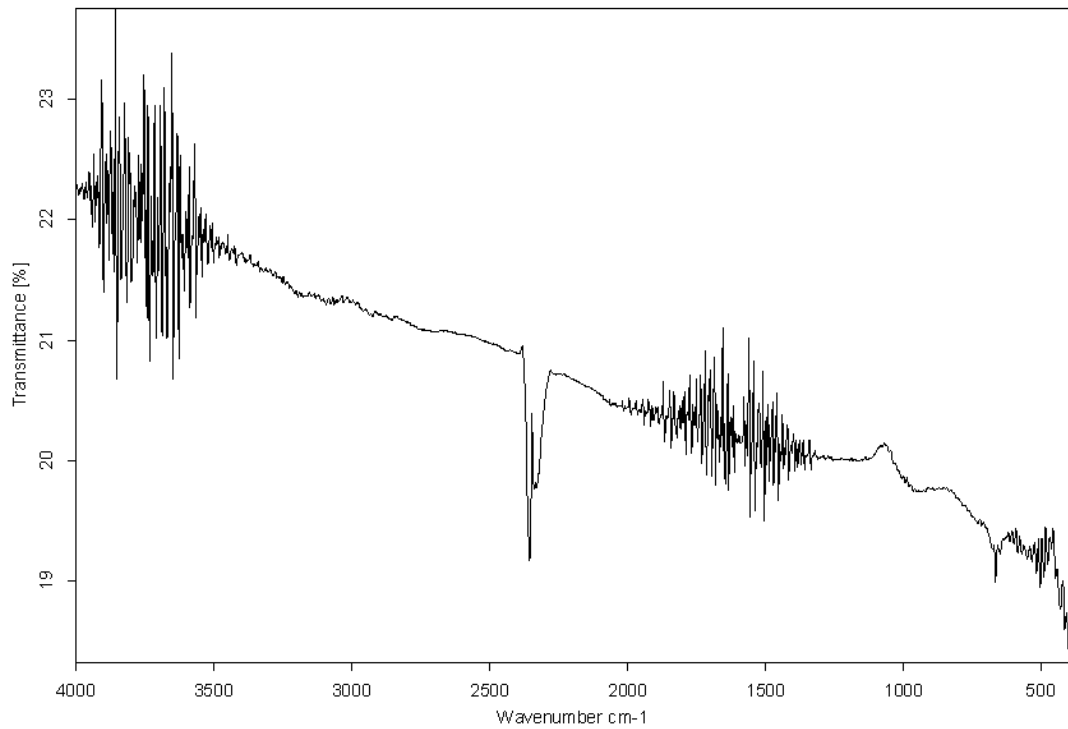
รูปที่ 23 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน

R 400/300/2

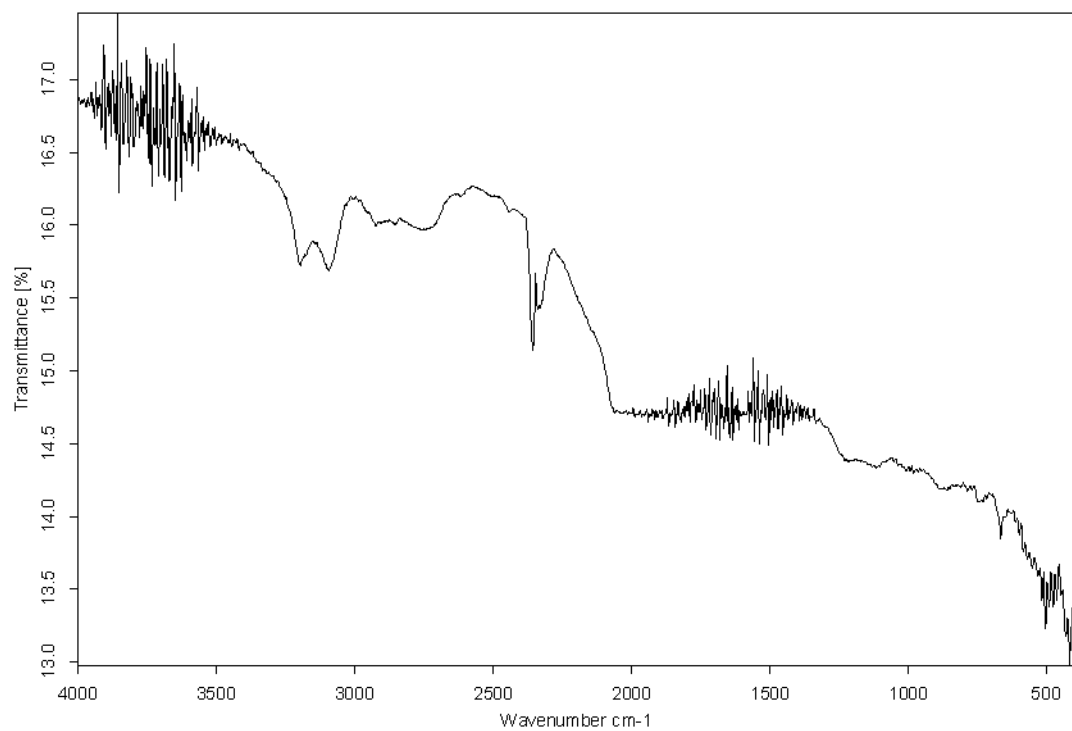


รูปที่ 24 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน

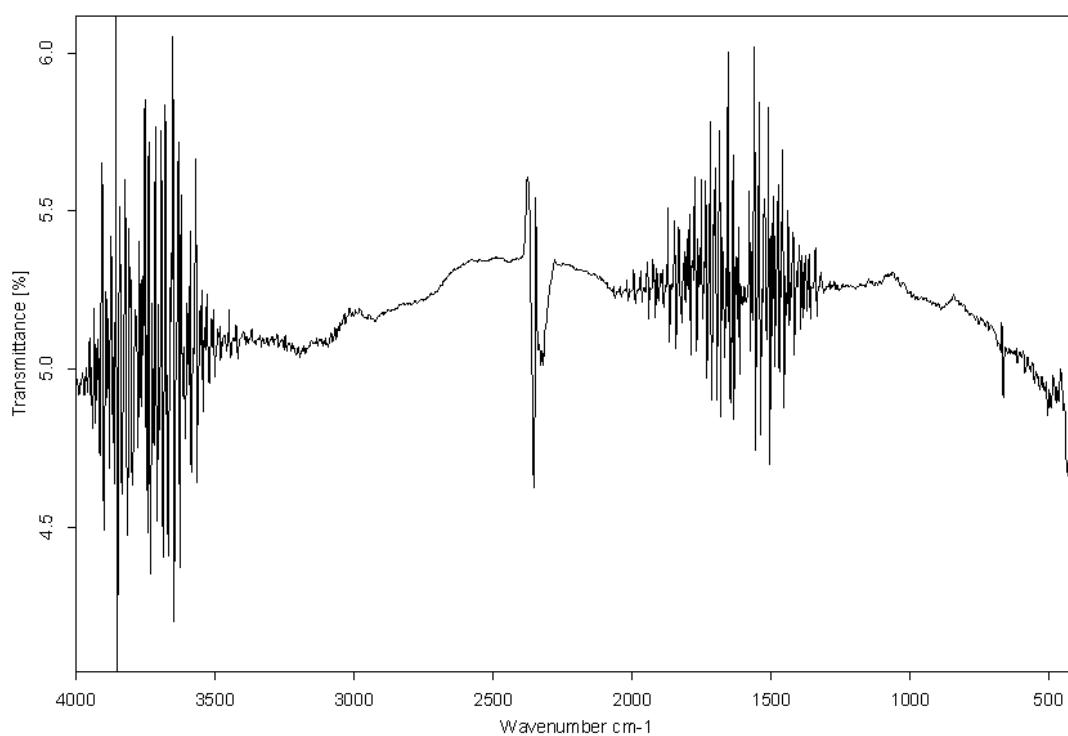
R 500/300/2



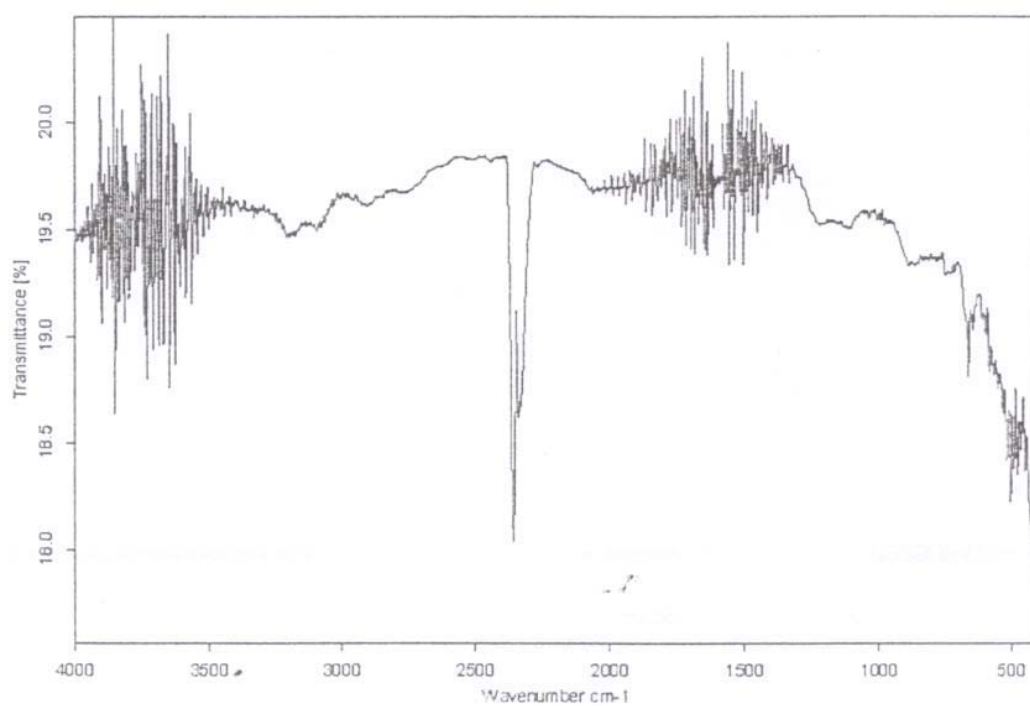
รูปที่ 25 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน
R 600/300/2



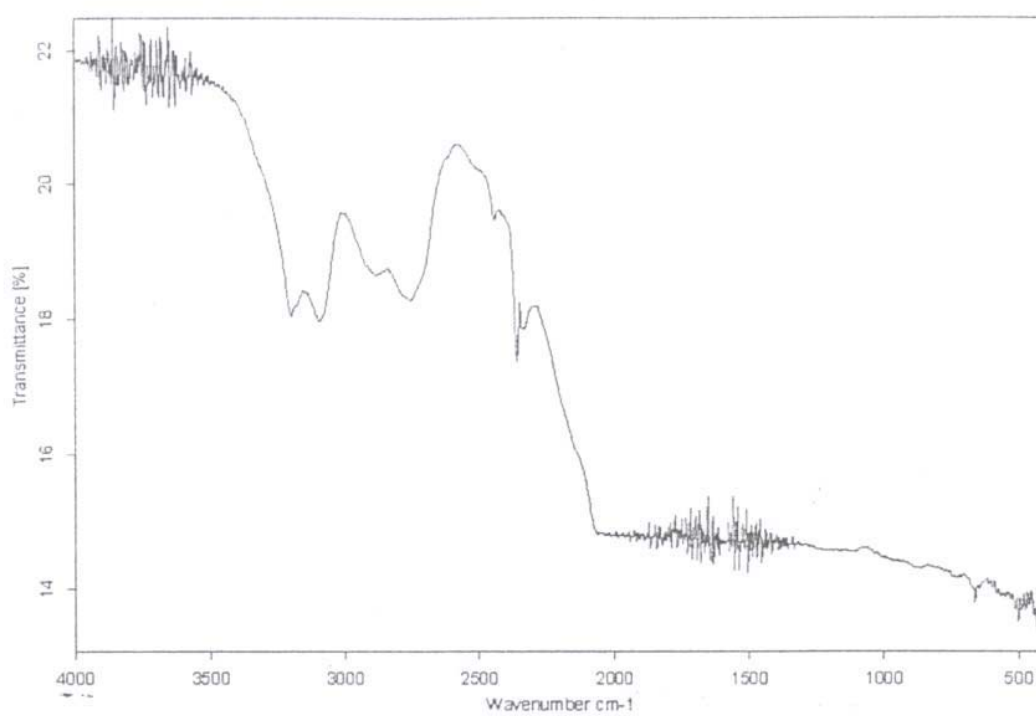
รูปที่ 26 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน
R 700/300/2



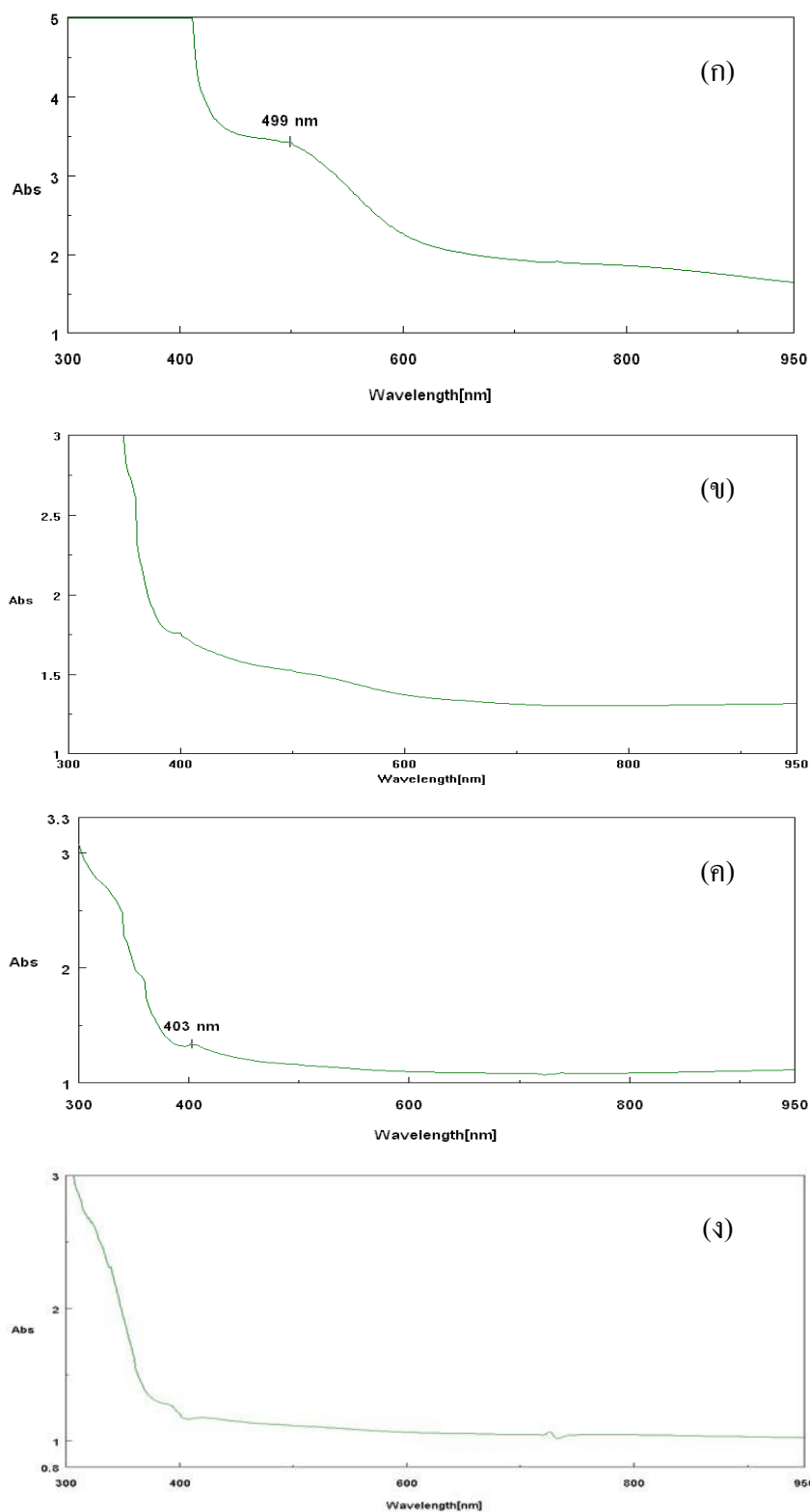
รูปที่ 27 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบบริดจ์ชัน
R 800/300/2



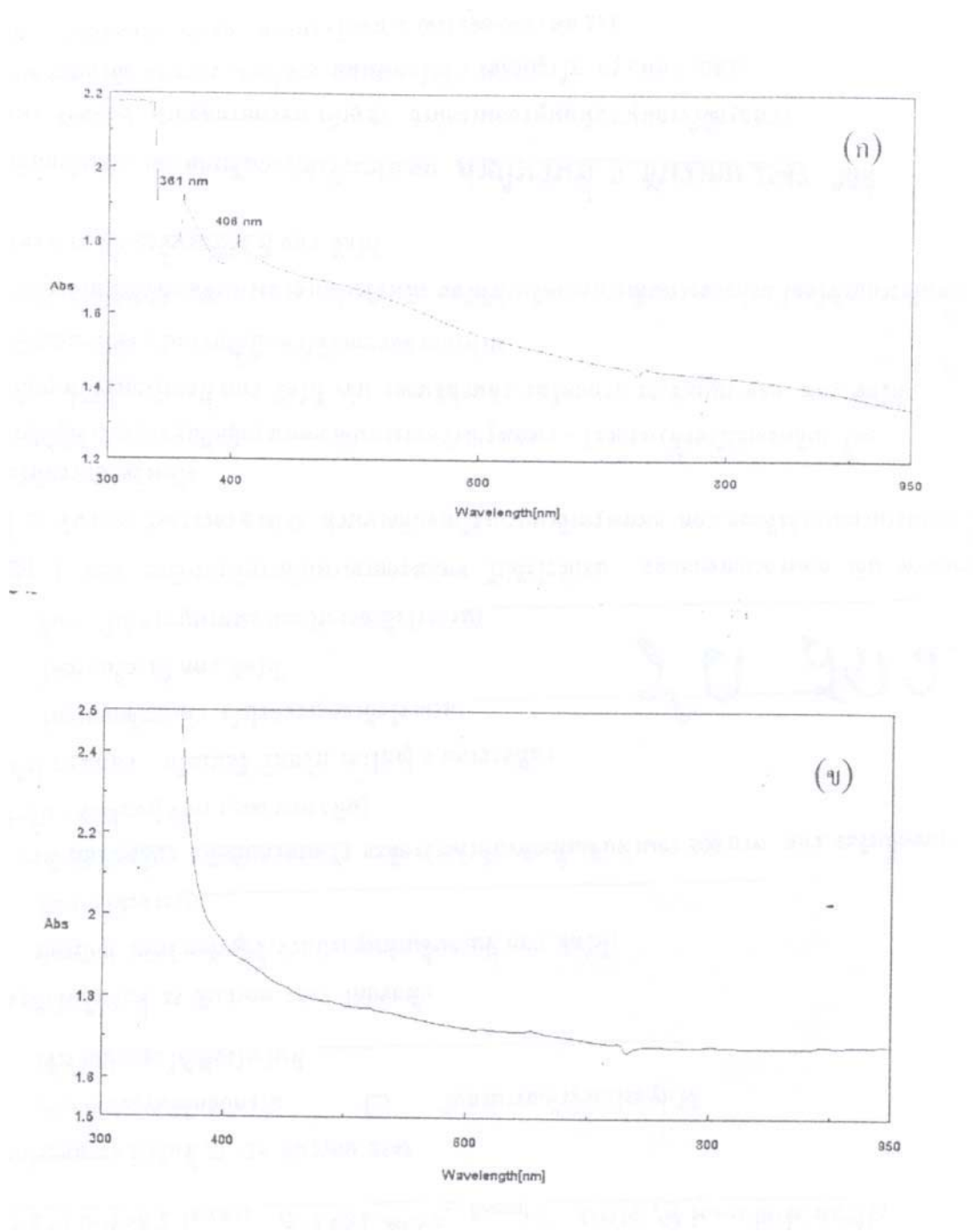
รูปที่ 28 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบบริดจ์ชัน
R 900/300/2



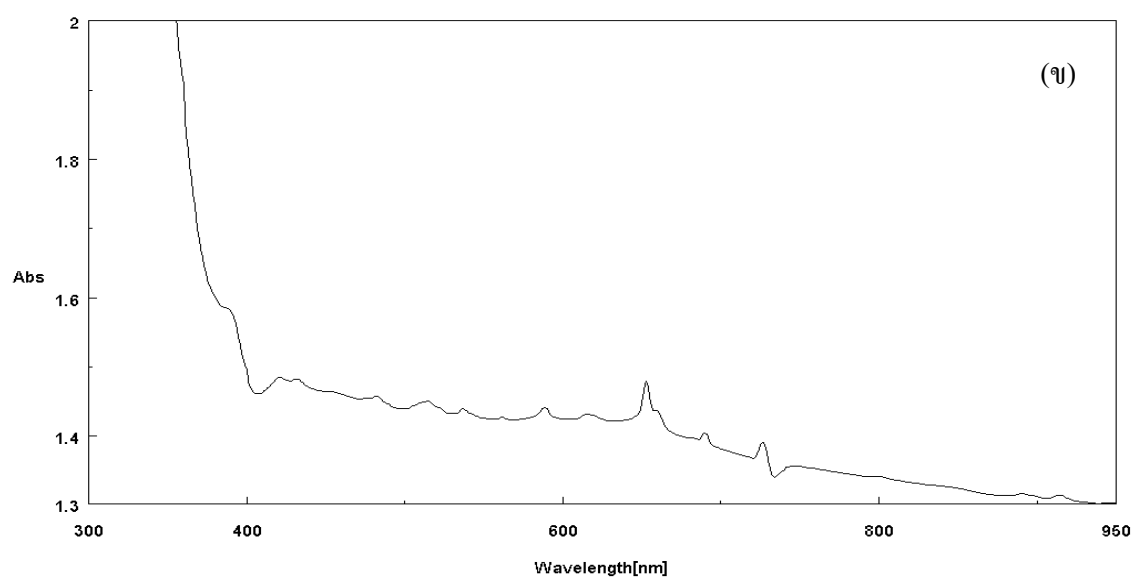
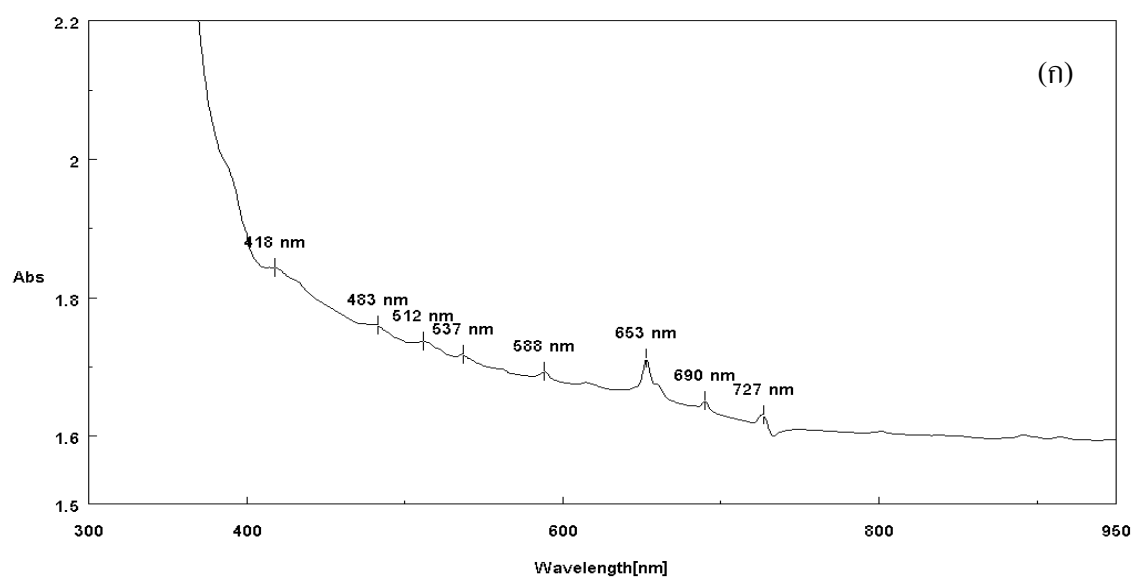
รูปที่ 29 อินฟราเรดสเปกตรัมของเซอร์คอนรัตนคีรีหลังเผาที่สภาวะแบบรีดักชัน
R 1000/300/2



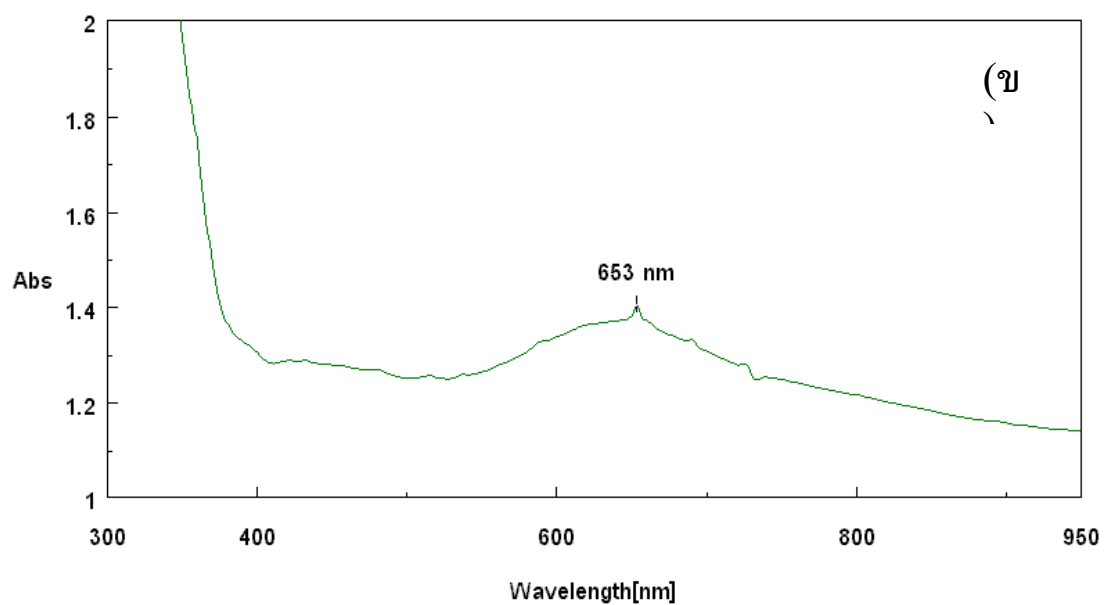
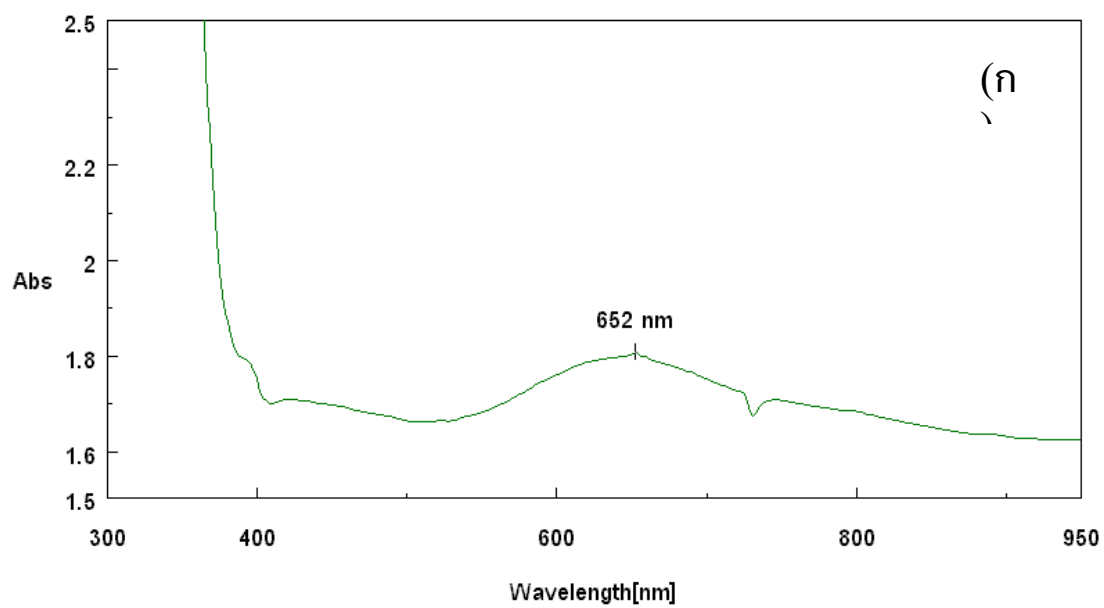
รูปที่ 30 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของฟลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผาที่สภาวะ A 500/300/2 (ค) ที่สภาวะ N 500/300/2 (ง) ที่สภาวะ O 500/300/2



รูปที่ 31 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาที่
สภาวะ (ก) R 300/300/2 (ข) R 700/300/2



รูปที่ 32 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาที่
สภาวะ (ก) R 800/300/2 (ข) R 900/300/2

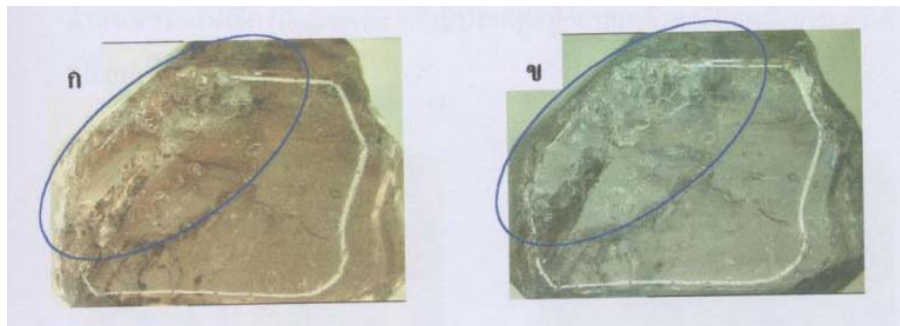


รูปที่ 33 เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของฟลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีหลังจากเผาที่
สภาวะ (ก) R 1000/300/2 (ข) R 1200/300/2

ตำหนิต่าง ๆ ที่พบในพลอยที่ทำการทดลองมีดังนี้

1. ตำหนิแถบสี

- ตำหนิแถบสีน้ำตาลที่ปรากฏอยู่ก่อนเผาได้หายไปหลังจากการเผา ดังรูปที่ 34

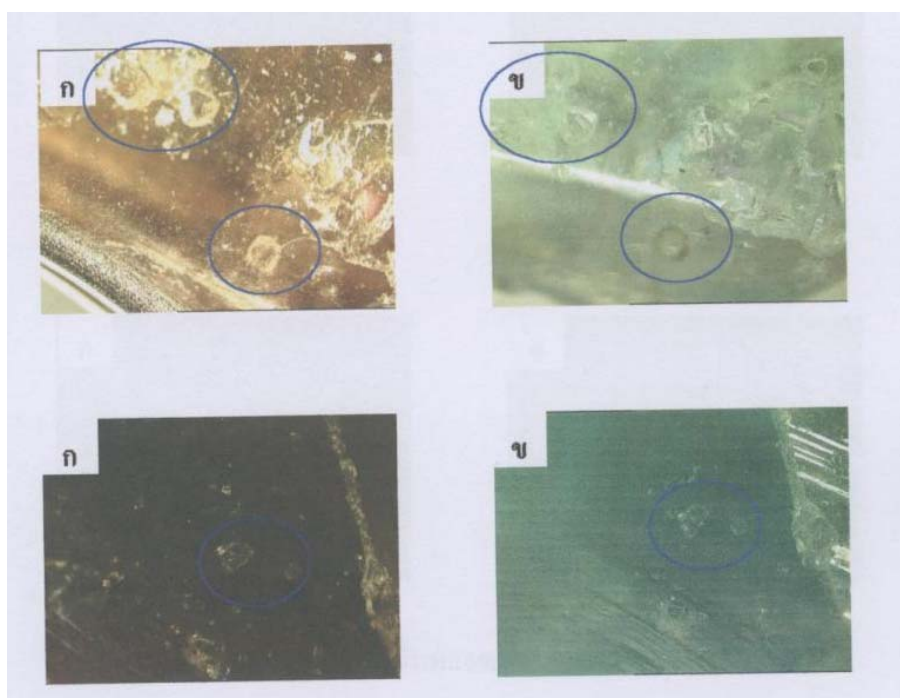


รูปที่ 34 ตำหนิแถบสีน้ำตาลในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี

ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา

2. ตำหนิของเหลว

- ตำหนิของเหลวยังคงมีปรากฏอยู่ทั้งก่อนเผาและหลังเผา ดังรูปที่ 35

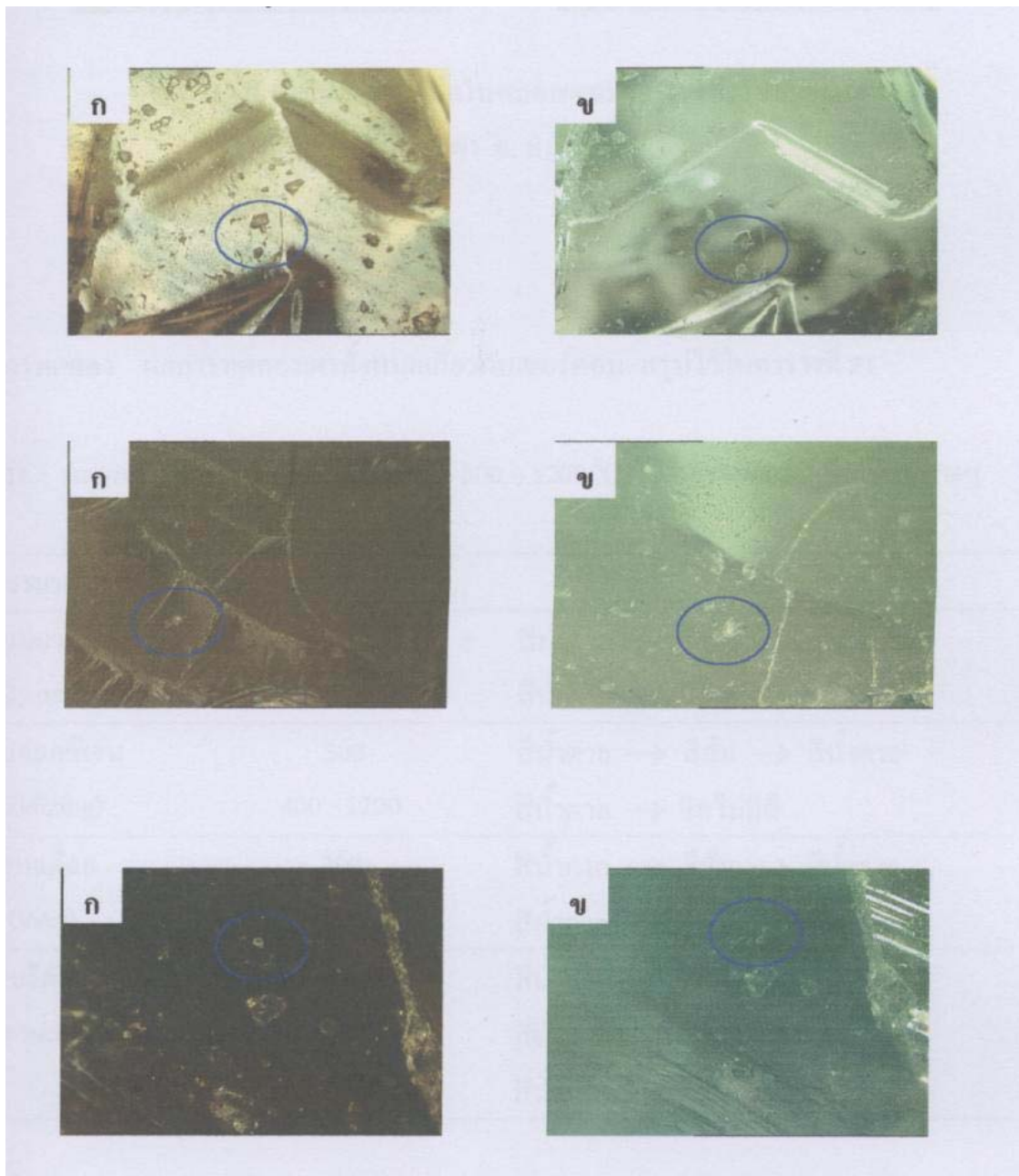


รูปที่ 35 ตำหนิของเหลวในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี

ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา

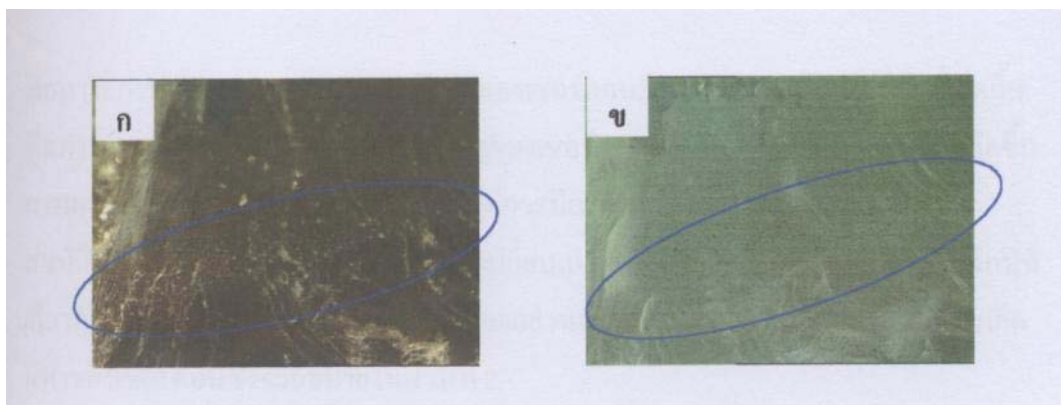
3. คำหนิของผลึก

- คำหนิของผลึกยังคงมีปรากฏอยู่ทั้งก่อนเผาและหลังเผา ส่วนรอยขรุขระที่ผิวหลังเผานั้นสมานกัน ทำให้ผิวพลอยเรียบขึ้น ดังรูปที่ 36
- คำหนิของแผงผลึก (fingerprint) ซึ่งมีปรากฏอยู่ก่อนเผายังคงมีอยู่หลังการเผาแต่เปลี่ยนเป็นสีดำ ดังรูปที่ 37



รูปที่ 36 คำหนิของผลึกในพลอยเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรี

ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา



รูปที่ 37 ตำแหน่งของแฟกซ์ในพอลิเมอร์คอนแทกซ์รัตนศิริ
ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา

สรุปผลการทดลอง ผลการทดลองเผาทั้งหมดเกี่ยวกับเซอร์คอน สรุปไว้ในตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ผลของการเผาเซอร์คอน ที่อุณหภูมิ 300 – 1200 °C ในสภาวะบรรยากาศแบบต่างๆ

บรรยากาศ	อุณหภูมิ	การเปลี่ยนสี
แบบอากาศ (slightly oxidizing)	300	สีน้ำตาล → สีส้ม → สีน้ำตาล
	400 - 1200	สีน้ำตาล → สีไม่มีสี
แบบออกซิเจน (oxidizing)	300	สีน้ำตาล → สีส้ม → สีน้ำตาล
	400 - 1200	สีน้ำตาล → สีไม่มีสี
แบบเฉื่อย (inert)	300	สีน้ำตาล → สีส้ม → สีน้ำตาล
	400 - 1200	สีน้ำตาล → สีไม่มีสี
แบบรีดักชัน (reducing)	300	สีน้ำตาล → สีส้ม → สีน้ำตาล
	400 – 800	สีน้ำตาล → สีไม่มีสี
	900 - 1200	สีน้ำตาล → สีฟ้า

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 แต่สมบัติ ทางสเปกโตรสโกปีที่เกี่ยวข้องกับการดูดกลืนแสงมรการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดและมีความสัมพันธ์กับการเกิดสีฟ้าของเซอร์คอนซึ่งจะอธิบายในส่วนของที่ 2
7. เมื่อเผาเซอร์คอนให้ได้สีฟ้าที่สภาวะรีดักชันเพื่อเพิ่มคุณภาพของพลอย พบว่าตำหนิแถบสีที่มีในเนื้อพลอยของเซอร์คอนนั้นหายไป ส่วนตำหนิของผลึกและของเหลวยังคงมีปรากฏอยู่หลังการเผาที่สภาวะนี้ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่ารอยขรุขระที่ผิว และใกล้ ๆ ที่ผิวนั้น หลอมรวมกันทำให้เนื้อของพลอยใสและเรียบขึ้นด้วย

2. ควอตซ์ (Quartz)

แร่ที่มีองค์ประกอบเป็นซิลิกา มีแร่หลายชนิด กลุ่มที่เกิดเป็นผลึกได้แก่ ควอตซ์ ทริโคไมท์ และคริสโตมาไลต์ ควอตซ์เป็นแร่ที่พบมากที่สุดในกลุ่มนี้ สมาชิกของแร่กลุ่มควอตซ์ประกอบด้วย SiO_2 ซึ่งอยู่ในรูปต่อไปนี้

(1) ผลึกขนาดใหญ่ เช่น rock crystal citrine และ amethyst

(2) Cryptocrystalline chalcedony, jasper, agate และ chrysoprase

ควอตซ์มีสูตรเคมีเป็น SiO_2 ควอตซ์บริสุทธิ์ไม่มีสีและใสคล้ายน้ำแข็ง เมื่อมีธาตุอื่นปนอยู่ในโครงผลึกจะมีสีต่าง ๆ กัน เช่น ควอตซ์สีม่วงเรียกว่า amethyst ควอตซ์สีเหลืองเรียกว่า citrine ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ควอตซ์เกิดเป็นผลึกที่มีระบบผลึกแบบ trigonal เรียกว่า α -quartz ซึ่งซิลิกอนเกิดพันธะกับออกซิเจน 4 อะตอมแบบเตตระฮีดรอล ที่อุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการจัดตัวใหม่เพื่อให้โครงสร้างมีสมมาตรมากขึ้น เกิดเป็นโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล (hexagonal) เรียกว่า β -quartz ควอตซ์มีความแข็งเท่ากับ 7 Mohr scale ความถ่วงจำเพาะ 2.65 ค่าดัชนีหักเห 1.544-1.553 ควอตซ์ทั่วไปมีลักษณะเป็นแท่งหกเหลี่ยม ขาวแหลมทั้งหัวและท้าย บางครั้งเกิดเป็นผลึกแผ่

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ควอตซ์ไม่มีสี (rock crystal) เป็นตัวอย่าง ได้ทำการเผาเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของควอตซ์เมื่อเผาในสภาวะบรรยากาศต่าง ๆ

วิธีทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

แช่พลอยตัวอย่างในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) แล้วนำมาล้างให้สะอาด

2. การเผาควอตซ์

อุณหภูมิที่ทำการทดลองเริ่มที่ 300 ถึง 800°C ใช้ตัวอย่างควอตซ์ครั้งละ 3-5 ชิ้น แต่ละเม็ดเผาเพียงครั้งเดียว สภาวะการเผาที่ทำการทดลองได้สรุปไว้ในตาราง 22

3. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

3.1 สมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพ

ตรวจสอบสมบัติทางอัญมณีของควอตซ์ทุกเม็ดก่อนและหลังเผา วัดสมบัติทางแสงและการเกิดฟลูออเรสเซนซ์ภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลตคลื่นสั้น (254 nm) และคลื่นยาว (356 nm) และหาความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 22 รหัสการเผาควอทซ์

รหัสการเผา			
A	N	O	R
A 300/300/2	N 300/300/2	O 300/300/2	R 300/300/2
A 400/300/2	N 400/300/2	O 400/300/2	R 500/300/2
A 500/300/2	N 500/300/2	O 500/300/2	R 600/300/2
A 600/300/2	N 600/300/2	O 600/300/2	R 800/300/2
A 700/300/2	N 700/300/2	O 700/300/2	
A 800/300/2	N 800/300/2	O 800/300/2	
A 500/300/10	N 500/300/10		

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ทำการบันทึกสเปกตรัม XRF โดยวางพลอยให้อยู่ระหว่างแผ่นฟิล์มโพลิโพรพิลีนในถ้วยสำหรับวางตัวอย่าง ปล่องรังสี X จากหลอดผ่านตัวอย่าง ใช้วิธีวิเคราะห์แบบไม่มีพลอยมาตรฐาน (Standardless Method) คำนวณปริมาณธาตุเป็นเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์

3.3 การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี

ในการบันทึกสเปกตรัมของควอทซ์ก่อนเผาและหลังเผาได้วางตัวอย่างพลอยในตำแหน่งและลักษณะทิศทางเดิม เพื่อให้เป็นผลการเปรียบเทียบจากตำแหน่งเดียวกัน

3.3.1 Raman Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $0-4000\text{ cm}^{-1}$

3.3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $500-4000\text{ cm}^{-1}$

3.3.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $200-1100\text{ nm}$

ผลการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

ควอทซ์ที่ล้างแล้วมีลักษณะใสไม่มีสี มีรอยแตกภายในเล็กน้อยต่างกันในแต่ละชิ้น

2. การเผาควอทซ์

การเผาควอทซ์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ 600-800 °C แห่พลอย 2 ชั่วโมง ทั้งในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย แบบออกซิเดชัน แบบอากาศ และแบบรีดักชัน ทำให้เกิดสีแดงที่ผิว (ตารางที่ 23-26) และพบว่าการเผาควอทซ์ทำให้เกิดรอยแตกในเนื้อพลอยมากขึ้น ตามทฤษฎีการเผาควอทซ์ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในงานวิจัยได้เผาควอทซ์เพื่อเก็บเป็นข้อมูลตามทำงานวิจัยนี้ได้เสนอไว้ และต้องการดูว่าความร้อนจะทำให้เกิดการสมานของรอยแตกหรือไม่ จากผลการเผาพบว่าวิธีเผานี้ไม่ทำให้เกิดการสมานผิวของรอยแตก

ตารางที่ 23 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ เพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 300/300/2	ความขุ่นลดลงและมีรอยแตกเกิดขึ้น
A 400/300/2	ไม่พบความเปลี่ยนแปลง
A 500/300/2	ความขุ่นลดลงและมีรอยแตกเกิดขึ้น
A 600/300/2	มีสีแดงที่ผิว
A 700/300/2	มีสีแดงที่ผิว
A 800/300/2	ความขุ่นมากขึ้น

ตารางที่ 24 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศเฉื่อย เพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
N 300/300/2	ไม่พบความเปลี่ยนแปลง
N 400/300/2	ไม่พบความเปลี่ยนแปลง
N 500/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น
N 600/300/2	มีสีแดงที่ผิว
N 700/300/2	พลอยแตกออก
N 800/300/2	มีรอยแตกมากขึ้น

ตารางที่ 25 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน เพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
O 300/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว
O 400/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว
O 500/300/2	พลอยใสขึ้น มีสีแดงที่ผิว
O 600/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว
O 700/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว
O 800/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว

ตารางที่ 26 ลักษณะของควอทซ์หลังการเผาในบรรยากาศออกซิไดซ์ เพื่อหาอุณหภูมิการเผา

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตพบ
R 300/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น
R 500/300/2	ความขุ่นมากขึ้น มีรอยแตกเกิดขึ้น
R 600/300/2	ความขุ่นมากขึ้น มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว
R 800/300/2	มีรอยแตกเกิดขึ้น มีสีแดงที่ผิว

3. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

3.1 สมบัติทางอัญมณี และทางกายภาพของควอทซ์

ควอทซ์ที่ไม่ได้เผามีสมบัติทางแสงแบบหักเหคู่ (Double Refractive, DR) มีค่าดัชนีหักเห 1.540 - 1.553 ค่าความถ่วงจำเพาะที่หาได้อยู่ในช่วง 2.614 - 2.670 ไม่มีการเรืองแสงในช่วงความยาวคลื่นยาว (366 nm) และในช่วงความยาวคลื่นสั้น (254 nm) ควอทซ์ที่เผาแล้วมีสมบัติทางอัญมณี และทางกายภาพเหมือนก่อนเผา ค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.545 - 1.551 ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 2.602 - 2.645 และไม่มีการเรืองแสงในช่วง UV

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าควอทซ์มีซิลิกอนเป็นองค์ประกอบหลัก และมีธาตุอื่น ๆ เช่น MgO K₂O CaO และ CuO ในปริมาณน้อย (ตารางที่ 27)

ตารางที่ 27 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุในควอทซ์

	SiO ₂	MgO	K ₂ O	CaO	CuO
ควอทซ์	99.486	0.302	0.121	0.091	trace

3.3 การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโกปี

3.3.1 Raman Spectroscopy

พีกในสเปกตรัมรามานของควอทซ์ (รูปที่ 38) เกิดจากการสั่นของพันธะ Si—O การสั่นแบบยืดและหดของพันธะ Si—O ใช้พลังงานในช่วง $900 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ และการบิดของมุมพันธะ Si—O—Si และ O—Si—O เกิดในช่วง $400 - 800 \text{ cm}^{-1}$ และ $600 - 800 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสเปกตรัมรามานของควอทซ์ก่อนและหลังเผาทุกสภาวะไม่แตกต่างกัน สเปกตรัมรามานของควอทซ์ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ง

3.3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

เนื่องจากสเปกตรัมอินฟราเรดไม่ให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการเผา และการเผาควอทซ์ไม่แสดงการเปลี่ยนสี สเปกตรัมอินฟราเรดจึงให้ผลเหมือนกันทั้งก่อนและหลังเผา (รูปที่ 39) แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของควอทซ์ก่อนเผาและหลังเผา

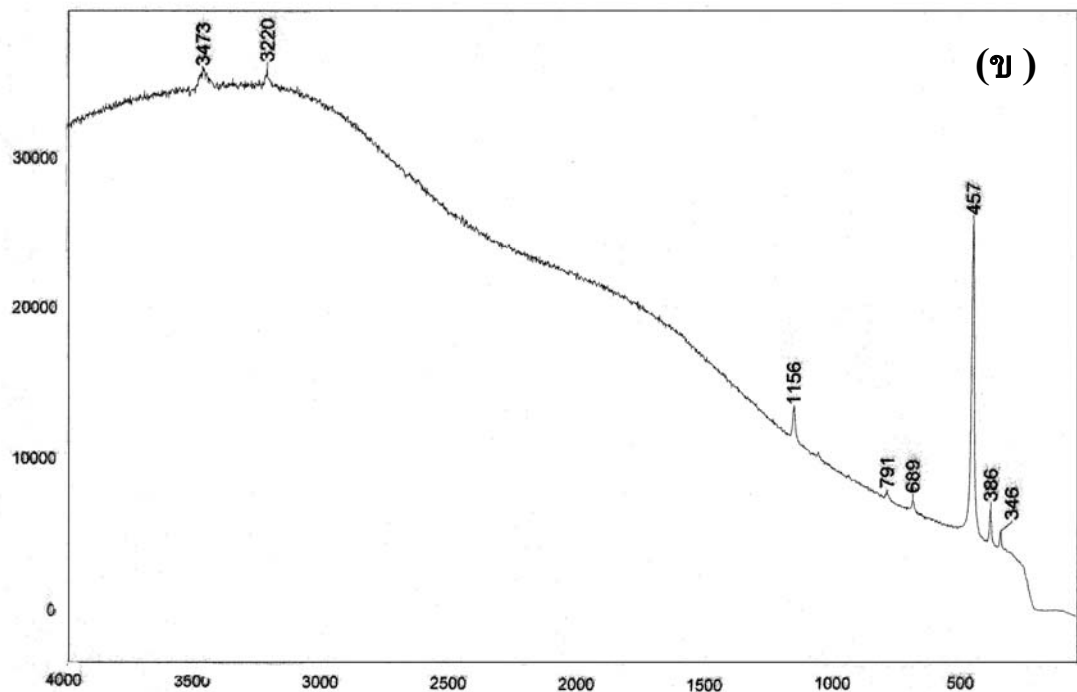
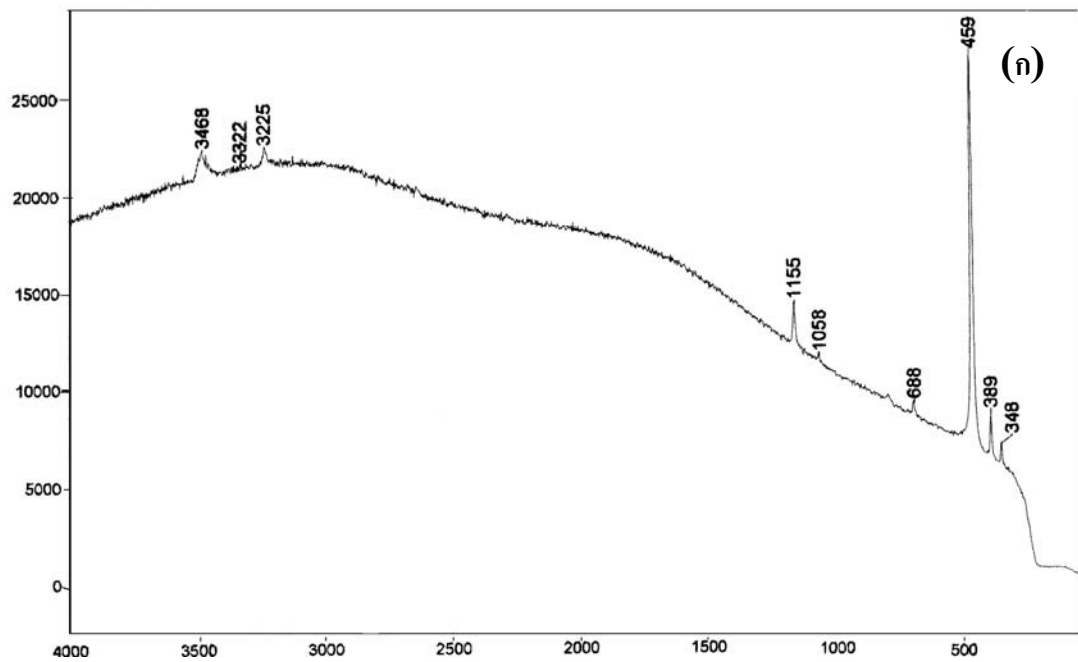
3.3.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

สเปกตรัมดูดกลืนแสงของควอทซ์ก่อนเผาก็มีแถบกว้างและความเข้มต่ำ อยู่ที่ประมาณ $500 - 550 \text{ nm}$ เมื่อเผาแล้วแถบนี้จะหายไป แถบนี้อาจใช้เป็นตัวชี้ว่าควอทซ์ถูกเผาแล้วหรือไม่ (รูป 40-47) เปรียบเทียบสเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะต่าง ๆ ซึ่งได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ค

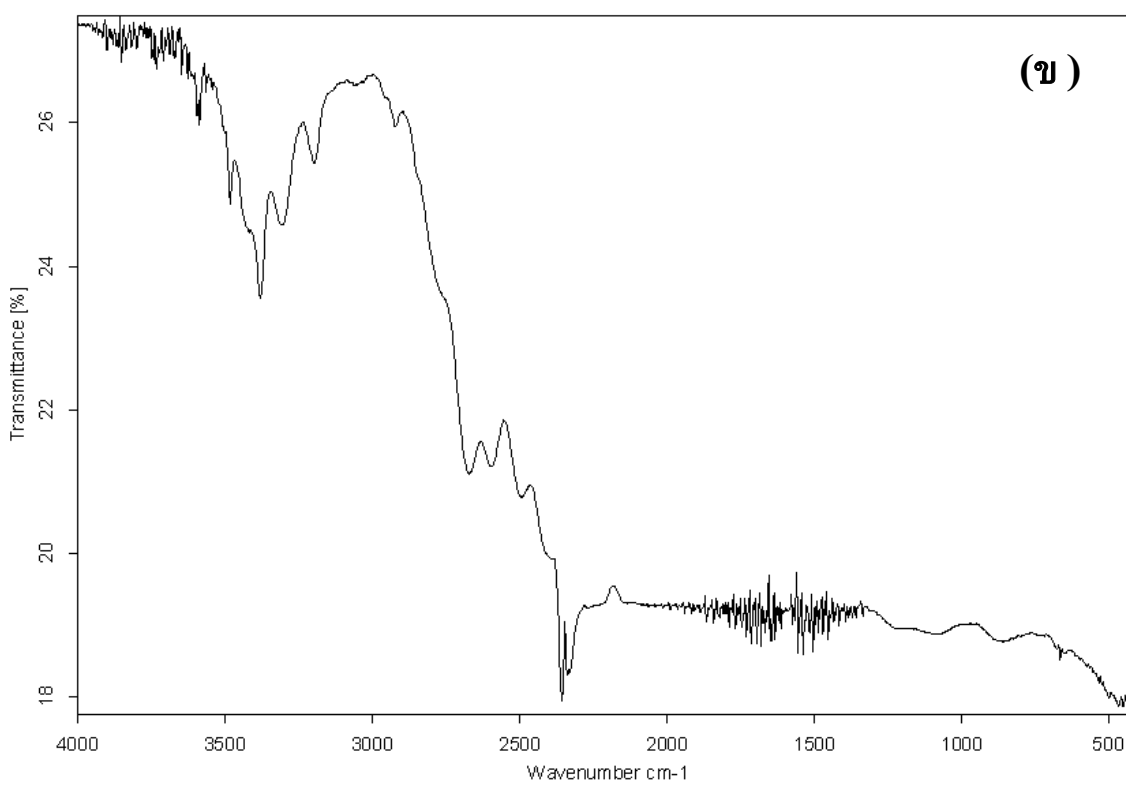
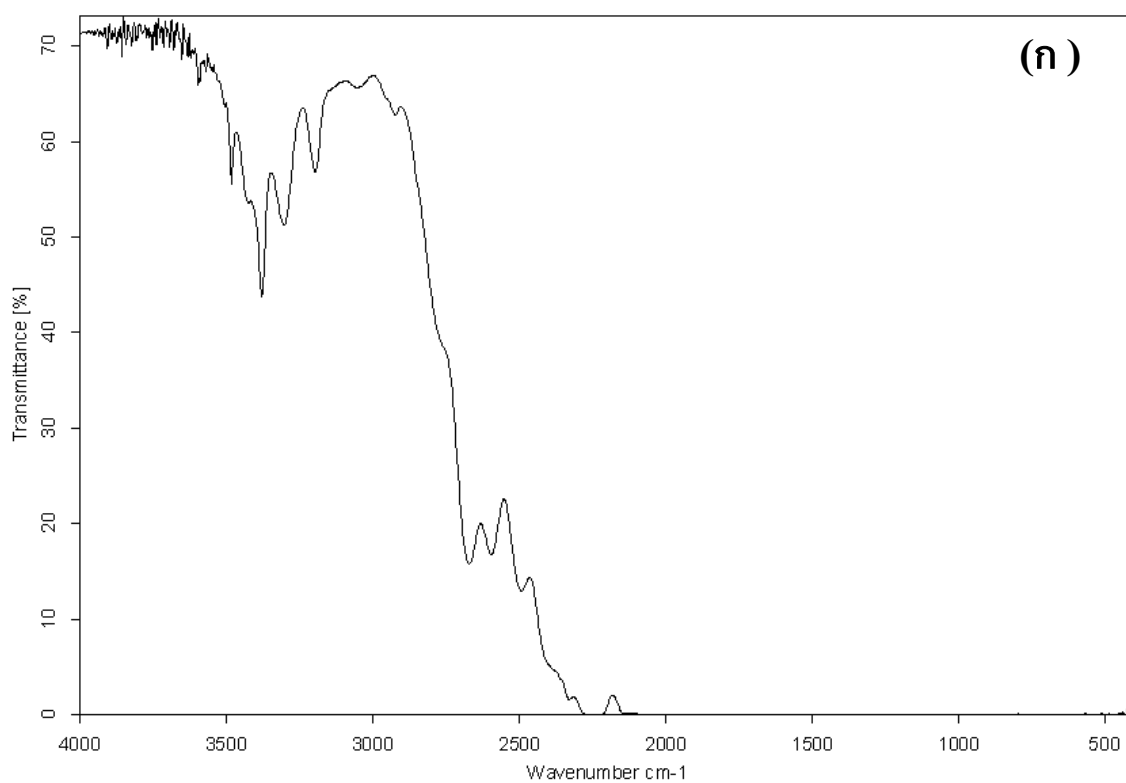
สรุปผลการทดลอง

จากผลการเผาสรุปได้ว่า

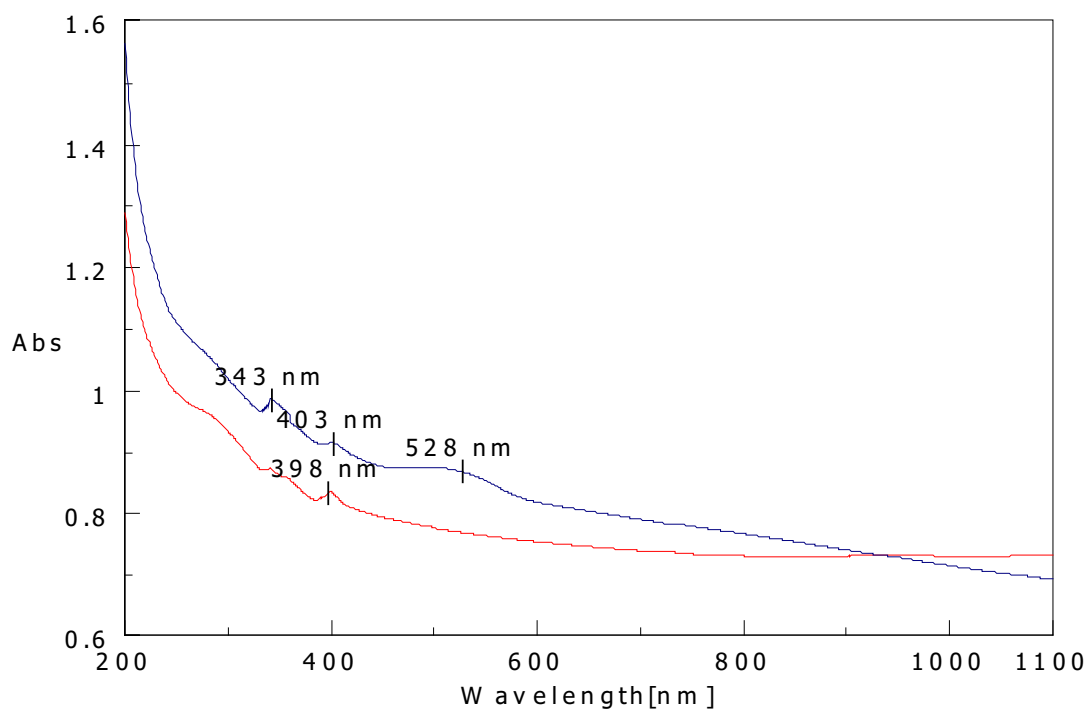
1. การเผาไม่ทำให้ควอทซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพ และทางเคมี
2. ตำแหน่งของแถบกว้างในสเปกตรัมดูดกลืนแสงช่วง $500 - 550 \text{ nm}$ อาจเป็นตัวชี้ว่าควอทซ์ถูกเผาหรือไม่
3. ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผาควอทซ์



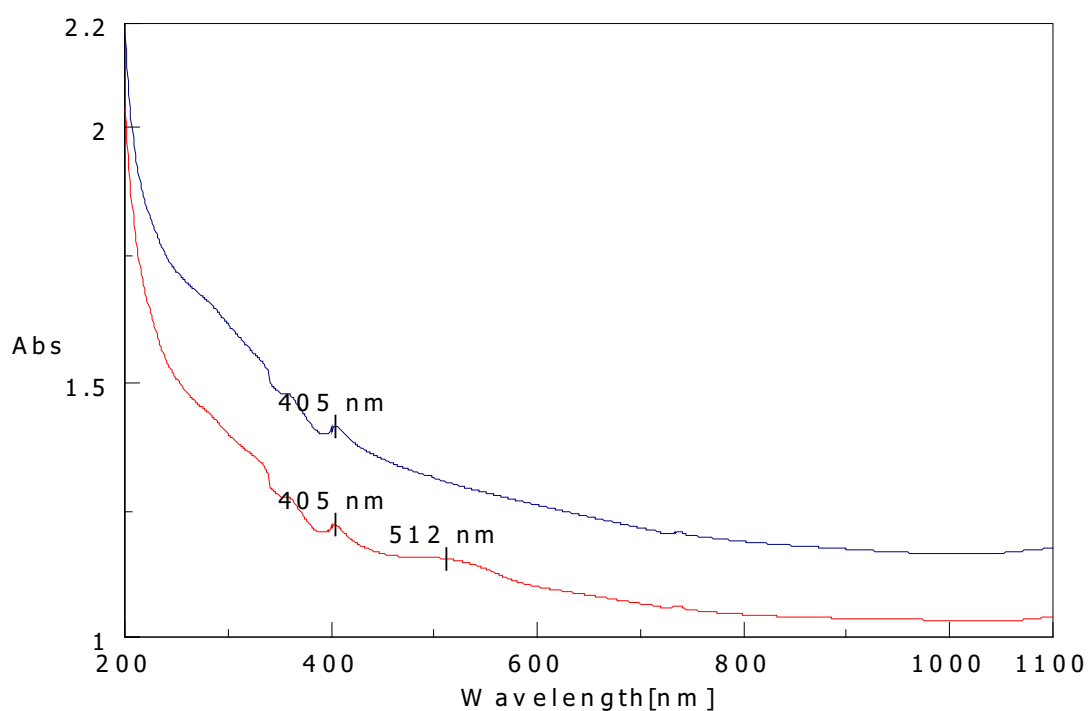
รูปที่ 38 รามานสเปกตรัมของควอตซ์หลังเผาที่สภาวะบรรยากาศ (ก) แบบอากาศ A 800/300/2
(ข) แบบเฉื่อย N 800/300/2



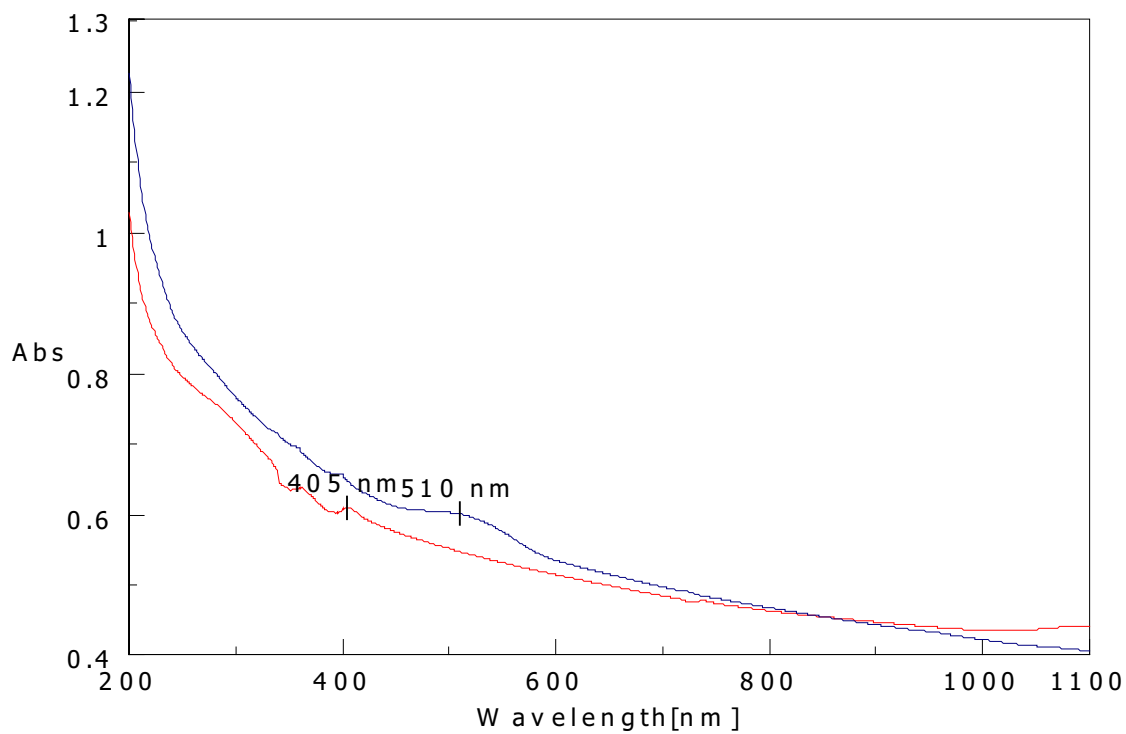
รูปที่ 39 อินฟราเรดสเปกตรัมของควอทซ์ (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา



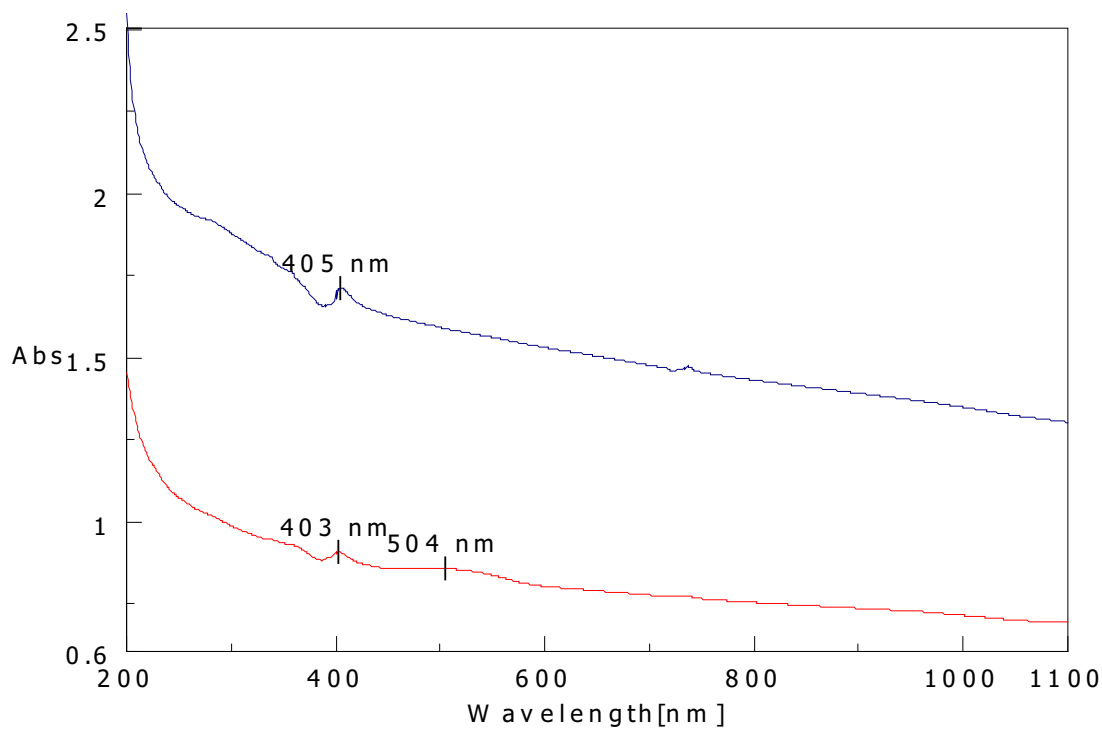
รูปที่ 40 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอเทอร์ก่อนเผา(บน) และควอเทอร์หลังเผา
รหัส A 300/300/2 (ล่าง)



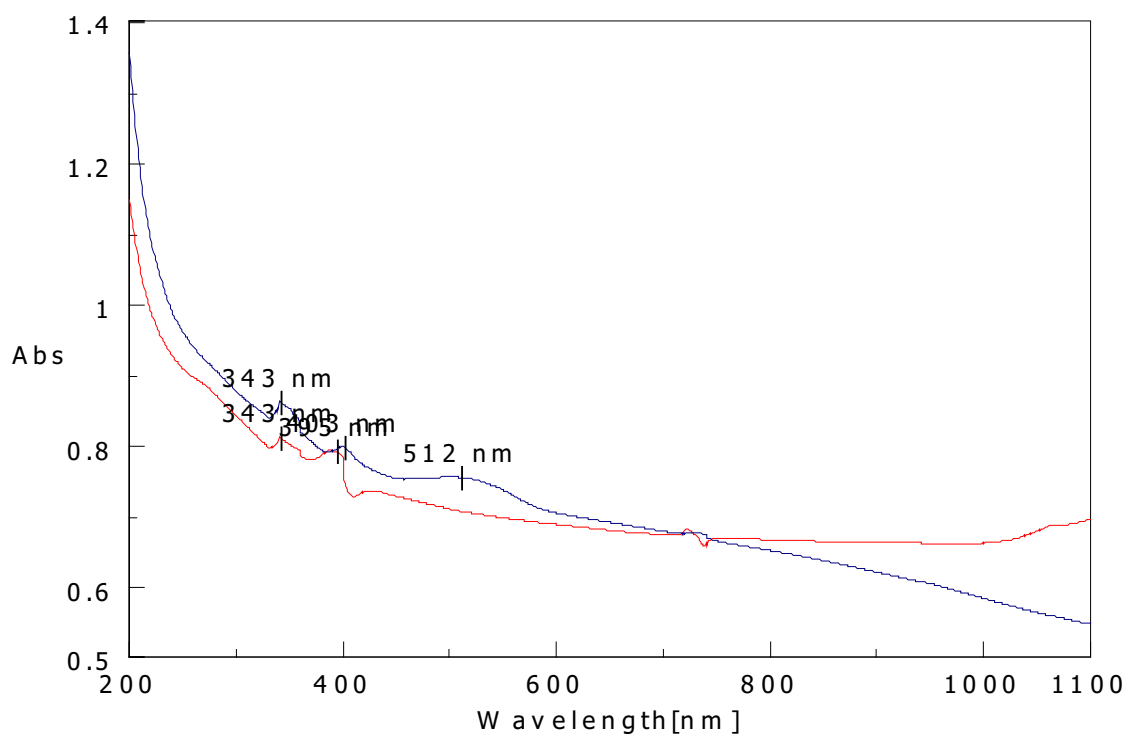
รูปที่ 41 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอเทอร์ก่อนเผา(ล่าง) และควอเทอร์หลังเผา
รหัส A 400/300/2 (บน)



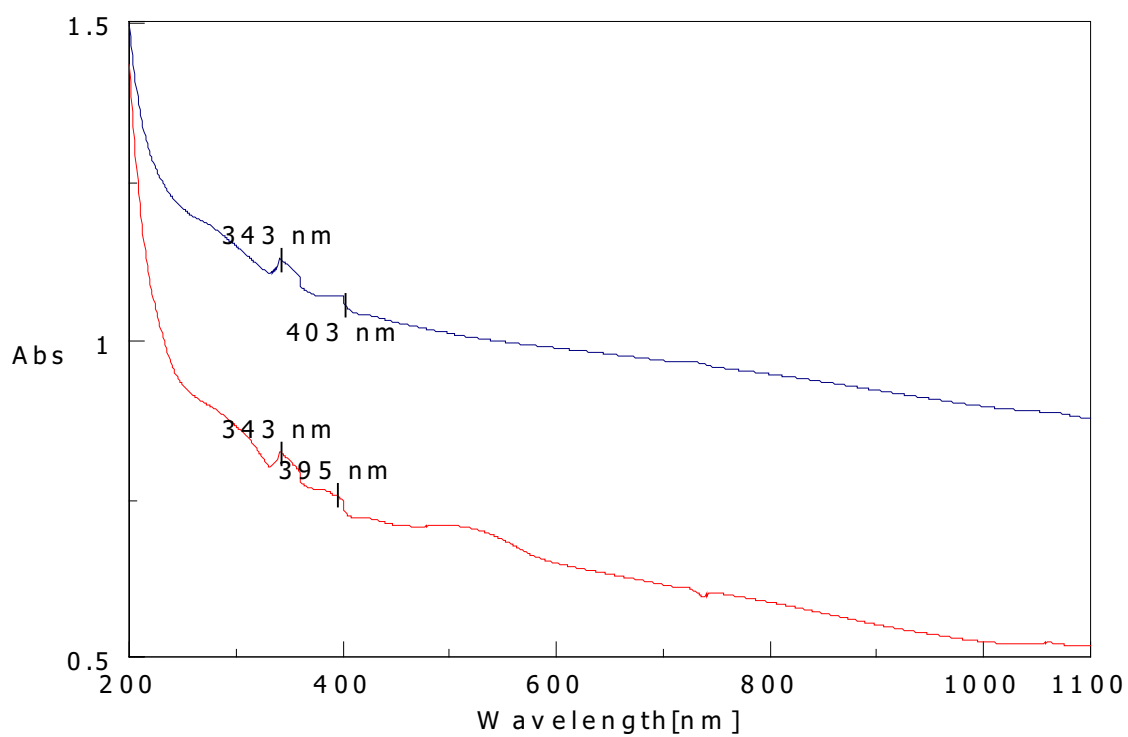
รูปที่ 42 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(บน) และควอทซ์หลังเผารหัส A 500/300/2 (ล่าง)



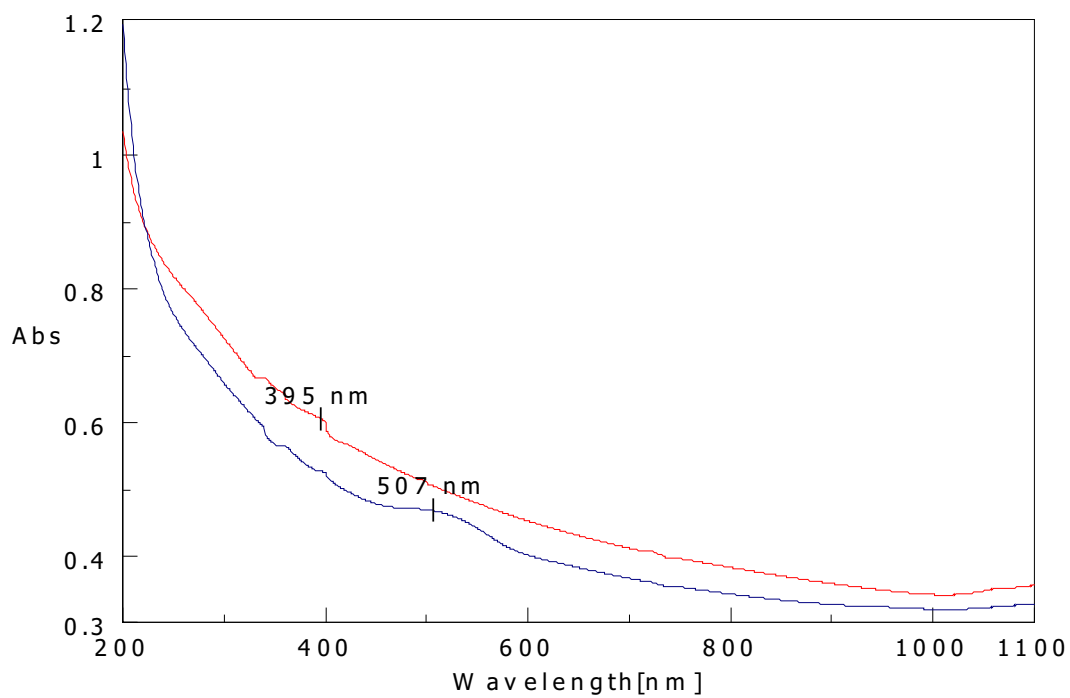
รูปที่ 43 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผารหัส A 600/300/2 (บน)



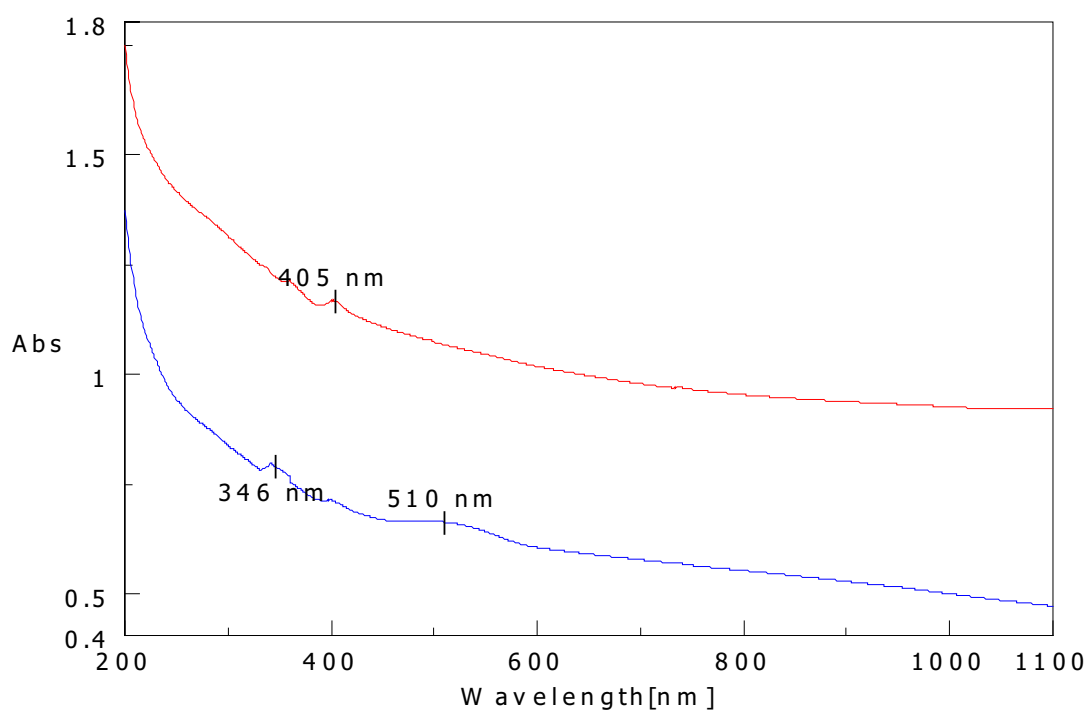
รูปที่ 44 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(บน) และควอทซ์หลังเผารหัส N 300/300/2 (ล่าง)



รูปที่ 45 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผารหัส N 400/300/2 (บน)



รูปที่ 46 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผา
รหัส N 500/300/2 (บน)



รูปที่ 47 สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของควอทซ์ก่อนเผา(ล่าง) และควอทซ์หลังเผา
รหัส N 600/300/2 (บน)

3. ทัวมาลีน (Tourmaline)

ทัวมาลีนเป็นแร่ในกลุ่มวงซิลิเกต (ring silicate) มีสูตรทั่วไปคือ $XY_3Al_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_4$ เมื่อ $X = Ca^{2+}, Na^+$ และ $Y = Mg^{2+}, Li^+, Al^{3+}, Fe^{2+}$ หรือ Mn^{2+} สีของทัวมาลีนจึงมีหลายสีขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่อยู่ในโครงสร้าง เมื่อมี Mn^{2+} ปนอยู่ให้สีชมพู และเรียกชื่อว่า rubellite ถ้ามี Fe^{2+} ให้ทัวมาลีนสีเขียว โครงสร้างทัวมาลีนประกอบด้วยอะตอมซิลิกอนเกิดพันธะกับออกซิเจน 4 อะตอมแบบเตตระฮีดรอล โดยที่ออกซิเจน 2 อะตอมในแต่ละ SiO_4 มาจากออกซิเจนใน SiO_4 ที่อยู่ข้างเคียง ลักษณะนี้ทำให้เกิดเป็นวงหกเหลี่ยมที่มีองค์ประกอบ Si_6O_{18} ส่วน Al เกิดพันธะกับออกซิเจน 6 อะตอม เป็นรูปทรงแปดหน้า ผลึกของทัวมาลีนมีลักษณะเป็นแท่งและมีรอยเป็นแนวยาวมีลักษณะเป็นเนื้อสมานแน่น ทัวมาลีนมีความแข็งเท่ากับ 7 Mohr Scale ไม่มีรอยแตก ผลึกมักเปราะ มีความถ่วงจำเพาะ 3.1-3.2 มีสมบัติทางแสงแบบหักเหคู่ และมีค่าดัชนีหักเห o-ray และ e-ray เท่ากับ 1.610-1.650 และ 1.635-1.675

ในงานวิจัยนี้ใช้ทัวมาลีนสีชมพูและสีเขียวเข้มเป็นตัวอย่างในการทดลอง ได้ทำการเผาเพื่อหาสถานะการเผาที่ทำให้ทัวมาลีนสีชมพูมีสีเข้มขึ้นและลดสีเขียวเข้มของทัวมาลีนสีเขียว

วิธีทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

แช่พลอยตัวอย่างในกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำมาล้างให้สะอาด

2. การเผาทัวมาลีน

2.1 ทัวมาลีนสีชมพู

ได้ทดลองเผาในสถานะบรรยากาศทั้ง 3 แบบ (แบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบรีดักชัน) เพื่อดูว่าแบบใดที่ทำให้สีชมพูเข้มขึ้น ในการทดลองการเผาทุกสถานะไม่มีการเติมสารเติมแต่งและอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ชั่วโมง}$ คงที่ตลอดทุกการทดลอง อัตราการลดอุณหภูมิให้ลดตามธรรมชาติของเตาเผาไม่มีการจัดอัตราการลดอุณหภูมิ สถานะการเผาที่ทำการทดลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 28

2.2 ทัวมาลีนสีเขียวเข้ม

ทัวมาลีนสีเขียวเข้มน่าจะเกิดจากการมี Fe^{2+} มาก ดังนั้นการลดสีเขียวควรทำในสถานะบรรยากาศแบบออกซิเดชัน ในการทดลองนี้จึงทำการเผาในสถานะบรรยากาศแบบอากาศ และแบบออกซิเดชันเท่านั้น อุณหภูมิเริ่มที่ 300 ถึง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงที่ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ชั่วโมง}$ และเวลาแช่พลอย 2 ชั่วโมง รหัสการเผารวมไว้ในตารางที่ 29

ตารางที่ 28 รหัสการเผาทั่วมาลีนสีชมพู

รหัสการเผา		
A 300/300/2	N 300/300/2	R 300/300/2
A 400/300/2	N 400/300/2	R 500/300/2
A 500/300/2	N 500/300/2	R 600/300/2
A 600/300/2	N 600/300/2	R 800/300/2
A 700/300/2	N 700/300/2	
A 800/300/2	N 800/300/2	
A 500/300/10	N 500/300/10	

ตารางที่ 29 รหัสการเผาทั่วมาลีนสีเขียวเข้ม

รหัสการเผา		
A 300/300/2	AS 300/300/2	O 300/300/2
A 400/300/2	AS 400/300/2	O 400/300/2
A 500/300/2	AS 500/300/2	O 500/300/6
A 600/300/2	AS 600/300/2	O 600/300/2
		O 700/300/2
		O 800/300/2

AS = เป็นการเผาในอากาศโดยในเบ้าใส่ทรายกลบทั่วมาลีน

3. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

3.1 สมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพ

ตรวจสอบสมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพของทั่วมาลีนก่อนเผาและหลังเผา หาความถ่วงจำเพาะและดูการเรืองแสงในช่วงUVความยาวคลื่นสั้น (254 nm) และความยาวคลื่นยาว (356 nm)

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ทำการบันทึกสเปกตรัม XRF โดยวางพลอยให้อยู่ระหว่างแผ่นฟิล์มโพลิโพรพิลีนในถ้วยสำหรับ

วางตัวอย่าง ปล่อยรังสี X จากหลอดผ่านตัวอย่าง ใช้วิธีวิเคราะห์แบบไม่มีฟลอยมาตรฐาน (Standardless Method) กำหนดปริมาณธาตุเป็นเปอร์เซ็นต์สัมพัทธ์

3.3 การวิเคราะห์ทางสเปกโทรสโกปี

ในการบันทึกสเปกตรัมของตัวมาลีนก่อนเผาและหลังเผาได้วางตัวอย่างฟลอยในตำแหน่งและลักษณะทิศทางเดิม เพื่อให้เป็นผลการเปรียบเทียบจากตำแหน่งเดียวกัน

3.3.1 Raman Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $0-4000\text{ cm}^{-1}$

3.3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $500-4000\text{ cm}^{-1}$

3.3.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

บันทึกสเปกตรัมในช่วง $200-1100\text{ nm}$

ผลการทดลอง

1. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวมาลีนที่ล้างแล้วมีลักษณะใส มีสีชมพู ภายในมีรอยแตกบ้าง ตัวมาลีนสีเขียวเข้มเห็นรอยเป็นชั้นตามแนวยาวชัดเจน

2. การเผาตัวมาลีน

การเผาตัวมาลีนสีชมพูที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการเผาที่อุณหภูมิ $600-800^{\circ}\text{C}$ แช่ฟลอย 2 ชั่วโมง ทั้งในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ แบบเฉื่อย และแบบรีดักชัน ทำให้ฟลอยตัวมาลีนสีจางลงจนไม่มีสี (ตารางที่ 30-32 และรูปที่ 48) และมีรอยแตกในเนื้อฟลอยมากขึ้น ผลการทดลองหาเวลาแช่ฟลอยที่ 500°C ภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ และแบบเฉื่อย พบว่าเวลาแช่ฟลอยที่นานขึ้นทำให้สีของตัวมาลีนจางลงมาก (ตารางที่ 33)

การเผาตัวมาลีนสีเขียวเพื่อลดสีในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ ทั้งแบบกลบทรายและไม่กลบทรายที่อุณหภูมิ $100-600^{\circ}\text{C}$ ทำให้สีเขียวของฟลอยลดลง ช่วยสมานรอยแตกภายในได้บ้าง และลดจุดดำภายในฟลอยได้บ้าง (ตารางที่ 34 และ 35)

ตารางที่ 30 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ

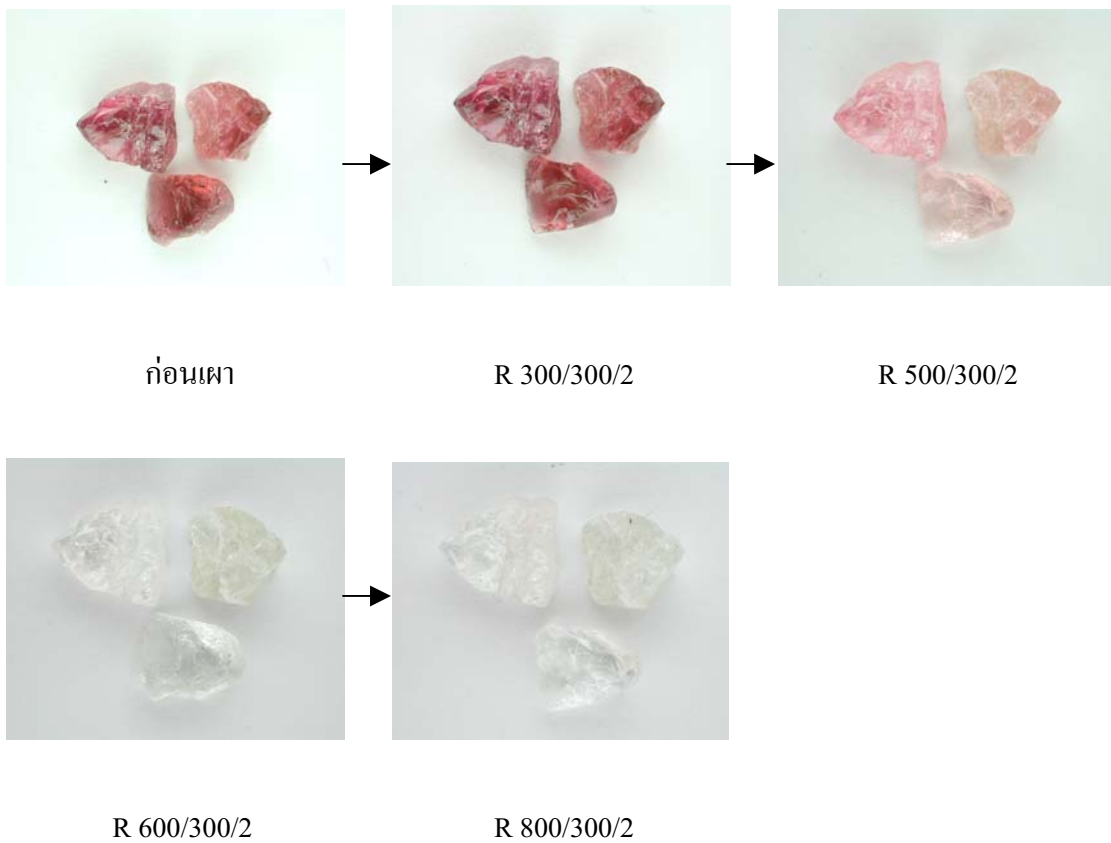
รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 300/300/2	ไม่พบความเปลี่ยนแปลง
A 400/300/2	พลอยสีชมพู
A 500/300/2	พลอยสีชมพูอ่อน
A 600/300/2	พลอยใสไม่มีสี มีรอยแตกเกิดขึ้น
A 700/300/2	พลอยใสไม่มีสี (ใสเท่าเดิม)
A 800/300/2	พลอยใสไม่มีสี (ใสเท่าเดิม) รอยแตกเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 31 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบเฉื่อย

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
N 300/300/2	สีชมพูจางลง ความใสเท่าเดิม
N 400/300/2	สีชมพูจางลง ความใสเท่าเดิม
N 500/300/2	สีชมพูจางลง ความใสเท่าเดิม
N 600/300/2	พลอยใสไม่มีสี(เดิมชมพูเข้ม) รอยแตกหายไป
N 700/300/2	พลอยใสไม่มีสี(เดิมชมพูเข้ม) มีรอยแตกเกิดขึ้น
N 800/300/2	พลอยใสไม่มีสี(เดิมชมพูเข้ม)

ตารางที่ 32 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
R 300/300/2	สีชมพูเข้มขึ้น
R 500/300/2	สีชมพูอ่อนลง เนื้อพลอยใสขึ้น
R 600/300/2	ใสไม่มีสี บางเม็ดคอมเหลืองอ่อน
R 800/300/2	ใสไม่มีสี มีบางส่วนเป็นสีขาวขุ่น



รูปที่ 48 ทัวมาลีนก่อนเผาและหลังเผาที่สภาวะรีดักชัน

ตารางที่ 33 ลักษณะของทัวมาลีนสีชมพูหลังการเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศและแบบเฉื่อยเพื่อหาเวลาแช่พลอย

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 500/300/2	สีชมพูอ่อน
A 500/300/10	สีชมพูอ่อนจางลงมาก
N 500/300/2	สีชมพูจางลง
N 500/300/10	สีชมพูอ่อนมาก

ตารางที่ 34 ลักษณะของพลอยทัวมาลีนสีเขียวเข้มหลังการเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศ

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
A 100/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
A 200/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
A 300/300/2	เนื้อพลอยมีความใสมากขึ้น สีเข้มเกือบดำเหมือนเดิม
A 400/300/2	เนื้อพลอยมีความใสมากขึ้น สีเข้มเกือบดำเหมือนเดิม
A 500/300/2	พลอยสีเขียวย่อลง ใสมากขึ้น จุดดำในเนื้อพลอยลดลง
A 600/300/2	พลอยสีเขียวย่อลง ใสมากขึ้น จุดดำในเนื้อพลอยลดลง รอยแตกสมานกัน

ตารางที่ 35 ลักษณะของพลอยทัวมาลีนสีเขียวเข้มหลังการเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบอากาศและ
กลบทราย

รหัสการเผา	ลักษณะที่สังเกตเห็น
AS 100/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
AS 200/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
AS 300/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
AS 400/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
AS 450/300/2	พลอยสีเขียวเข้มเกือบดำ (ไม่เปลี่ยนแปลง)
AS 500/300/2	เม็ดที่ทึบมากที่สุดเหมือนเดิม เม็ดที่ใสมีความใสขึ้นบ้าง
AS 600/300/2	บางเม็ดเกิดใหม่กลายเป็นไม้ บางเม็ดใสขึ้น รอยแตกลดลง

3. การศึกษาสมบัติทางอัญมณี ทางกายภาพและทางเคมี

3.1 สมบัติทางอัญมณีและทางกายภาพของทัวมาลีน

ค่าดัชนีหักเหของทัวมาลีนก่อนเผาอยู่ในช่วง 1.610-1.667 และค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 3.0465-3.0644 เมื่อเผาแล้วค่าดัชนีหักเหไม่เปลี่ยนแปลง ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 3.0581-3.0656 ทัวมาลีนก่อนเผาและหลังเผาไม่เรืองแสงทั้งในช่วงUVความยาวคลื่นสั้นและคลื่นยาว

3.2 การวิเคราะห์ทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ผลการวิเคราะห์พบว่าตัวมาลีนมีธาตุ Si และ Al เป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุปริมาณน้อยอื่นๆ (ตาราง 36)

3.3 การวิเคราะห์ทางสเปกโตรสโคปี

3.3.1 Raman Spectroscopy

สเปกตรัมรามานของตัวมาลีนสีชมพูและสีเขียวเข้มมีรูปแบบของพีคเหมือนกัน กล่าวคือมีพีครามานเกิดขึ้น 2 ช่วงคือ ช่วงความถี่สูง $3400-3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นผลจากการสั่นของหมู่ไฮดรอกไซด์และน้ำ และช่วงความถี่ต่ำกว่า 1000 cm^{-1} ซึ่งเป็นผลจากการสั่นของหมู่ SiO_4 เนื่องจากโครงสร้างของตัวมาลีนเป็นวงซิลิเกต 4 หน่วยต่อกัน จึงทำให้เกิดช่องกลวงตรงกลาง ซึ่งอาจมีไอออนหรือโมเลกุลอื่นๆ แทรกอยู่ภายในเช่น โมเลกุลน้ำ การสั่นของพันธะ O-H ของน้ำทำให้เกิดพีคที่ 3588 cm^{-1} ส่วนพีคที่ 3470 cm^{-1} เกิดจากการสั่นของหมู่ไฮดรอกไซด์ในตัวมาลีนเอง กลุ่มพีคในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 1000 cm^{-1} เป็นผลจากการสั่นของพันธะในหมู่ SiO_4 (รูปที่ 49) สเปกตรัมรามานของตัวมาลีนได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ข

3.3.2 Fourier Transform Infrared Spectroscopy

สเปกตรัมอินฟราเรดของตัวมาลีนก่อนเผาและหลังเผา แสดงผลจากการสั่นของกลุ่ม SiO_4 และหมู่ไฮดรอกไซด์ เช่นเดียวกับสเปกตรัมรามาน (รูปที่ 50)

3.3.3 UV/VIS/NIR Spectroscopy

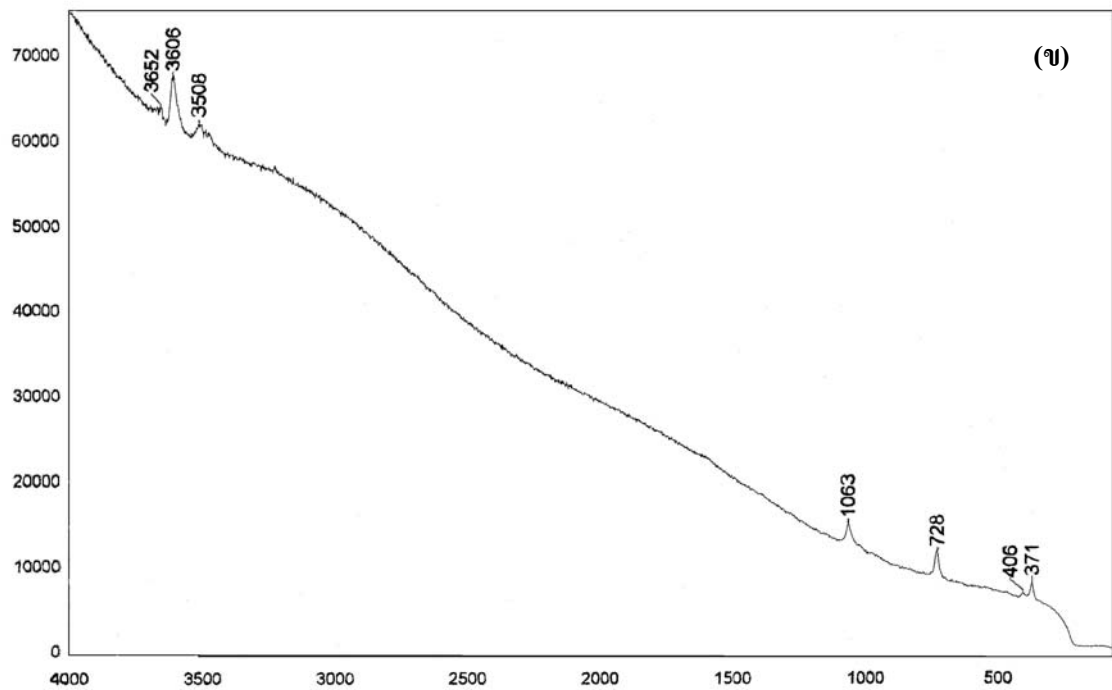
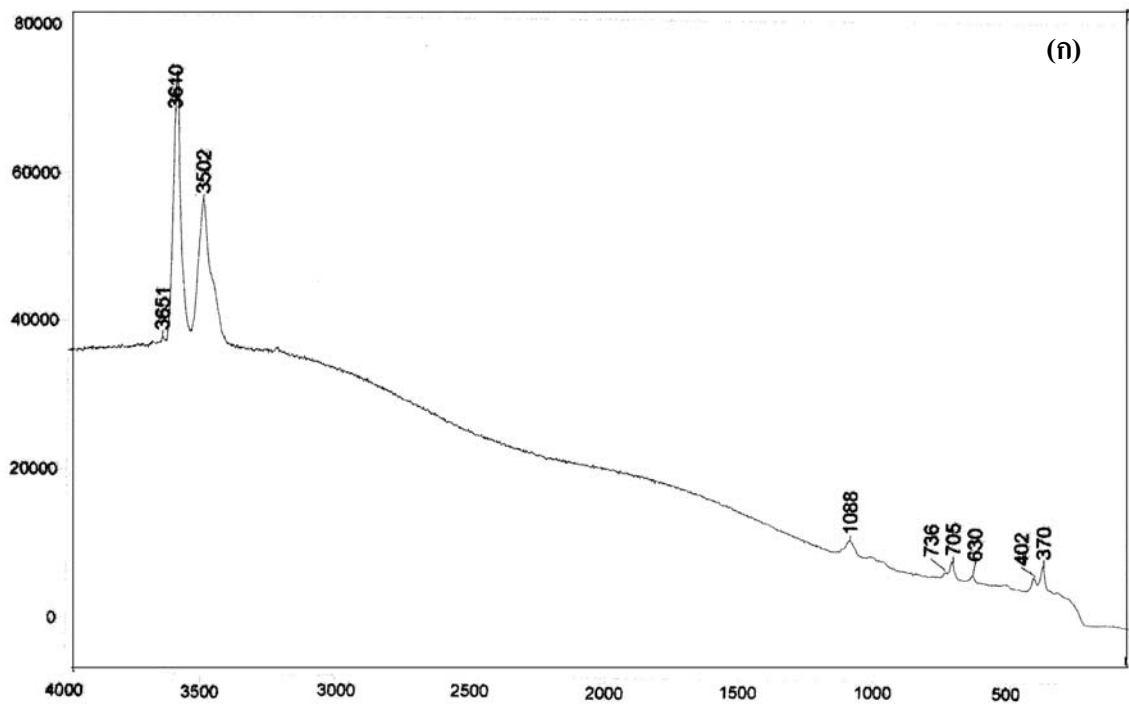
สเปกตรัมดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิลของตัวมาลีนก่อนเผามีแถบที่มีความเข้มสูงเกิดที่ $510-516\text{ nm}$ และแถบที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ประมาณ 680 nm (รูป 51) หลังจากเผาที่สภาวะบรรยากาศแบบต่างๆ ความเข้มของพีคทั้งสองค่อยๆ ลดลงจนหายไปเมื่อเผาถึงอุณหภูมิประมาณ 600°C พลอยที่ถูกเผาถึง 600°C เปลี่ยนจากสีชมพูเป็นไม่มีสี จึงไม่มีการดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล สเปกตรัมทั้งหมดได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ค

สรุปผลการทดลอง

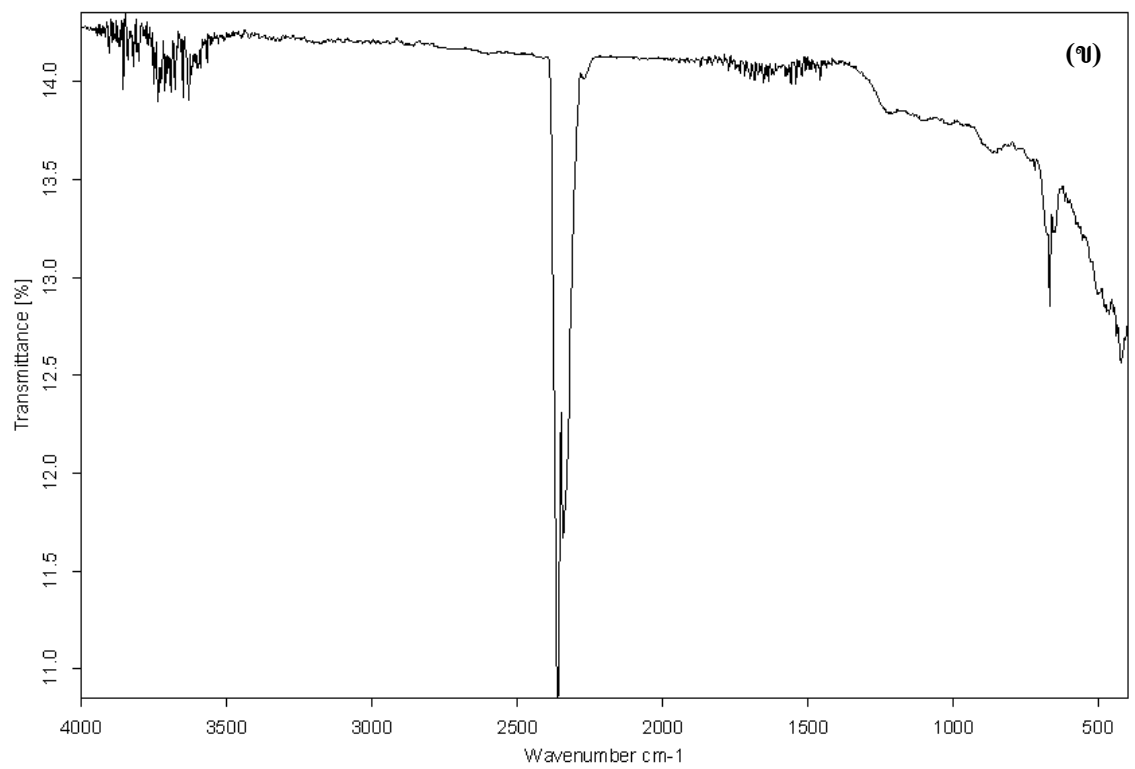
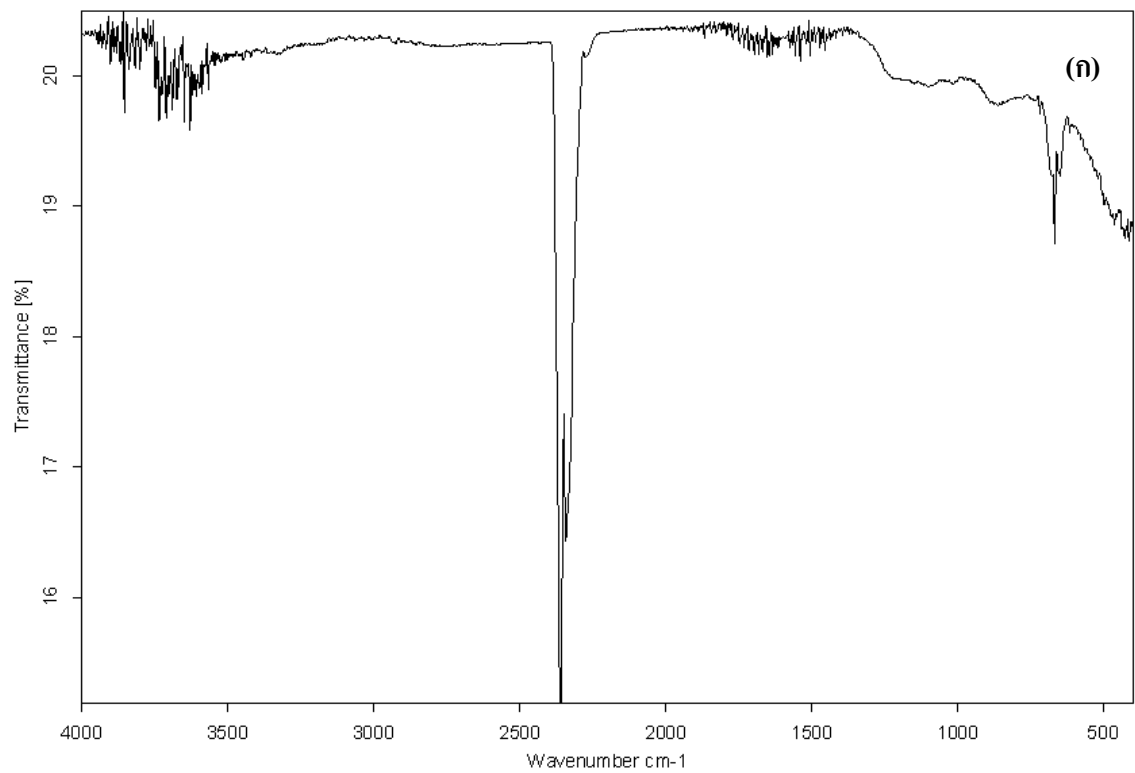
จากผลการทดลองทั้งหมด สรุปได้ว่าการเผาตัวมาลีนสีชมพูควรเผาที่อุณหภูมิต่ำ การเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้ตัวมาลีนไม่มีสี ส่วนการถอยสีเขียวเข้มของตัวมาลีนต้องทำในสภาวะออกซิเดชัน อาจต้องใช้ระยะเวลาในการเผานานขึ้นและอาจต้องใช้ตัวรีดิวซ์ที่แรงขึ้น

ตารางที่ 36 เปอร์เซนต์สัมพัทธ์ของธาตุในทัวมาลีน

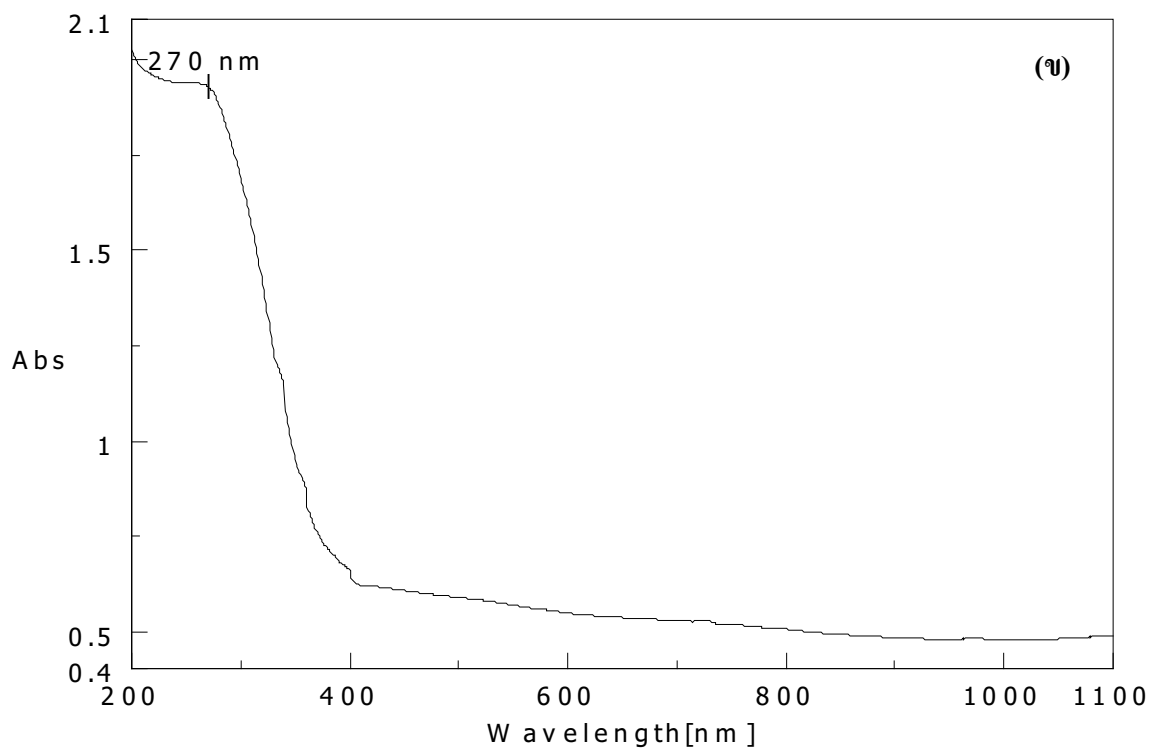
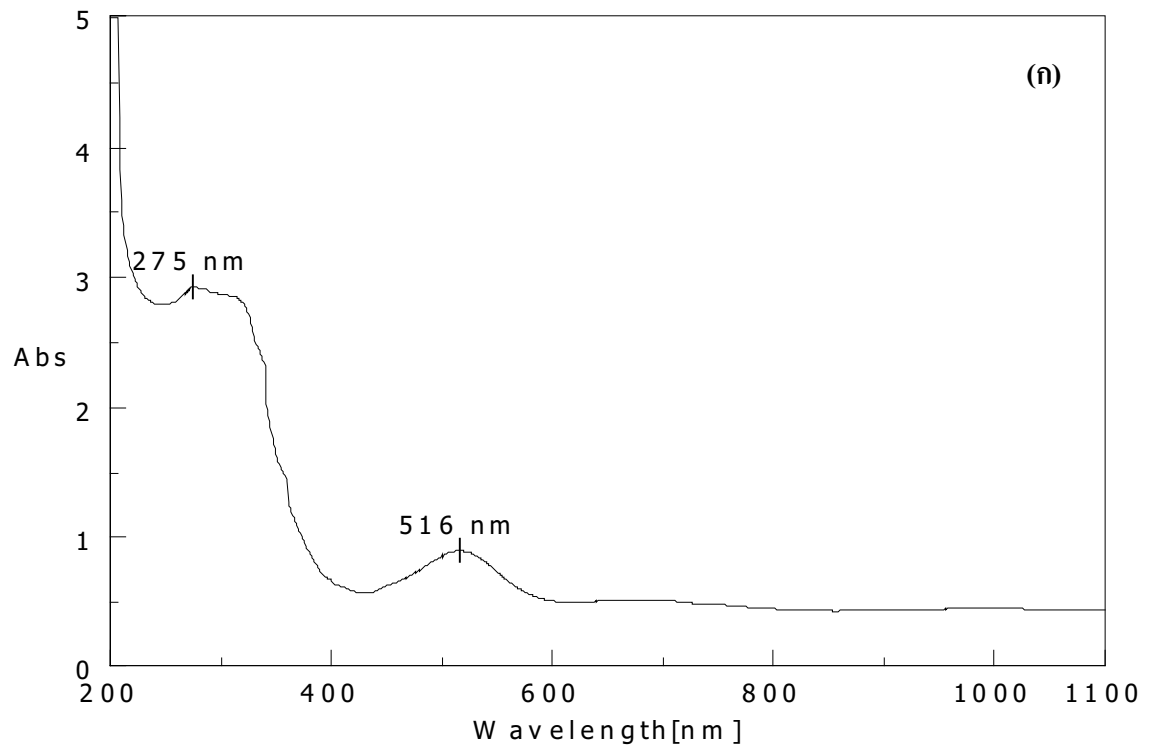
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	SrO	Bi ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	Fe ₂ O ₃	CuO	ZnO
ทัวมาลีนสีชมพู	48.374	41.798	0.314	0.059	0.206	7.280	0.223	0.987	0.121	0.478	0.139	0.022	-
ทัวมาลีนสีเขียว	43.162	37.214	1.292	-	0.363	0.375	-	-	0.247	1.867	15.210	Trace	0.270
ทัวมาลีนไม่มีสี	50.002	42.674	0.308	0.069	-	6.151	-	-	0.057	0.558	0.089	0.091	-



รูปที่ 49 รามานสเปกตรัมของหัวมาลีนหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศ (ก) แบบอากาศ A 800/300/2
(ข) แบบเฉื่อย N 500/300/2



รูปที่ 50 อินฟราเรดสเปกตรัมของหัวมาลีน (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผา



รูปที่ 51 UV/VIS/NIRสเปกตรัมของทัวมาลีน (ก) ก่อนเผา (ข) หลังเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศ A 800/300/2

4. โทปาซ (Topaz)

โทปาซจัดอยู่ในกลุ่มแร่ orthosilicate โครงสร้างประกอบด้วย อะลูมิเนียม เกิดพันธะกับอะตอมออกซิเจนของหมู่ SiO_4 4 หมู่ และไอออนฟลูออไรด์ และ/หรือไฮดรอกไซด์ โทปาซมีความแข็งเท่ากับ 8 Mohr Scale มีทั้งขนาดใหญ่และเล็ก มีความแวววับแบบแก้ว มีหลายสี เช่น ไม่มีสี สีเหลือง สีชมพู เหลืองแบบไวน์ สีนํ้าเงิน โทปาซมีสูตรเคมี ดังนี้ $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F},\text{OH})_2$

เนื่องจากไม่สามารถหาโทปาซสีอื่น ๆ ได้ ในการทดลองนี้จึงใช้ตัวอย่างเป็นพลอยไม่มีสีและทำการทดลองเผาในสภาวะบรรยากาศแบบอากาศและแบบเฉื่อยเท่านั้น (ตารางที่ 37) ซึ่งเป็นไปตามแนวคิดที่ว่าในโทปาซไม่มีโลหะไอออนที่ทำให้เกิดสีอยู่ในโครงสร้าง การเผาทำให้พลอยแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

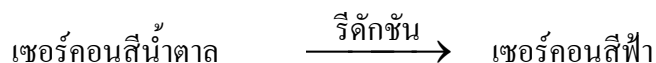
ตารางที่ 37 รหัสการเผาโทปาซ

รหัสการเผา	
	N 300/300/2
A 300/300/2	N 400/300/2
A 400/300/2	N 500/300/2
A 500/300/2	N 600/300/2
A 600/300/2	N 700/300/2
A 700/300/2	N 800/300/2
A 800/300/2	

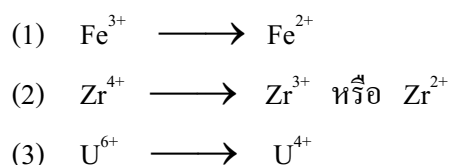
สำหรับข้อมูลอื่น ๆ เกี่ยวกับสมบัติทางอัญมณีและทางสเปกโตรสโคปี ได้บันทึกไว้ในภาคผนวก ข และ ค

ส่วนที่ 2 การเกิดสีของเซอร์คอน

ในส่วนที่ 1 ได้แสดงผลการเผาเซอร์คอนไว้ว่า (1) เซอร์คอนสีน้ำตาลต้องเผาภายใต้สภาวะบรรยากาศแบบรีดักชัน จึงเปลี่ยนเป็นสีฟ้าได้ (2) สเปกตรัม UV/VIS/NIR ของเซอร์คอนที่เผาในสภาวะที่มีอากาศหรือออกซิเจนไม่ให้แถบดูดกลืนบริเวณ 635 nm ส่วนสเปกตรัมของเซอร์คอนที่เผาในสภาวะรีดักชันมีแถบเกิดขึ้นบริเวณ 635 nm และเซอร์คอนกลายเป็นสีฟ้า ดังนั้นแถบที่ 635 nm จึงน่าจะเกี่ยวข้องกับการเกิดสีฟ้าของเซอร์คอน แสดงว่าในขณะที่เผานั้นต้องมีการรีดักชันเกิดขึ้นภายในพลอย จึงทำให้พลอยมีสีฟ้า



ปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอน นั่นคือเลขออกซิเดชันของไอออนของธาตุเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในเซอร์คอน (ตารางที่ 17) พบว่าธาตุที่ตรวจพบและมีสมบัติทำให้เกิดสีได้มี Fe และ Zr อาจมี Th หรือ U ที่เป็นธาตุที่มีปริมาณน้อยมาก (ในระดับ ppm) เป็นตัวที่ทำให้เกิดสีก็ได้ ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานได้ว่าน่าจะมีการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของไอออนในองค์ประกอบ เมื่อพิจารณาแต่ละธาตุจะพบว่าการรีดักชันอาจเกิดจาก



ปฏิกิริยารีดักชันข้อใดน่าจะเกิดได้ ต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของแต่ละสมการดังนี้ ในกรณีที่ (1) ไอออน Fe^{2+} มักให้สีเขียวอ่อน จึงไม่น่าจะเกิดขึ้นได้ ในกรณีที่ (2) ก็เกิดไม่ได้เพราะจากการศึกษาสเปกตรัม XPS พบพีคของ Zr^{4+} เท่านั้น และพีคในสเปกตรัมดูดกลืนแสงที่เกิดจาก Zr^{4+} เกิดที่บริเวณ 358-382 และ 742 nm Hf^{4+} เกิดพีคในช่วงใกล้เคียงกับ Zr^{4+} คือที่ 357 - 359 และ 750 nm (Martin et. al. 1993 and Collnan et. al 1997) ในกรณีที่ 3 น่าจะเกิดขึ้นได้เนื่องจาก U^{6+} ในรูปของ UO_2^{2+} ดูดกลืนแสงในช่วง 410 - 430 nm (Meinrath et. al. 2000 and Zanonato et.al. 2004) McCleskey ได้ศึกษา Photochemical Reduction ของ uranyl (UO_2^{2+}) เพื่อให้เกิด UO_2 โดยไม่มีการเกิด hydrogen reduction แต่ใช้ formate แทน เพราะ formate ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่ให้ CO_2 ผลของปฏิกิริยาได้ U (IV) สเปกตรัม UV/VIS ของ uranyl มีแถบดูดกลืนเกิดที่ 400 – 450 nm และ U (IV) ที่เป็นผลิตภัณฑ์มีแถบดูดกลืนเกิดเป็นกลุ่มที่มีความเข้มต่ำในช่วง 450 - 700 nm โดยที่มีพีคที่มีความเข้มสูงเกิดขึ้นที่ 620-675 nm (McCleskey, et. al 2001) ผลการทดลองของ McCleskey ตรงกับสเปกตรัม UV/VIS ที่ได้

จากงานวิจัยเซอร์คอนนี้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเกิดสีของเซอร์คอนน่าจะเกิดจากการดูดกลืนแสงของ U^{6+} ไอออนที่เป็นผลจากการรีดักชัน

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีที่เผาในสภาวะบรรยากาศรีดักชันเท่านั้นที่พลอยสีน้ำตาลเป,ยนเป็นพลอยสีฟ้าที่อุณหภูมิสูง
2. เซอร์คอนแหล่งอุบลราชธานีและกาญจนบุรีให้สีฟ้าอ่อนกว่าเซอร์คอนแหล่งรัตนคีรีเมื่อเผาที่สภาวะบรรยากาศเดียวกัน
3. การเกิดสีฟ้าของเซอร์คอน เกิดจากการดูดกลืนแสงของ U^{4+} ซึ่งเป็นผลจากการรีดักชันของ U^{6+}
4. เซอร์คอนที่เผาที่อุณหภูมิ 500 °C ในทุกสภาวะบรรยากาศเกิดเป็นเซอร์คอนไม่มีสี
5. เกิดเทคโนโลยีการเผาเซอร์คอน 2 แบบ คือ การเผาให้เกิดสีฟ้า และการเผาให้ไม่มีสี
6. ควอทซ์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะใสไม่มีสี เห็นรอยแตกภายในมาก หลังการเผาในทุกสภาวะบรรยากาศพบว่าที่อุณหภูมิ 600 °C เกิดสีแดงที่ผิวของควอทซ์ ที่อุณหภูมิสูงพลอยมีลักษณะขุ่นและมีรอยแตกมากขึ้น ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผาพลอยชนิดนี้
7. ทัวมารีนสีชมพู การเผาที่อุณหภูมิสูงสีชมพูจางลง ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผาให้ทัวมารีนสีชมพูมีสีเข้มขึ้น
8. ทัวมารีนสีเขียวเข้ม การเผาในสภาวะรีดักชันสีเขียวไม่จางลง แต่ในสภาวะออกซิเดชันสีเขียวจางลง เกิดเทคโนโลยีการเผาเพื่อลดสีเขียวเข้มของทัวมารีน
9. โทปาสที่ใช้ในการทดลองเป็นโทปาสไม่มีสี ผลการเผาทุกสภาวะบรรยากาศทำให้พลอยขุ่นและมีรอยแตกมากขึ้น ไม่เกิดเทคโนโลยีการเผา แต่ผลการทดลองสามารถใช้เป็นข้อมูลต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

1. P.C. Martin , J. Arnold and D.F. Bociare, 1993, **J. Phys. Chem.** 97, 1332-1338.
2. J. P. Collman, J. L. Kendall, J. L. Chan and T. A. Eberspacher, 1997, **Inorg. Chem.** 36, 5603- 5608.
3. G. Meinrath, S. Lis, Z. Stryla and C. Noubactep, 2000, **Journal of Alloys and Compounds.** 300-301, 107-112.
4. P. Zanonato, P. D. Bernardo, A. Bismondo, G. Liu, X. Chen and L. Rao, 2004, **J. AM. CHEM. SOC.** 126, 5515-5522.
5. T. M. McCleskey, T. M. Foreman, E. E. Hallman, C. J. Burns and N. N. Sauer, 2001, **Environ. Sci. Technol.** 35, 547-551.
6. M.J. Faulkner and J.E. Shigley , 1989 , Gem & Gemmology , 207-215.
7. W. P. Griffith, 1969, **J. Chem. Soc.(A)**, 1372-1377.
8. H. A. Hanni, L. Kiefert and J. P. Chalain, 1997, **J. Gem.** 25(6), 394-406.
9. B. A. Kolesov, C. A. Geiger and T. Armbruster, 2001, **Eur. J. Mineral**, 13, 939-948.
10. M. Phromsurin, 2002, Micro-Raman Spectroscopic Study of Gemstones, M. S. thesis, Kasetsart University.
11. W. A. Deer F.R.S., R. A. Howie and J. Zussman. 1966. **An Introduction to the Rock Forming Minerals.** Richard Clay Ltd., Bungay, Suffolk.
12. E.J.Güblin and J.I.Koivula. 1992 **Photoatlas of Inclusions in Gemstones.** 2 nd ed. ABC Edition, Zurich. Switzweland.



เซอร์คอนสีน้ำตาลก่อนเผา



เซอร์คอนสีฟ้าหลังเผาที่สภาวะบรรยากาศรีดักชัน R 1000/300/2



เซอร์คอนไนต์ไม่มีสีหลังเผาที่สภาวะ O 500/300/2



ทัวร์มาลีนสีชมพู ก่อนเผา (ด้านบนและในกล่องซ้ายสุด)
หลังเผา (ในกล่องกลางและกล่องหลัง)