บทความวิจัย

ปีที่ 1 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565

วารสาร มรภ.กพ. วิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ และเทคโนโลยี

Journal of KPRU Science Mathematics and Technology

# การศึกษาผลของการเผาที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของควอตซ์ธรรมชาติจากตำบลเขาพระงาม จังหวัดลพบุรี

# The Effect of Heat Treatment on Physical Properties of Natural Quartz from Khoaprangam, Lopburi

**ธัญวรรณ จันทา, ทิฆัมพร พรมฉวี, กันตพัฒน์ กิตติอัชวาลย์*, วัลย์ลิกา สุขสำราญ**

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

**Thanyawan Janta, Tikumporn Promchawee , Kantapat Kittiauchawal*, Wallika Suksomran**

Science Program, Faculty of Science and Technology,

Thepsatri Rajabhat University, Lopburi 15000

## บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของการเผาควอตซ์ธรรมชาติจากเขาพระงาม ตำบลเขาพระงาม อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ก่อนและหลังการเผา และหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพควอตซ์ธรรมชาติโดยการเผา ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างควอตซ์ธรรมชาติจากท้องถิ่นมาเผาที่อุณหภูมิ 200, 400, 600, 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส อุณหภูมิละ 2 ตัวอย่าง เป็นระยะเวลา 1ชั่วโมง แล้วนำควอตซ์ที่ได้มาทดสอบสมบัติทางกายภาพเปรียบเทียบกับควอตซ์ที่ไม่ได้เผา เช่น ความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง รูปแบบผลึก ค่าดัชนีหักเห และคุณสมบัติทางแสง ผลที่ได้พบว่า ความถ่วงจำเพาะ 2.64 วัดความแข็งได้ 7.5 ค่าดัชนีหักเหมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีคือ 1.544 และพบธาตุองค์ประกอบซิลิกอนออกไซด์ ($SiO_2$) และการดูดกลืนแสงที่ไวที่สุดอยู่ที่ 482 นาโนเมตร และ 478 นาโนเมตร สรุปได้ว่าควอตซ์ที่เผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีความใสและสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับควอตซ์ธรรมชาติมากที่สุด

**คำสำคัญ :** ควอตซ์, การเผา, สมบัติทางกายภาพ

* Corresponding author : kantapat.k@lawasri.tru.ac.th

Received : 21/03/2022 Revised : 16/06/2022 Accepted : 22/06/2022

## Abstract

This research aim to study physical properties of heat treatment natural quartz from Khaoprangam, Lopburi and in heat treatment the conduction for improving natural quartz by heat treatment. Natural quartz from local area were cut and burn at temperature of 200oC, 400oC, 600oC, 800oC and 1,000oC, respectively. At each temperature, two quartz were burn for 1 hour. Then, physical properties of the quartz were investigated comparing to unburned quartz Such as density, hardness, and optical properties, forms and crystals refraction. The results show that density of quartz 2.64 hardness 7.5, refraction of quartz 1.544 have SiO2 , optical properties 482 nm and 478 nm. In conclusion quartz which heat treatment at 200oC is bright and its physical properties are closet to natural quartz.

**Keywords :** quartz, heat treatment, physical property

## ที่มาและความสำคัญ

อัญมณีและเครื่องประดับ เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศและมีผลต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย มีจุดเด่นในด้านการส่งออก และนำรายได้เข้ามาในประเทศเป็นลำดับต้น ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซื้ออัญมณีและเครื่องประดับนั้นนิยมมากในตลาดทั่วโลกเพราะสังคมยุคปัจจุบันนิยมความหรูหรา และนอกจากนั้นยังให้ความสำคัญต่อธุรกิจของชุมชน จากสถิติการส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับของไทย ระหว่างเดือนมกราคมถึงธันวาคม 2561 มีมูลค่าลดลงร้อยละ 16.56 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การส่งออกลดลงเนื่องจากการขาดแคลนวัตถุดิบแรงงาน ภาครัฐไม่เอื้ออำนวยต่อธุรกิจค้าขายอัญมณีมากเท่าที่ควร ตลาดการค้าหลักมีปัญหา และผู้บริโภคมุ่งเน้นอัญญมณีท้องถิ่นโดยต้องมีผลการวิจัยและการพัฒนา [1] ควอตซ์ (ซิลิกอนออกไซด์) เป็นอัญมณีเนื้อแข็งหลากสี แต่ยังไม่ได้รับความนิยม และราคาไม่แพงมาก นอกจากนั้นยังมีตำหนิอยู่ในเนื้อควอตซ์ ความหลากหลายสีของควอตซ์ทำให้เป็นที่นิยมนำมาทำเครื่องประดับ แต่ควอตซ์ที่มีสีใส นิยมนำมาทำเป็นเครื่องรางของขลังที่ผู้ใดมีไว้กับตัวจะช่วยให้แคล้วคลาดจากภยันตราย นำโชคดีมาให้ นำความเบิกบานใจและความสุขมาให้แก่ผู้ที่ได้ครอบครอง [2] ลักษณะสีที่แตกต่างกันออกไปนั้นเกิดจากการที่มีธาตุปริมาณน้อยเข้าไปแทนที่โครงสร้างของผลึกควอตซ์ ทำให้การดูดกลืนแสงและสีเปลี่ยนแปลง [3] เขาพระงาม จังหวัดลพบุรี เป็นแนวภูเขาหินปูนที่ถูกแทรกดันด้วยหินอัคนีแทรกซ้อนซึ่งมีส่วนประกอบทางแร่เป็นชนิดหินแกรนิต-แกรโนไดออไรต์ ที่มีการแปรสภาพของชั้นหินปูนเดิม ปะปนไปกับหินอัคนี พบว่ามี แร่ควอร์ต เป็นจำนวนมาก เกิดเนื่องมาจากน้ำแร่ที่มาจากมวลหินอัคนีแทรกซ้อน หรือแมกมาไหลไปบรรจุ ในรอยแตก รอยแยก และในโพรงหินอ่อนปนแคลก์-ซิลเกตุ ที่กลายเป็นตำนาน “เพชรเขาพระงาม” [4] งานวิจัยนี้จึงนำควอตซ์จากแหล่งท้องถิ่นมาเผาที่อุณหภูมิต่างๆและทดสอบสมบัติทางกายภาพจากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ นับว่าเป็นแนวทางที่ดีในการพัฒนาอัญมณีท้องถิ่น

ก) เครื่องตัด

ข) เครื่องเจียร

ค) เตาเผาไฟฟ้า

ง) เครื่องขัดเงา

ภาพที่ 1: เครื่องตัด, เครื่องเจียร, เตาเผาไฟฟ้า และเครื่องขัดเงา

## วิธีการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้นำควอตซ์ธรรมชาติจาก ตำบลเขาพระงาม จังหวัดลพบุรี มาทำการตัดและเจียรให้ได้รูปทรงที่ง่ายต่อการทดสอบสมบัติทางกายภาพของอัญมณีโดยใช้อุปกรณ์ดังภาพที่ 1 ก) และ 1 ข) จากนั้นทำควอตซ์ที่ได้มาเผาโดยเตาเผาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 200 400 600 800 และ 1000 องศาเซลเซียส ตามลำดับเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และขัดเงา ดังภาพที่ 1 ค) และ 1 ง) แล้วนำควอตซ์มาทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ

**ในการทดสอบสมบัติทางกายภาพนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้**

1) ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

หาค่าความถ่วงจำเพาะโดยนำอัญมณีชิ้นนั้นไปหาปริมาตรโดยการแทนที่ในน้ำ เพื่อหาว่าน้ำถูกแทนที่ด้วยประมาณเท่าใด ปริมาตรนั้นก็คือปริมาตรของน้ำที่เท่ากับปริมาตรของอัญมณีชิ้นนั้น หลักการของ อาร์คีเมเดส (Archimedes)

$$\text{ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ} = \frac{\text{มวลของวัตถุในอากาศ}}{\text{มวลของวัตถุในอากาศ} - \text{มวลของวัตถุในน้ำ}} \quad (1)$$

2) ความแข็ง (hardness)

ความทนทานต่อการขูดขีด ขัดสีความแข็งของแร่ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะเคมี แร่แรงยึดเกาะกันระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแร่นั้น ถ้าแร่ยึดเกาะของพันธะเคมีที่มีสูง จะทำให้เกิดความแข็งมากไป

ภาพที่ 2: เครื่องวัดดัชนีหักเห ยี่ห้อ PRESIDIUM รุ่น Refractive Index Meter II

ด้วย การวัดความแข็งของแร่จะบอกเป็นค่าตัวเลข 1-10 โดยยึดตามมาตรฐานความแข็งของโมห์สเกล

3) การหักเหของแสง (refraction)

แสงสีขาว เมื่อตกกระทบบนผิววัตถุหรืออัญมณีที่มีความโปร่งให้แสงผ่านได้ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับ (reflection) และบางส่วนจะผ่านทะลุเข้าไปในวัตถุหรืออัญมณี แสงสีขาวที่ผ่านอากาศแล้วผ่านเข้าไปในวัตถุหรืออัญมณีซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าอากาศ จะทำให้ความเร็วของแสงลดลง และเกิดการเบี่ยงเบนเข้าหาเส้นปกติ (แนวเส้นตั้งฉากกับผิววัตถุ) หรือเส้นปกติเราเรียกว่า เกิดการหักหักเหของแสง นักวิทยาศาสตร์จะพิจารณาในรูปของค่าดัชนีหักเห (refractive index ; $RI$) โดยอาศัยกฎทางแสงของสเนลล์ ที่กล่าวไว้ว่า อัตราส่วนของ sin ของมุมตกกระทบ ($i$) กับ sin ของมุมหักเห ($r$) จะมีค่าคงที่ และค่าคงที่นี้จะเรียกว่า ค่าดัชนีหักเห ($RI$) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$RI = \frac{\sin i}{\sin r} \tag{2}$$

4) หาธาตุองค์ประกอบทางเคมี

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนต์เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่างโดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ ของแต่ละธาตุ อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม

5) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ข้อมูลที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุได้หลากหลาย เช่น ชนิดของธาตุ หรือสารประกอบ ระบบผลึก ขนาดของผลึก และค่าแลตทิซพารามิเตอร์ เป็นต้น ความรู้พื้นฐานที่สำคัญและเกี่ยวกับเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ 3 เรื่อง คือ ผลึกวิทยาเบื้องต้น การแทรกสอดของคลื่น และกฎของแบร็กก์ (Bragg law)

6) การตรวจวัดปริมาณแสง

การตรวจวัดปริมาณแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มแสงในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือโดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่างซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์

ภาพที่ 3: เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น Lab XRD-6100

ภาพที่ 4: แสงที่มองเห็นได้

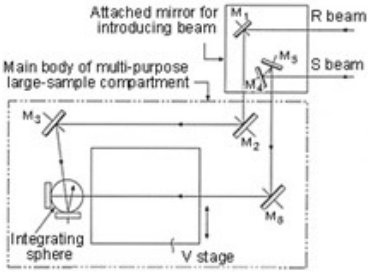
$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \tag{3}$$

โดยที่ $\lambda$ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

$n$ คือ ลำดับของการสะท้อน

$2d_{hkl}$ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ $(hkl)$

$\theta$ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนเมื่อวัดจากแนวระนาบที่กำลังพิจารณา




ภาพที่ 5: เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง UV–3600 Shimadzu UV–VIS–NIR spectrophotometer

ตารางที่ 1: ตารางแสดงอุณหภูมิและคุณสมบัติทางกายภาพ (ความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และดัชนีหักเห)

| อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา | (คุณสมบัติทางกายภาพ) | | |
|---|---|---|---|
| (องศาเซลเซียส) | ความถ่วงจำเพาะ | ความแข็ง Mohs Scale | ดัชนีหักเห |
| ไม่เผา | 2.6507 | 7.5 | 1.6196 |
| 200 | 2.6533 | 7.5 | 1.4340 |
| 400 | 2.6473 | 8.5 | 1.3956 |
| 600 | 2.6478 | 8.5 | 1.3850 |
| 800 | 2.6559 | 7.5 | 1.4210 |
| 1000 | 2.6253 | 7.5 | 1.4150 |

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และความถ่วงจำเพาะ จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาควอตซ์พบความถ่วงจำเพาะมากที่สุดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และที่ยังไม่เผา 200, 400, 600 องศาเซลเซียส มีค่าความถ่วงจำเพาะที่สอดคล้องกับทฤษฎีของควอตซ์คือ 2.64-2.66 ยกเว้นอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ที่ความจำเพาะน้อยที่สุดคือ 2.6253 น่าจะมาจากการเผาที่อุณหภูมิสูงทำให้มลทินบางชนิดหายไป

จากตารางที่ 1 สามารถหาค่าความแข็ง หาได้จากอุปกรณ์วัดความแข็ง DELUXE HARDNESS PICKS BY MINERALAB แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และค่าความแข็งแบบ Mohs Scale พบว่าที่ไม่เผาและการเผาที่อุณหภูมิ 200, 800 และ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งเท่ากับ 7.5 ตามทฤษฎีความแข็งของควอตซ์ แต่ที่อุณหภูมิ 400, 600 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งมากอยู่ที่ 8.5

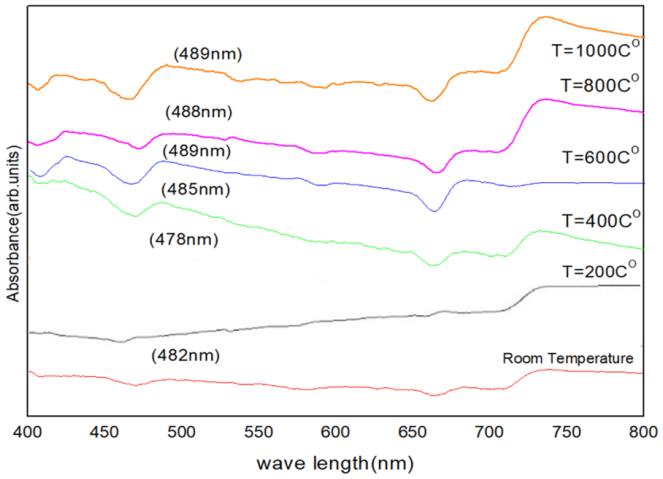
ค่าดัชนีหักเหแสง หาได้จากเครื่องวัดดัชนีหักเห ยี่ห้อ PRESIDIUM รุ่น Refractive Index ll จากตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และค่าดัชนีหักเหพบว่าค่าดัชนีหักเหของควอตซ์ที่ยังไม่เผามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 1.6196 และลดลงที่อุณหภูมิ 200 – 600 องศาเซลเซียส คือ 1.4340 1.3956 และ1.3850

ตารางที่ 2 เป็นการทดสอบธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่างของแร่ควอตซ์โดยใช้เครื่อง วิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี ยี่ห้อ PANalytical BV - MiniPal 4 ในการทดสอบพบว่า ธาตุหลักของควอตซ์คือ ซิลิกอนออกไซด์ นั้นพบในตัวอย่างที่ 1000 องศาเซลเซียส มี ซิลิกอนออกไซด์ มากที่สุดคือ 97.329 และที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีค่ามี ซิลิกอนออกไซด์ น้อยที่สุด

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และค่าการดูดกลืนแสงของควอตซ์ การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 600 และ 1000 องศาเซลเซียส เท่ากับ 489 นาโนเมตร และควอตซ์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้เร็ว คือควอตซ์ที่ไม่เผา และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เท่ากับ 482 นาโนเมตร และ 478 นาโนเมตร ตามลำดับ โดยค่าการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานและอุณหภูมิด้วย

ตารางที่ 2: ตารางแสดงธาตุองค์ประกอบที่อยู่ในตัวอย่างของควอตซ์

| ธาตุองค์ประกอบของควอตซ์จากเครื่อง X-ray Fluorescence | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)** | $SiO_2$ | $Ag_2O$ | CaO | $WO_3$ | BaO | $Fe_2O_3$ | $CO_3O_4$ | Cl |
| ไม่เผา | 96.895 | 0.822 | 0.029 | 2.175 | 0.139 | - | - | - |
| 200 | 96.218 | - | 0.026 | 3.517 | - | 0.035 | 0.204 | - |
| 400 | 96.345 | - | - | 3.365 | - | 0.065 | 0.225 | - |
| 600 | 94.671 | - | - | 4.756 | - | 0.072 | 0.359 | 0.142 |
| 800 | 95.248 | - | - | 4.285 | - | 0.102 | 0.367 | - |
| 1000 | 97.329 | - | - | 2.441 | - | 0.046 | 0.184 | - |

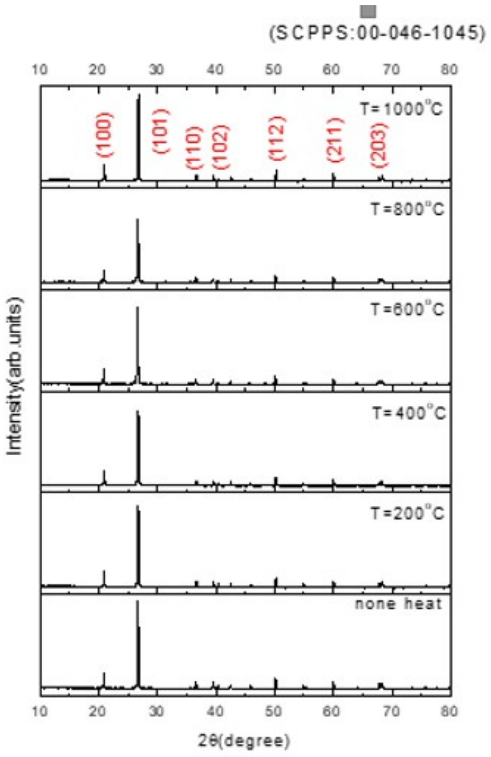



ภาพที่ 6: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) และค่าการดูดกลืนแสง

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกในภาพที่ 8 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของควอตซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นการเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิไม่เกิด 1000 °C จะยังคงความเป็นผลึกควอตซ์อยู่

## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของควอตซ์ธรรมชาติ จากเขาพระงาม อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ก่อนเผาและหลังเผาเพื่อหาเงื่อนไขที่อุณหภูมิ 200 400 600 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลดังนี้ วัดความถ่วงจำเพาะ มากที่สุดที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไม่เผาและเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ 600 องศาเซลเซียส คือ 2.6559 2.6507 2.6473 และ 2.6478 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความถ่วงจำเพาะของควอตซ์ที่มีความถ่วงจำเพาะ 2.64-2.66 วัดความแข็งแบบโมห์สเกล พบว่าควอตซ์ที่มีผลตามทฤษฎีคือควอตซ์คือยัง




ภาพที่ 7: ผลการวิเคราะห์ผงควอตซ์ก่อนเผาและหลังเผาโดยใช้เทคนิค XRD

ไม่เผา และเผาที่อุณหภูมิ 200 800 และ 1,000 องศาเซลเซียส มีค่าความแข็งที่ระดับ 7 ค่าดัชนีหักเหมีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีคือ 1.544 และ 1.553 การวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ที่เห็นได้ชัดคือการดูดกลืนแสงของควอตซ์ก่อนเผาและเผาที่ 200 องศาเซลเซียส สามารถดูดกลืนแสงได้ไวกว่าควอตซ์ที่เผาที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น การดูดกลืนแสงอยู่ที่ 482 นาโนเมตร และ 478 นาโนเมตร เป็นไปตามทฤษฎีของฟาเรียสที่ว่าควอตซ์จะดูดกลืนแสงอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 450-650 นาโนเมตร การวัดธาตุองค์ประกอบของควอตซ์จากเครื่อง X-ray Fluorescence พบค่าเฉลี่ยของแร่ SiO2 = 96.117 $Ag_2O$ = 0.822 CaO = 0.0275 $WO_3$ = 3.423 BaO = 0.139 $Fe_2O_3$ = 0.064 $Co_3O_4$ = 0.267 และ Cl = 0.142 ในควอตซ์ธรรมชาติทั้งก่อนและหลังการเผา การวิเคราะห์รูปแบบผลึก โดยได้ทำการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (XRD) เมื่อเปรียบเทียบจากฐานข้อมูล SCPPS:00-046-1045 ของควอตซ์ธรรมชาติ เป็นโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะโกนอล (hexagonal) จากการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ยังคงเป็นโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติทางภาพคงเดิม ที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยนั้นจะมีผลต่อความใสและสีของควอตซ์ ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้เกิดการจัดระเบียบในโครงสร้างให้สมบูรณ์มากขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จักรพงษ์ แก้วขาว หัวหน้าศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือในการทดลองในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ. “สถานการณ์การส่งออกสินค้าอัญมณี และเครื่องประดับไทย.” พ.ศ. 2562.

[2] ศิวาพร สหวัฒน์. “อัญมณีศาสตร์” กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พ.ศ. 2564.

[3] Thongnopkun P. “Color Change of Green Tourmaline from Madagascar by Heat Treatment, Gems and Jewelry Research Unit, Faculty of Gems.” Burapha University Chanthaburi Campus. 2017.

[4] กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. “แร่.” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์รุ่งเรืองรัตน์, พ.ศ. 2520.