



ร่างรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์พัฒน์ กิตติอัฐวาลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว

อาจารย์ ดร.ยศกิต เรืองทวีป

๓๐ กันยายน ๒๕๕๘



ร่างรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์พัฒน์ กิตติอัฐวาลย์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว

อาจารย์ ดร.ยศกิต เรืองทวีป

๓๐ กันยายน ๒๕๕๘

ชื่อเรื่อง	: การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย
ผู้วิจัย	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนต์พัฒน์ กิตติอัฐวาลย์
	: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว
	: อาจารย์ ดร.ยศกิต เรืองทวีป
ปีที่วิจัย	: 2558

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขในการเผาพลอยที่เหมาะสมในการเพิ่มมูลค่า โดยในการทดลองเมื่อนำแก้วบิสมส์บอโรซิลิเกตมาเผาพร้อมกับพลอยทับทิมและพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมดิบมีช่องว่างและสารเจือปนปะปนอยู่ที่เนื้อพลอยจำนวนมาก มีสีโทนม่วงอ่อน หลังจากที่ทำพลอยทับทิมมาล้างและทำการอุ่นพลอยพบว่าเห็นช่องว่างที่เนื้อพลอยเด่นชัดขึ้น สารเจือปนถูกชะล้าง และสีของพลอยทับทิมมีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมส์บอโรซิลิเกตและพลอยทับทิมเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ารอยแตกที่เนื้อพลอยน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการแทรกตัวของแก้วบิสมส์บอโรซิลิเกต มีสีโทนแดงอมชมพูและโทนแดงอมม่วง การวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมอยู่ในช่วง 3.886-4.1594 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของพลอยทับทิม (3.9 - 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำพลอยทับทิมไปเผาและเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1,100 นาโนเมตร ของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบพีคการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_1$) และ 550 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_2$) นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ Cr^{3+} ซึ่งดูดกลืนแสงสีเขียวทำให้พลอยทับทิมมีสีโทนแดงอมม่วง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

สำหรับพลอยสีเขียวทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้นไม่พบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด พลอยมีลักษณะใส มีสีเขียวเล็กน้อย ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมส์บอโรซิลิเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน พบว่าลักษณะของเนื้อพลอยใส

ขึ้น โดยได้สภาวะออกซิเดชันสีของเนื้อพลอยจะมีโทนเขียวอมเหลือง ส่วนได้สภาวะรีดักชันจะมีสีโทนน้ำตาลเหลือง จากการวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.9181-4.2262 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของสีเขียว (3.99-4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบพีกการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 และ 450 และช่วงความยาวคลื่น 550 และ 680 นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของพลอยสีเขียวอมเหลือง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

จากผลการการศึกษาพบว่า แก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตในสูตร $40\text{B}_2\text{O}_3 : 40\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20\text{SiO}_2$ สามารถที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับพลอยทับทิมคือการนำพลอยทับทิมที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มาเผาซ้ำที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะพลอยทับทิมที่ได้มีความใสและมีความมันวาว แก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของเนื้อพลอยได้เป็นอย่างดี ไม่พบรอยแตกบริเวณผิวของเนื้อพลอย และมีสีโทนแดงอมม่วงสดใส แต่การนำแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวยังคงไม่ได้สีเขียวตามมาตรฐานที่ต้องการ สามารถสรุปได้ว่า แก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตสูตรนี้เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวได้ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้ทดลอง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

ก

สารบัญ

ค

โครงการที่ 1 การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย บทที่ 1 บทนำ

- | | |
|--|---|
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย | 1 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสารจดสิทธิบัตร ฯลฯ
และหน่วยงานที่นำผล การวิจัยไปใช้ประโยชน์ | 2 |

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- | | |
|--|---|
| 2.1 ความรู้เกี่ยวกับแก้ว | 3 |
| 2.2 ความรู้เกี่ยวกับแก้ว | 4 |
| 2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้ว | 5 |
| 2.4 ชนิดของแก้ว | 6 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |

บทที่ 3 การทดลอง

- | | |
|-------------------------------------|----|
| 3.1 วิธีดำเนินการวิจัย | 10 |
| 3.2 การเตรียมแก้วบิส്മัทบอโรซิลิเกต | 11 |
| 3.3 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม | 12 |
| 3.4 การปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว | 14 |
| 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย | 16 |

บทที่ 4 ผลการทดลอง

- | | |
|--|----|
| 4.1 ลักษณะของแก้วบิส്മัทบอโรซิลิเกต | 20 |
| 4.2 ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม | 21 |
| 4.3 ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว | 42 |
| 4.4 ค่าดัชนีหักเหของพลอยที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ | 57 |

บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

- | | |
|--------------------------------|----|
| 5.1 สรุปผลและอภิปรายผลการทดลอง | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 59 |

เอกสารอ้างอิงโครงการที่ 1	61
แบบสรุปผู้บริหาร	63

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิตและการค้าอัญมณี และเครื่องประดับที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลกโดยเฉพาะทับทิมและแซฟไฟร์จัดเป็นอัญมณีที่สำคัญ และมีมูลค่าการส่งออกมากที่สุดของประเทศนอกเหนือจากเพชรเจียรไน แต่ในปัจจุบันเป็นที่รู้กันดีในวงการค้าอัญมณีว่าแหล่งวัตถุดิบพลอยของเมืองไทยมีการผลิตได้น้อยมาก มีเหมืองพลอยไม่กี่แห่งที่ยังประกอบการอยู่คือที่จังหวัดจันทบุรีในเขตอำเภอท่าใหม่ มีอยู่ 2-3 เหมือง และที่จังหวัดกาญจนบุรี ในเขตอำเภอบ่อพลอยอีก 2-3 เหมืองเท่านั้น โดยพลอยที่ขุดได้จากจังหวัดกาญจนบุรีจะเป็นพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินหรือไพลิน และนิล ซึ่งนิลของจังหวัดจันทบุรีส่วนมากจะเป็นนิลตันหรือนิลตะโก (black spinel) และนิลเสี้ยน (black pyroxene) ส่วนจังหวัดจันทบุรีพลอยที่ขุดได้ส่วนใหญ่จะนำมาเผาเป็นบุษราคัม (yellow sapphire) และผลิตเป็นพลอยเขียวส่อง (green sapphire) กับพลอยสตาร์ดำ (black star sapphire) อยู่บ้าง จะเห็นได้ว่าพลอยที่ขุดได้จากภายในประเทศมีน้อยลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวัตถุดิบจากภายนอกประเทศนำเข้ามาเพิ่มมูลค่าด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อนำไปเจียรไนต่อไป แต่ในการเพิ่มมูลค่าพลอยนั้นยังเป็นวิธีการที่เป็นความลับของนักเผาพลอยแต่ละคน การเผาพลอยเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการจะใช้เวลาการลองผิดลองถูกเป็นเวลานาน ทำให้พลอยได้รับความเสียหายเป็นจำนวนมากกว่าจะได้สีที่ดี พลอยที่ได้จากแหล่งต่างกันจะต้องมีวิธีการเผาต่างกัน เพื่อเป็นการหาองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในด้านการเผาพลอยและให้เป็นที่ยอมรับของตลาด จึงควรมีการทําวิจัยทางด้านนี้

การปรับปรุงคุณภาพพลอยโดยที่ไม่มีคำอธิบายทางวิทยาศาสตร์อย่างชัดเจนนั้น จะมีผลกระทบต่อมูลค่าทางเศรษฐกิจและความเชื่อมั่นของพลอยที่ปรับปรุงจากประเทศไทยมาแล้ว เช่นกรณีการเผาพลอยด้วยแบริเลียมเป็นต้น ดังนั้นคำอธิบายทางวิทยาศาสตร์จะเป็นตัวที่สร้างความเชื่อมั่นแก่ผู้ประกอบการ และทำให้ประเทศไทยไม่ตกเป็นเบี้ยล่างการโจมตีจากต่างชาติ จนทำให้พลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดนกดราคาและได้รับความไม่เป็นธรรม นอกจากนั้นประเทศไทยมีการทำงานวิจัยทางด้านอัญมณีน้อยมากดังนั้นหากมีการพัฒนานักวิทยาศาสตร์ตลอดจนบุคลากรในสายงานเพื่อประโยชน์ของประเทศชาติต่อไป ซึ่งผลจากโครงการวิจัยนี้ยังได้ผลิตนักศึกษาระดับปริญญาเอกและคาดว่าจะมีบทความตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติได้ เพื่อเป็นการยืนยันผลทางวิทยาศาสตร์จากคณะวิทยาศาสตร์จากคณะผู้วิจัยที่มีความชำนาญอย่างสูงด้านการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี และคณะผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ด้านต่างๆ อันจะส่งผลให้เกิดการยอมรับและพัฒนางานการพลอย และการปรับปรุงคุณภาพพลอยในประเทศให้ก้าวหน้าและเป็นที่ยอมรับของสากล ตลอดจนไม่ตกเป็นเบี้ยล่างทางการค้าจากต่างชาติอีก

1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1 เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีการเผาพลอยด้วยขั้นตอนและวิธีการทางวิทยาศาสตร์
2. เพื่อศึกษาและหาเงื่อนไขในการเผาพลอยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มมูลค่าพลอย

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

- ศึกษาผลคุณสมบัติต่อไปนี้ของแก้วทุกตัวอย่างได้แก่ ดรรชนีหักเห ความหนาแน่น และการดูดกลืนแสงช่วง uv-visible
- ทดสอบการเผาแก้วร่วมกับแซฟไฟร์

- เขียนบทความวิจัยลงในงานประชุมวิชาการและวารสารระดับชาติและนานาชาติต่างๆ ที่ได้รับการยอมรับ
- เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

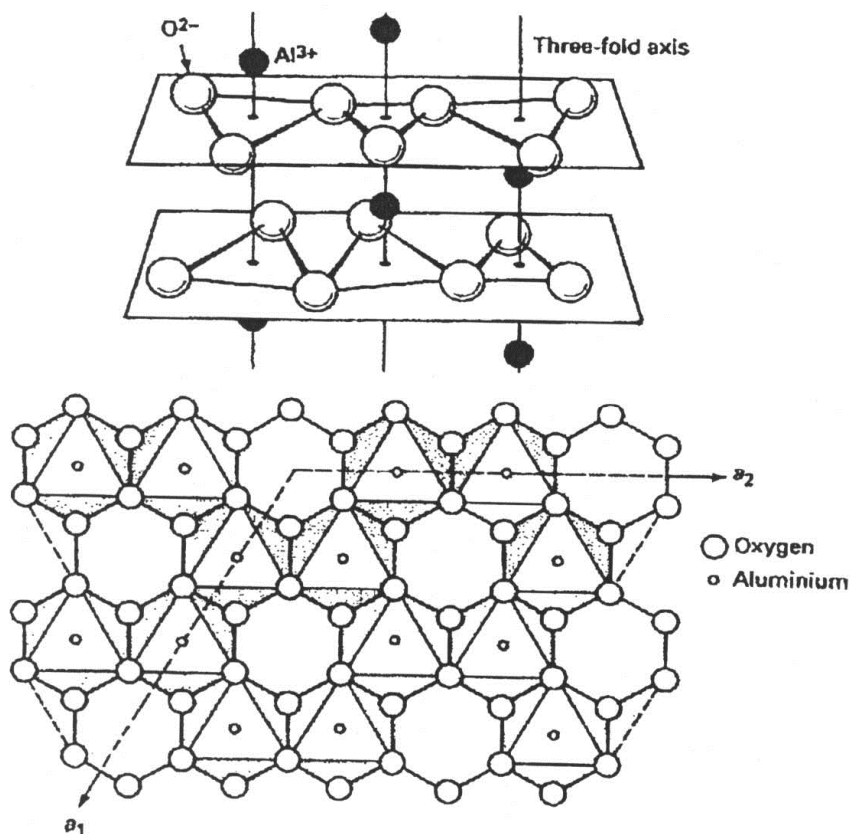
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เช่น การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

- พัฒนาคณะความรู้ทางวิทยาศาสตร์ของการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีให้เป็นที่ยอมรับในระดับสากล
- ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี
- พัฒนานักศึกษาระดับปริญญาเอกและบุคลากรในประเทศ
- ลดการเสียเปรียบทางการค้าอัญมณีกับต่างประเทศ
- เผยแพร่งานวิจัยในวารสารในระดับนานาชาติ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เกี่ยวกับพลอย

แซฟไฟร์เป็นพลอยในตระกูลคอร์รันดัม (Corundum) มีสูตรเคมีเป็น Al_2O_3 ตกผลึกได้โครงสร้างโดยธรรมชาติเป็นโครงสร้างแบบ Trigonal



รูปที่ 1 โครงสร้างของพลอยในตระกูลคอร์รันดัม [1]

จากรูปที่ 1 จะพบว่าตำแหน่งของไอออน Al^{3+} เป็น Octahedral Site โดยมี O^{2-} เป็น Nearest neighbors ในการเกิดเป็นผลึกตามธรรมชาติจะมีไอออนของโลหะทรานซิชัน เช่น Ti^{3+} , V^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+} , Fe^{3+} , Co^{3+} หรือไอออนของโลหะอื่น เข้าไปแทนที่ Al^{3+} ประมาณ 0.01 ถึง 1 โมลเปอร์เซ็นต์ การที่มีไอออนเหล่านี้เข้าไปแทนที่ Al^{3+} จะทำให้พลอยมีสีขึ้นได้ สามารถสรุปจากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ไอออนของโลหะในกลุ่ม Transition elements ที่ทำให้เกิดสีในพลอย [2]

Variety	Verneuil synthetics ²	Natural Coloring agents
Colourless sapphire	Pure	Pure
Ruby-ordinary type	Chromium	Chromium
Ruby-dark-red type	Chromium+Iron	Chromium+Iron
Pink sapphire	Chromium	Chromium
Blue sapphire	Iron+Titanium	Iron+Titanium
Purple and violet sapphire	Chromium+Iron+Titanium	Chromium+Iron+Titanium
Yellow sapphire	Nickel	Iron+colour centres in some types, or haematite plates
Orange sapphire	Nickel+Chromium	Iron+Chromium+colour Centres in some types, or Haematite plates
Green sapphire	Cobalt+Vanadium+Nickel	Iron
Colour-change sapphire	Vanadium	Chromium+Iron+Titanium (+Vanadium in sometypes)
Black star sapphire	-	Haematite plates

การเผาพลอยได้ทำกันมานานแล้ว พอสรุปได้ดังนี้ พลอยจากศรีลังกา Geuda Sapphire และ Kashmir Sapphire ถ้าเผาระหว่าง 1600°C ใน Reducing atmosphere จะได้สีน้ำเงินและใสขึ้นทำให้มีราคาเพิ่มขึ้นหลายเท่า ส่วนพลอยสีน้ำเงินเข้มจากออสเตรเลีย ไทย และเขมร มีราคาต่ำ ต้องเผาลดสีลงโดยเผาระหว่าง 800°C ถึง 900°C ในบรรยากาศออกซิเจน [3] พลอยจากเขมรสีแดงม่วงก็จะต้องหากรรมวิธีที่จะเผาลดสีม่วง ส่วนพลอยไม่มีสีหรือสีเหลืองอ่อนอาจจะเผาให้สีเหลืองเข้มได้โดยเผาในออกซิเจนระหว่าง 1600°C ถึง 1900°C

การเผาพลอยเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการจะใช้เวลาการลองผิดลองถูกเป็นเวลานาน ทำให้พลอยได้รับความเสียหายเป็นจำนวนมากกว่าจะได้สีที่ดี

2.2 ความรู้เกี่ยวกับแก้ว [3]

ในอดีตที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ต่างนิยามความหมายของแก้วไว้มากมาย โดยมุ่งเน้นถึงองค์ประกอบที่สำคัญของการเตรียมแก้ว เช่น องค์ประกอบทางเคมี แก้วส่วนใหญ่เตรียมได้จากสารซิลิกา

แต่ภายหลังได้มีการค้นพบว่าสามารถนำสารอนินทรีย์อื่นมาใช้ในการเตรียมแก้ว ดังนั้นการนิยามความหมายของแก้วจากองค์ประกอบทางเคมีที่ใช้จึงไม่ใช่คำตอบที่ถูกต้องนัก นักวิทยาศาสตร์บางส่วนนิยามโดยมุ่งเน้นถึงกระบวนการเตรียมแก้ว แก้วโดยทั่วไปแล้วเตรียมได้จากการเย็นตัวจากกระบวนการหลอมเหลว แต่แท้จริงแล้วแก้วสามารถเตรียมได้โดยไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการหลอมเหลว เช่น กระบวนการโซลเจล (Sol-gel) และการแผ่รังสีของนิวตรอน เป็นต้น ความหมายของแก้วยังคงคลุมเครืออยู่จากการศึกษาของนักวิทยาศาสตร์ที่ผ่านมาสามารถสรุปสมบัติที่สำคัญของแก้วได้ 2 ประเด็นคือ 1 แก้วมีการจัดเรียงโครงสร้างอะตอมอย่างไม่เป็นระเบียบ และ 2 แก้วทุกชนิดจะแสดงพฤติกรรม Glass transition temperature หรือ T_g ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่าวัสดุชนิดใดๆ ไม่ว่าจะเป็น สารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือ โลหะ และเตรียมด้วยเทคนิคใดๆก็ตาม หากแสดงพฤติกรรมดังกล่าวถือว่าวัสดุชนิดนั้นเป็นแก้ว

จนกระทั่ง ในปี 1945 American Society for Testing and Materials ได้ให้ความหมายของแก้วว่า "แก้ว คือผลิตภัณฑ์ของสารอนินทรีย์ที่หลอมเหลวและเย็นตัวลงโดยไม่ผ่านขั้นตอนการตกผลึก "

2.3 องค์ประกอบทางเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้ว

วัตถุดิบใช้เป็นโครงสร้างหลักในกลุ่มของ Glass formers

เป็นตัวที่ทำให้เกิดเป็นเนื้อแก้ว ธาตุออกไซด์ที่สามารถเป็น Glass former ได้ เช่น SiO_2 , B_2O_3 และ P_2O_5 เป็นต้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของแก้ว แก้วแต่ละชนิดสามารถมี Glass former เป็นองค์ประกอบหลักในโครงสร้างได้มากกว่า 1 ชนิด การเรียกชื่อชนิดของแก้วจะอ้างอิงตามประเภทของธาตุออกไซด์นั้นๆ เช่น แก้วซิลิเกต แก้วบอเร็ท และแก้วฟอสเฟต เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีธาตุออกไซด์บางชนิดสามารถเกิดเป็นเนื้อแก้วได้ภายใต้เงื่อนไขเฉพาะที่กำหนด เช่น GeO_2 , Bi_2F_2 , As_2O_3 , Sb_2O_3 , TeO_2 , Al_2O_3 , Ga_2O_3 , V_2O_5 , BeF_2 และ ZrF_4 เป็นต้น การเลือกชนิดของ Glass former สำหรับการเตรียมแก้วเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากเกี่ยวข้องกับสมบัติของแก้วที่เตรียมได้

วัตถุดิบเป็นตัวช่วยหลอมในกลุ่มของ Flux

ฟลักซ์ (Flux) เป็นสารที่ใช้ลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว สร้างความเสถียรภาพ และช่วยพัฒนาการก่อตัวเป็นแก้ว โดยฟลักซ์จะทำปฏิกิริยาเคมีอย่างรวดเร็ว ทำลายพันธะในโครงสร้างแก้วทำให้ใช้พลังงานในการหลอมรวมองค์ประกอบต่างๆก่อตัวเป็นแก้วน้อยลง ฟลักซ์มีหลายชนิด ได้แก่ Na_2O , K_2O , B_2O_3 , CaF_2 , PbO และ Li_2O เป็นต้น

วัตถุดิบเป็นตัวไล่ฟองอากาศ Refining agent

เป็นตัวที่เติมลงในแนวเพื่อไล่ฟองอากาศออกจากเนื้อแก้ว สารที่เป็นตัวไล่ฟองอากาศ เช่น As_2O_3 , Sb_2O_3 , NaCl , NaF , CaF_2 และ Na_3AlF_6 เป็นต้น โดยปกติแล้วจะใส่สารไล่ฟองอากาศในปริมาณที่น้อย (น้อยกว่า 1%) และมีผลกระทบต่อสมบัติของแก้วเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

วัตถุดิบเป็นตัวให้สีในแก้ว Colorant

เป็นตัวควบคุมการเกิดสีของแก้ว โดยส่วนใหญ่แล้วสีของแก้วเกิดจากระดับพลังงานชั้น 3d ของธาตุกลุ่มโลหะทรานซิชันและ ระดับพลังงานชั้น 4f ของธาตุกลุ่มหายาก แสดงดังรูปที่ 2.2 สารให้สีจะใช้เฉพาะในกรณีที่ต้องการควบคุมของการเกิดสีของแก้วให้เป็นตามที่ต้องการและมักจะใช้ในปริมาณน้อย เหล็กออกไซด์ (Iron oxide) เป็นธาตุออกไซด์ที่พบได้เป็นปกติในทรายที่ใช้ในการผลิตแก้วซิลิเกต ทำให้เกิดสีที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์แก้ว นอกจากนี้สารให้สีบางตัวถูกใช้เพื่อต่อต้านการเกิดสีของสารให้สีชนิดอื่น เรียกว่า Decolorant

2.4 ชนิดของแก้ว

การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบเช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่มักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบของแก้ว ดังนี้

1. แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass) ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป

2. แก้วบอโรซิลิเกต เป็นแก้วที่มีการเติมบอริกออกไซด์ลงไปทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำและทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนแก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

3. แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์อยู่มากกว่า 24% โดยน้ำหนักจะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่นทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม และแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆได้ใช้ทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพง

4. แก้วโอปอล (Opal glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) ทำให้มีการตกผลึก เนื่องจากสามารถหลอม และขึ้นรูปได้ง่าย จึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเมื่อนำไปผ่านกระบวนการอบ (Tempering) หรือการเคลือบ (Laminating)

5. แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass) มีอลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลักมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening point) สูงพอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

6. แก้วอัลคาไลน์เอิร์ท อลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-earth alumino silicate) มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ (BaO) ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

7. แก้วเซรามิก (Glass-ceramics) เป็นแก้วประเภท Lithium Aluminosilicate ที่มีไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) หรือเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO₂) ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใสขึ้นกับชนิดของผลึก แก้วเซรามิกจะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำสามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้

นอกจากนี้ อาจมีแก้วประเภทอื่นๆ อีกหลายประเภท ขึ้นอยู่กับส่วนผสมที่แตกต่างกันออกไป แต่เนื่องจากไม่มีการใช้ที่แพร่หลายจึงไม่นำมากล่าวในที่นี้

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุชาติพิทย์ ศิริไพศาล และคณะ [4] ได้ศึกษาการเผาทับทิมมองซูที่อุณหภูมิต่ำ (900°C) เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมงไม่สามารถทำให้สีน้ำเงินในเม็ดทับทิมมอหายไป เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดลักษณะคล้ายหมอกแทนและบ่อยครั้งจะเกิดของแข็งสีขาวอยู่ภายในตามรอยแตกและที่ผิวของทับทิม นอกจากนี้ยังเกิดสีส้มแดงตามบริเวณต่างๆ ชัดเจนขึ้น

มงคล ราชนิยม [5] ได้ศึกษาถึงผลของความร้อนต่อคุณสมบัติของทับทิมจากเวียตนามโดยแบ่งการศึกษออกเป็น 3 ส่วนคือ 1. วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงผลึกของผงพลอย โดยเครื่อง XRD พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ c/a ร้อยละ 0.7299 มากที่สุดที่ 1300°C 2. วัดการเปลี่ยนแปลงสีของพลอยก่อนและหลังการเผาโดยใช้เครื่องวัดสีแบบภาพ ผลพบว่าภายหลังให้ความร้อนค่าดัชนีสี a^* มีค่าเพิ่มขึ้นพลอยจะมีสีแดงมากขึ้น ในขณะที่ค่าดัชนีสี b^* มีค่าลดลงทำให้พลอยมีสีม่วงมากขึ้นและค่าดัชนีความสว่าง L เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย พลอยมีการเปลี่ยน a^* มากที่สุดในการให้ความร้อนครั้งแรกของทุกชุดการทดลอง ที่ 1400°C เหมาะสำหรับการให้ความร้อนแก่ทับทิม 3. วัดการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมรอบพาราแมกเนติกส์ไอออนของเหล็กสามบวกและโครเมียมสามบวกผลการวัด ESR spectra ของผงพลอย 6 สภาวะการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Fe^{3+} จะเหมาะสมมากที่สุดที่ $1400 - 1600^{\circ}\text{C}$ ผลการวัด ESR ของผลึกพลอย 6 สภาวะการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Fe^{3+} ที่เหมาะสมมากที่สุดที่ 1400°C

Zheng Wen Chen [6] ได้ศึกษาพบว่า Fe^{3+} ใน Al_2O_3 ไม่สามารถเข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ Al^{3+} เพราะรัศมีไอออนใหญ่กว่า Al^{3+} จึงถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปทางออกซิเจน ในกรณีของขนาดและประจุไม่เหมาะสมเข้ามาแทนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ของ impurity ถูกกำหนดโดยการรบกวนกันระหว่าง ขนาดของ impurity และประจุของ impurity นั้น ๆ ตัวอย่างเช่น Mn^{2+} ในผลึก Al_2O_3 แม้ว่ารัศมีไอออนของ Mn^{2+} จะใหญ่กว่า ก็จะไปแทนที่ Al^{3+} , Mn^{2+} จะไม่เคลื่อนที่ไปไกล จะเคลื่อนที่ไปจุดกึ่งกลางของชั้นออกซิเจน ผลกระทบของประจุ impurity ในทิศทางการแทนที่ใหญ่กว่าขนาดของ impurity เหมือนกับกรณีของ Fe^{3+} และ Mn^{2+} ในผลึก LiNbO_3 รัศมีไอออนของ Fe^{3+} เล็กกว่า Li^+ อย่างไรก็ตาม impurity ทั้งสองจะเคลื่อนที่ไกลจากจุดกึ่งกลางของชั้นออกซิเจนเนื่องจากประจุของ impurity มีขนาดใหญ่ ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของไอออน impurity ในคอร์รันดัมขึ้นอยู่กับประจุและขนาดของ impurity

พงศ์พิทย์ วิโนทัย และคณะ [7] ได้ศึกษาการเผาเพื่อเพิ่มหรือลดสีของแซปไฟร์จากอัฟริกา ในสภาวะที่เหมาะสมซึ่งจะทำให้พลอยมีค่าสูงขึ้น รวมทั้งเพิ่มความใสของพลอยให้ดีขึ้นด้วย พลอยสีแดงแกมม่วงนั้นเมื่อเผาในออกซิเจนที่อุณหภูมิพอเหมาะจะทำให้สีม่วงลดลงจึงทำให้พลอยมีราคาสูงขึ้น เมื่อดูโครงสร้างของพลอยไม่พบการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่เมื่อตรวจสอบการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของพลอยพบว่าไอออนของเหล็กได้ขยับจากตำแหน่งเดิมไปสู่ตำแหน่งที่มีความสมมาตรมากขึ้น

พงศ์พิทย์ วิโนทัย และคณะ [8] ได้ทำการเผาทับทิมก็เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการเปลี่ยนหรือลดสีของทับทิมให้อยู่ในระดับที่ทำให้มูลค่าของมันเพิ่มขึ้น ในการทดลองพบว่าการเผาทับทิมจากแทนซาเนียที่มีสีน้ำเงินติดอยู่เล็กน้อยในบรรยากาศออกซิเจนสามารถทำให้ทับทิมมีความสมบูรณ์มากขึ้น ในขณะที่การตรวจสอบโดยเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) พบว่าการให้ความร้อนแก่ทับทิมที่อุณหภูมิ 1200°C จะทำให้อัตราส่วนของ c/a ของโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลลดลงมากที่สุด สำหรับจำนวนไอออนของ Fe^{2+} ที่เปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} สามารถตรวจวัดได้โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนสเปกโตรมิเตอร์ (ESR) และ

พบว่าต้องเพิ่มอุณหภูมิในการเผา สิ่งเหล่านี้ทำให้เราเข้าใจถึงสองปัจจัยในการลดสีน้ำเงินในทับทิมจากแทนซาเนียสำหรับอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองซึ่งทำให้ทับทิมมีคุณภาพดีคือ 1300°C

อภินิหารรัตน์ รอดศรี [9] ได้ศึกษาผลของความร้อนต่อสมบัติทางกายภาพของทับทิมพม่า โดยการเผาที่อุณหภูมิ 1200 1300 1400 1500 1600 และ 1700°C ในบรรยากาศของออกซิเจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมงโดยการศึกษามีรายละเอียดดังนี้ การหาธาตุองค์ประกอบของทับทิมโดย EDXRF (Energy Dispersive X-ray fluorescence spectrometer) พบว่าทับทิมมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอลูมิเนียม ออกไซด์ (99.46%) โดยมี โครเมียม (0.45%) ไททาเนียม (0.23%) วาเนเดียม (0.04%) และเหล็ก (0.03%) เป็นมลทิน การวัดการเปลี่ยนโครงสร้างผลึกของทับทิมโดยใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของค่า c/a ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1200°C การวัดการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟย่านเอกซ์แบนด์ด้วยเครื่อง ESR spectrometer พบว่าที่อุณหภูมิ 1200°C ปริมาณการดูดกลืนเนื่องจาก Cr^{3+} จะมากที่สุด สำหรับเหล็กปรากฏสัญญาณที่ต่ำมาก การวัดการเรืองแสงของทับทิมด้วยเครื่อง Spectrofluorometer โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตความยาวคลื่น 195 นาโนเมตรไปกระตุ้นพบว่าก่อนและหลังการเผามีการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมของการเรืองแสงน้อยมากคือมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดที่ 470 นาโนเมตร การวัดการดูดกลืนรังสีช่วงอัลตราไวโอเลต แสงที่ตามองเห็น และใกล้อินฟราเรด พบว่าก่อนการเผามีสเปกตรัมของการดูดกลืนของ Cr^{3+} อยู่ที่ 406 ถึง 425 นาโนเมตร และ 554 นาโนเมตร เมื่อให้ความร้อนแก่ทับทิมสเปกตรัมจะมีการขยับไปด้านที่มีความยาวคลื่นมากกว่า โดยที่ก่อนเผาการดูดกลืนแสงสีแดงจะต่ำสุดรองลงมาคือหลังเผาที่อุณหภูมิ 1200°C จากการถ่ายภาพทับทิมหลังการเผาพบว่าแกนสีดำหายไป ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าทับทิมพม่าที่นำมาวิจัยนี้ควรมีการปรับปรุงคุณภาพโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1200°C ซึ่งทำให้มีสีแดงดีขึ้นและแกนสีดำหายไป

ตรีเดชน์ กิตติธวัชวลย์ [2] ได้ศึกษาแซฟไฟร์ธรรมชาติสองสีคือแซฟไฟร์สีน้ำเงินและแซฟไฟร์สีชมพู แซฟไฟร์สีน้ำเงินถูกใช้เป็นตัวอย่งในการศึกษาผลของธาตุเบริลเลียมต่อการเปลี่ยนสีของแซฟไฟร์หลังการเผาร่วมกับสารเบริลเลียมออกไซด์ในบรรยากาศแบบออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1700°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ในการทดสอบการแพร่ของธาตุเบริลเลียมเข้าไปในแซฟไฟร์ ได้วิเคราะห์โดยใช้เทคนิคอินดักทีฟพลาสมาแมสสเปกโตรเมตรีแบบใช้แสงเลเซอร์ (LA-ICP-MS) สีของแซฟไฟร์ก่อนและหลังการเผากับสารเบริลเลียมออกไซด์ได้ศึกษาด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR) สเปกโทรสโกปี และการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเลต-ช่วงที่ตามองเห็น (UV-Vis) ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนสีของแซฟไฟร์สีน้ำเงินภายหลังการเผาร่วมกับสารเบริลเลียมออกไซด์ไม่ได้เกิดจากการแพร่ของธาตุเบริลเลียม และจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสีที่เปลี่ยนไปของแซฟไฟร์จากสีน้ำเงินเป็นสีเหลืองเกิดมาจากการเปลี่ยนประจุ (charge transfer) ของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ไปสู่เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ส่วนแซฟไฟร์สีชมพูถูกใช้ในการศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) โดยใช้เทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์สเปกโทรสโกปี ตัวอย่างถูกเผาในบรรยากาศแบบออกซิเดชันโดยใช้อุณหภูมิในการเผาตั้งแต่ 1200°C ถึง 1700°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ได้ศึกษาระดับพลังงานของโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ก่อนและหลังการเผา พบว่าโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) มีการเปลี่ยนตำแหน่งไปในระหว่างการเผา

ตรีเดชน์ กิตติอัฐวาลย์และพิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ [1] ได้ศึกษาผลของความร้อนที่มีต่อสีและความใสของโพลินเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1300 , 1400 , 1500 และ 1600 °C ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากการวัดสีพบว่าโพลินหลังเผามีสีน้ำเงินเข้มขึ้นส่วนความใสมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ตรีเดชน์ กิตติอัฐวาลย์และคณะ [10] ได้ศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโลหะแทรนซิชันในทับทิมธรรมชาติ ในการทดลองนี้ได้ทำการวัดการดูดกลืนแสงของผลึกทับทิมตัวอย่างโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร พบว่า ทับทิมให้แถบการดูดกลืนที่ 405 และ 555 นาโนเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากโครเมียมไอออน (Cr^{3+}) โดยเกิดจากการอิเล็กตรอนทรานซิชันจากระดับพลังงานจาก $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_2$ and $^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$ ตามลำดับ ดังนั้นโครเมียมไอออนจะมีการดูดกลืนแสงในช่วงสีเหลือง-เขียวและสีม่วงตามลำดับ จากนั้นเกิดการอิเล็กตรอนทรานซิชันจาก $^4\text{T}_1$ และ $^4\text{T}_2$ ลงสู่ ^2E จากนั้นจึงลดระดับพลังงานจากระดับ ^2E ลงสู่ $^4\text{A}_2$ ซึ่งจะเกิดการเรืองแสงในช่วงสีแดง

Achiwawanich S. et al [11] ได้ศึกษาผลที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวของทับทิมจาก Mong Hsu และโพลินจากกาญจนบุรี หลังการเผาในบรรยากาศรีดักชัน (5 mol% H_2/Ar) พบว่าพลอยมีความใสขึ้นหลังการเผาและจากการตรวจสอบด้วยเทคนิคทางพื้นผิวสามารถสรุปได้ว่าการเผาในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อยทำให้สถานะทางไอออนของเหล็กเปลี่ยนไป

บทที่ 3 การทดลอง

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

แผนดำเนินการวิจัยในการวิจัยครั้งนี้แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม/ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีที่ 1											
	ระยะเวลา (เดือนที่)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีการหลอมแก้วร่วมกับพลอย	←→											
2. จัดหาและเตรียมตัวอย่างพลอย		←→	→									
3. เตรียมแก้วปลอดตะกั่วโดยวิธีการหลอมและทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว			←→	→								
4. วัดสมบัติทางวิทยาศาสตร์ของแก้ว ได้แก่ ความหนาแน่น และสมบัติการดูดกลืนแสงของแก้ว					←→	→						
5. ทดลองเผาพลอยทับทิมจากมาดากัสการ์ร่วมกับแก้วที่หลอมได้							←→	→				
6. ทดลองเผาพลอยสีเขียวจากมาดากัสการ์ร่วมกับแก้วที่หลอมได้								←→	→			
7. วิเคราะห์คุณสมบัติพลอยหลังการเผาได้แก่ - ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง - ความหนาแน่น - สี - องค์ประกอบโดย XRF - โครงสร้างโดย XRD							←→	→	→	→		
8. สรุปข้อมูลทั้งหมดเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการเผาพลอยดังกล่าว								←→	→	→	→	
9. ส่งงานเข้าร่วมประชุมวิชาการระดับนานาชาติและระดับชาติ								←→	→	→	→	→
10. สรุปผลและเขียนรายงานวิจัย												←→

 แทนสิ่งที่ได้ดำเนินการไปแล้วจริง
 แทนสิ่งที่ต้องทำตามแผนงาน

3.2 การเตรียมแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกต

การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ผู้วิจัยเลือกใช้บิสมาทออกไซด์ (Bi_2O_3) ที่ให้ค่าดัชนีหักเหสูง มีสีน้ำตาล และช่วยลดความหนืดของแก้ว แทนที่ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สำหรับเตรียมแก้วตัวอย่างเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ซึ่งรายละเอียดสามารถแจกแจงได้ดังนี้

3.2.1 การเตรียมสารเคมีสำหรับแก้วตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตในสูตร $40\text{B}_2\text{O}_3 : 40\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20\text{SiO}_2$ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยโมล ปริมาณ 30 กรัม ปริมาณสารเคมีที่ใช้แสดงดังตารางที่ 3.2 จากนั้นชั่งสารเคมีที่ได้จากการคำนวณแล้วผสมและคนสารแต่ละตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้แท่งคนสารก่อนที่จะนำไปใส่เข้าหลอม เพื่อนำไปหลอมในเตาไฟฟ้าต่อไป

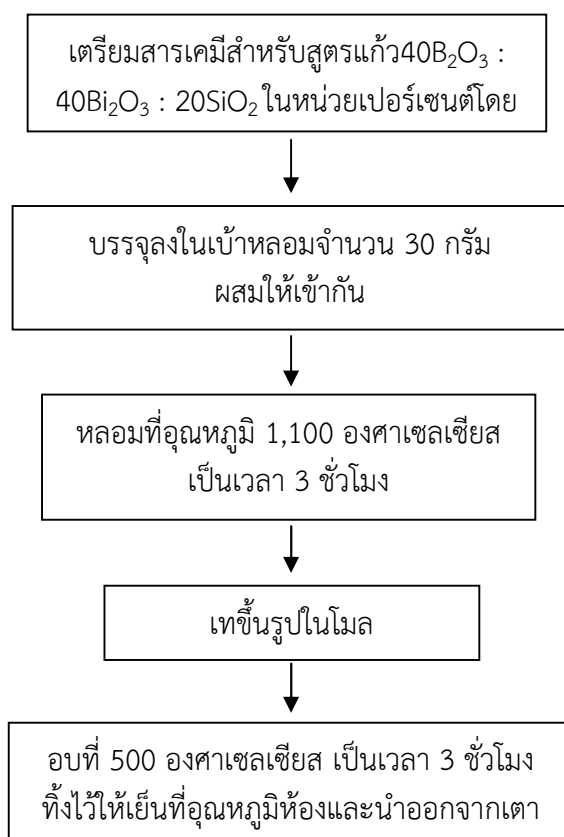
ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการหลอมแก้ว

สารเคมี	B_2O_3	Bi_2O_3	SiO_2
ปริมาณที่ใช้ (30 กรัม)	3.6920	24.7140	1.5934

3.2.2 การหลอมแก้ว

โดยกระบวนการในการเตรียมแก้วตัวอย่างเป็นดังนี้

- 1) บรรจุสารเคมีสำหรับเตรียมแก้วตัวอย่างลงในเข้าหลอมจำนวน 30 กรัม และนำเข้าเตาไฟฟ้าโดยหลอมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และค้างอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 2) เมื่อครบตามเวลากำหนด นำเข้าหลอมออกจากเตาไฟฟ้า จากนั้นเทแก้วเหลวลงบนแบบพิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อขึ้นรูปแก้ว และเกิดเย็นตัวลงอย่างช้าๆ
- 3) นำแก้วที่ขึ้นรูปแล้วออกจากแบบพิมพ์ และนำไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้แก้วตัวอย่างค่อยๆเย็นตัวลงในเตาไฟฟ้าจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 4) นำแก้วออกจากเตาไฟฟ้า และนำไปวัดสมบัติทางกายภาพและทางแสง กระบวนการเตรียมแก้วตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมแก้วตัวอย่าง

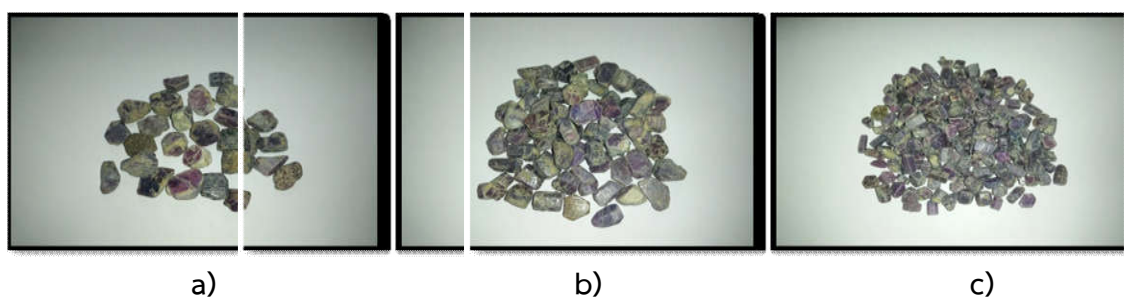
งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย 1) การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม และ 2) การปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว ซึ่งรายละเอียดของแต่ละส่วนสามารถแจกแจงได้ดังนี้

3.3 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมประกอบด้วย 1) การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมเบื้องต้น และ 2) การเผาพลอยทับทิมร่วมกับแก้วบิสมัทสโบโรซิลิเกต มีรายละเอียดได้ดังนี้

3.3.1 การเตรียมพลอยทับทิม

ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมพลอยทับทิมจากประเทศมาดากัสการ์ โดยทำการแยกขนาดพลอยทับทิมออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ ขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก แสดงดังรูปที่ 3.2 จากนั้นได้ทำการคัดเลือกพลอยขนาดเล็กที่มีคุณภาพมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม โดยการเผาพร้อมกับแก้วบิสมัทสโบโรซิลิเกต (Glass filling treatment) เพื่อให้พลอยทับทิมมีคุณภาพดีขึ้น สวยงามขึ้น และมีมูลค่าเพิ่มขึ้น

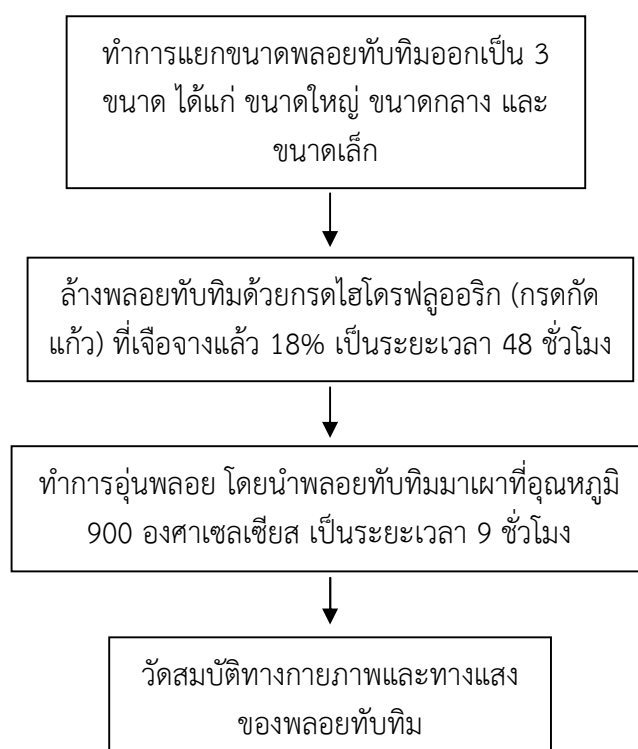


รูปที่ 3.2 พลอยทับทิมขนาดต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย

a) พลอยทับทิมขนาดใหญ่ b) พลอยทับทิมขนาดกลาง c) พลอยทับทิมขนาดเล็ก

3.3.2 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมเบื้องต้น

ขั้นตอนแรกผู้วิจัยได้ทำการล้างพลอยทับทิมด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (กรดกัดแก้ว) ที่เจือจางแล้ว 18% เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดเนื้อพลอย และชะล้างสารเจือปนต่างๆที่อุดอยู่ในช่องว่างของเนื้อพลอยทับทิม ซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนสีของเนื้อพลอยในระหว่างทำการเผา จากนั้นนำพลอยทับทิมที่ผ่านการล้างด้วยกรดมาทำการอุ่นพลอย โดยนำพลอยทับทิมมาเผาด้วยเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ปราศจากการเติมสารเคมี เพื่อละลายสารเจือปนบางส่วนที่ไม่ถูกชะล้างออกด้วยกรดด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก แล้ววัดสมบัติทางกายภาพและทางแสงของพลอยทับทิม กระบวนการเตรียมพลอยทับทิม แสดงดังภาพที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพการเตรียมพลอยทับทิม

3.3.3 การเผาพลอยทับทิมเผาพร้อมกับแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกต

ขั้นตอนแรกนำแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตที่ได้จากการหลอมมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด Rocklab หลังจากนั้นนำแก้วที่บดละเอียดแล้วมาผสมรวมกับพลอยทับทิมที่นำไปเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ซึ่งการออกแบบการทดลองเผาพลอยทับทิมที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ ศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 3.3 จากนั้นนำพลอยทับทิมออกจากเตาไฟฟ้าทันทีและเทลงบนภาชนะที่ทำจากสแตนเลส แล้วปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

ตารางที่ 3.3 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการเผาพลอยทับทิมร่วมกับแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกต

ตัวอย่าง	Label	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา พลอย (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเผา พลอย (ชั่วโมง)
พลอยทับทิม	1000°c_12h	1,000	12
	1000°c_18h		18
	1000°c_24h		24
	1100°c_12h	1,100	12
	1100°c_18h		18
	1100°c_24h		24
	1200°c_12h	1,200	12
	1200°c_18h		18
	1200°c_24h		24
	1300°c_12h	1,300	12
	1300°c_18h		18
	1300°c_24h		24
	1400°c_12h	1,400	12
	1400°c_18h		18
	1400°c_24h		24

3.4 การปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวย

ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมพลอยสีเขียวจากประเทศมาดากัสการ์ แสดงดังรูปที่ 3.4 ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวจะใช้แก้วบอโรซิลิเกตสูตรเดียวกันกับที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม รวมถึงการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น แต่จะแตกต่างกันในกระบวนการเผาพลอยสีเขียวร่วมกับแก้วบอโรซิลิเกต โดยในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวผู้วิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การเผาพลอยสีเขียวภายใต้สภาวะออกซิเดชัน กล่าวคือการเผาพลอยสีเขียวภายใต้บรรยากาศปกติที่มีออกซิเจน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และสภาวะรีดักชัน ซึ่งมีการเติมผงคาร์บอนลงไปปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แสดงดังตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.4 พลอยสีเขียวที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.4 อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในเผาพลอยสีเขียวภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	สภาวะ	Label	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาพลอย (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาพลอย (ชั่วโมง)	ปริมาณผงคาร์บอน (กรัม)
พลอยสีเขียว	ออกซิเดชัน (Oxidation)	1200°c_12h	1,200	12	-
		1200°c_18h		18	-
		1200°c_24h		24	-
		1300°c_12h	1,300	12	-
		1300°c_18h		18	-
		1300°c_24h		24	-
		1400°c_12h	1,400	12	-
		1400°c_18h		18	-
		1400°c_24h		24	-
	รีดักชัน (Reduction)	1200°c_1g Carbon	1,200	12	1
		1200°c_3g Carbon		12	3
		1200°c_5g Carbon		12	5
		1300°c_1g Carbon	1,300	12	1
		1300°c_3g Carbon		12	3
		1300°c_5g Carbon		12	5
		1400°c_1g Carbon	1,400	12	1
		1400°c_3g Carbon		12	3
		1400°c_5g Carbon		12	5

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัย

การวิเคราะห์ข้อมูลการวิจัยเป็นการวิเคราะห์แก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตและพลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้โดยจะวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพลอย ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิลและค่าสี ค่าความหนาแน่น โดยมีวิธีดังนี้

3.5.1 ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง

ผู้วิจัยได้นำพลอยที่ใช้ในงานวิจัยมาทำการส่องด้วยกล้องไมโครสโคป (Microscope) รุ่น BX41 บริษัท Olympus กำลังขยาย 40 เท่า แสดงดังรูปที่ 3.5 เพื่อดูลักษณะโดยทั่วไปของเนื้อพลอย และเปรียบเทียบลักษณะของเนื้อพลอยก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 3.5 กล้องไมโครสโคป (Microscope) รุ่น BX41

3.5.2 องค์ประกอบของพลอยทับทิม

การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบพลอยที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ของบริษัท Panalytical รุ่น Minipal-4 แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวัด XRF (X-Ray Fluorescence)

3.5.3 การวิเคราะห์โครงสร้าง

การวิเคราะห์โครงสร้างพลอยที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer-XRD) ของบริษัท Shimadzu รุ่น XRD-6100 แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้าง XRD (X-ray Diffractometer)

3.5.4 ค่าความหนาแน่น

การวัดความหนาแน่นของแก้วบิสมาลโบโรซิลิเกตและพลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการของอาร์คิมิดีส (Archimedes's principle) โดยทำการชั่งน้ำหนักในอากาศ (W_a) และชั่งในไซลีน (W_L) โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของบริษัท AND รุ่น HR-200 ดังรูปที่ 3.8 และทำการวัดแก้วตัวอย่างขึ้นละ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ } (\rho) = \left(\frac{W_a}{W_a - W_L} \right) \times \rho_L$$

- เมื่อ
- ρ หมายถึง ความถ่วงจำเพาะ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
 - W_a หมายถึง น้ำหนักในอากาศ (กรัม)
 - W_L หมายถึง น้ำหนักในของเหลว (กรัม)
 - $W_a - W_L$ หมายถึง น้ำหนักที่หายไปของเหลว หรือ หมายถึง น้ำหนักของเหลวที่ปริมาตรเท่ากัน



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดค่าความหนาแน่น (Density)

3.5.5 ค่าการดูดกลืนแสงและสี

นำแก้วบิสมัทสโบโรชิลิกเกตและพลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาวิเคราะห์หาค่าการดูดกลืนแสงและค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ ในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR spectrophotometer รุ่น UV-3600 บริษัท Bara Scientific ดังรูปที่ 3.9 นำข้อมูลของน้ำหนักเหล่านี้มาคำนวณหาการดูดกลืนแสงจากสมการ

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon c b$$

เมื่อ	I_0	คือ ความเข้มของแสงที่กระทบสารละลาย
	I	คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลายออกมา
	ϵ	คือ โมลาร์แอบซอร์บติวิตี
	b	คือ ความหนาแน่นของสารละลาย มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
	c	คือ ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น โมลต่อลิตร
	A	คือ การดูดกลืนแสง (Absorbance)



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (UV-Vis-NIR spectrophotometer)

3.5.6 ค่าดัชนีหักเห

นำแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาวิเคราะห์หาค่าดัชนีหักเหเปรียบเทียบกับแก้วตะกั่วด้วยเครื่อง Refractive Index Meter II (PRIM II) บริษัท Presidium ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเห (PRIM II)

บทที่ 4 ผลการทดลอง

ผู้วิจัยทำการพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ผู้วิจัยเลือกใช้บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) ที่ให้ค่าดัชนีหักเหสูง มีสีน้ำตาล และช่วยลดความหนืดของแก้ว แทนที่ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สำหรับเตรียมแก้วตัวอย่างเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย จากนั้นได้นำแก้วตัวอย่างไปเผาพร้อมกับพลอยทับทิมและพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง ได้แก่ ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพลอย ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิลและค่าสี ค่าความหนาแน่น

4.1 ลักษณะของแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกต

ลักษณะของแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตหลังจากผ่านการหลอมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าแก้วมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีสีโทนน้ำตาลเข้ม แสดงดังรูปที่ 4.1

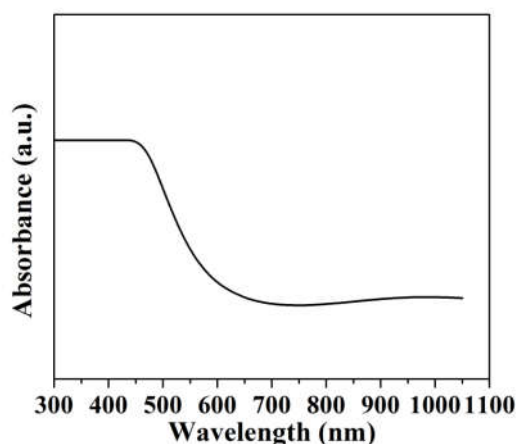


รูปที่ 4.1 แก้วบิสมัทบอโรซิลิเกต

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วตัวอย่าง ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล ปริมาตรต่อโมล (Molar volume) และค่าดัชนีหักเห แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 4.8040 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าปริมาตรเชิงโมลอยู่ที่ 47.0960 ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 450 นาโนเมตร และมีค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.773 ซึ่งใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว (ค่าดัชนีหักเหของแก้วตะกั่วประมาณ 1.569-1.805) [12] แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความหนาแน่น ค่าปริมาตรเชิงโมล และค่าการดูดกลืนแสงของแก้วตัวอย่าง

ตัวอย่าง	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ค่าปริมาตรเชิงโมล (ลูกบาศก์เมตรต่อโมล)	ค่าการดูดกลืนแสง (นาโนเมตร)	ค่าดัชนีหักเห
แก้วบิสมัทบอโรซิลิเกต	4.8040	47.0960	450	1.773

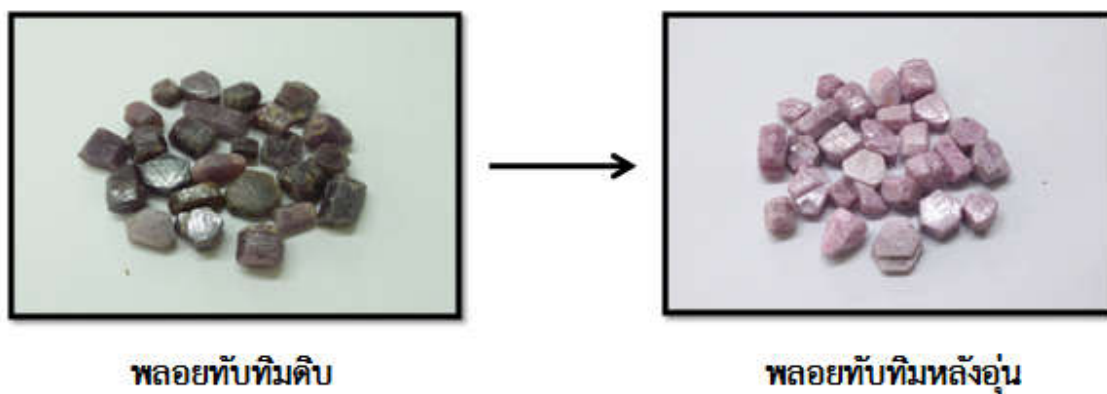


รูปที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนแสงของแก้วบิสมัทสบอโรซิลิเกต

4.2 ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม

4.2.1 ลักษณะพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น

จากการล้างพลอยทับทิมด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (กรดกัดแก้ว) ที่เจือจางแล้ว 18% เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำพลอยทับทิมผ่านการล้างด้วยกรด มาทำการอุ่นพลอย โดยนำพลอยทับทิมมาเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง โดยปราศจากการเติมสารเคมี พบว่า ลักษณะของพลอยมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด เนื้อพลอยทับทิมสะอาดขึ้น สามารถมองเห็นช่องว่างของเนื้อพลอยได้ด้วยตา และสีของพลอยทับทิมมีการเปลี่ยนแปลงจากสีโทนม่วงเข้มเป็นสีโทนแดงอมม่วงอ่อน แสดงดังรูปที่ 4.3



พลอยทับทิมดิบ

พลอยทับทิมหลังอุ่น

รูปที่ 4.3 พลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น

4.2.2 ลักษณะพลอยทับทิมที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมัทสบอโรซิลิเกตที่อุณหภูมิต่างๆ

ลักษณะของพลอยทับทิมที่ได้จากการเผาพร้อมกับแก้วบิสมัทสบอโรซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 4.4 ถึง 4.8



a)



b)



c)

รูปที่ 4.4 ผลอยั้บที่ัฒนหภูมิ 1,000 องศาสเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



b)



c)

รูปที่ 4.5 ผลอยั้บที่ัฒนหภูมิ 1,100 องศาสเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



b)



c)

รูปที่ 4.6 ผลอยั้บที่ัฒนหภูมิ 1,200 องศาสเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



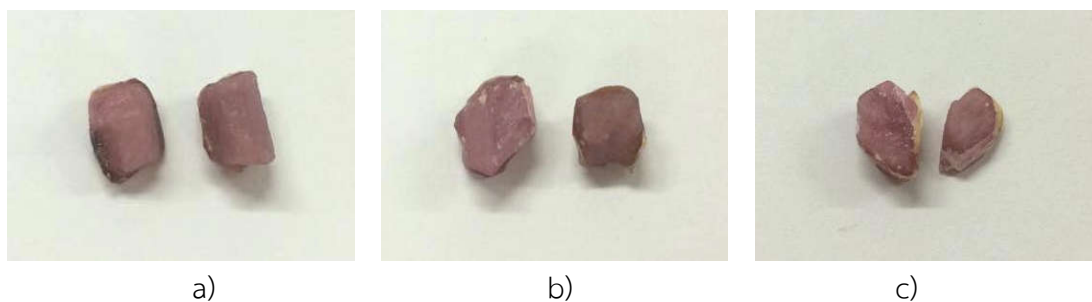
b)



c)

รูปที่ 4.7 ผลอยั้บที่ัฒนหภูมิ 1,300 องศาสเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 พลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส
a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง

พลอยทับทิมที่ได้จากการเผาพร้อมกับแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตที่อุณหภูมิ 1,000 และ 1,100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่าพลอยทับทิมที่ได้มีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมองด้วยตาเปล่า ผิวของเนื้อพลอยไม่เรียบ บางส่วนของเนื้อพลอยเห็นรอยแตกได้อย่างชัดเจน และมีสีโทนแดงอมม่วง ขณะที่อุณหภูมิ 1,200 และ 1,300 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่าเนื้อพลอยทับทิมมีลักษณะด้านไม่เป็นมันวาว พบรอยแตกบนผิวพลอยน้อยลง มีสีโทนแดงอมม่วงเข้มมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่าเนื้อพลอยทับทิมมีลักษณะด้านไม่เป็นมันวาว มีสีโทนแดงอมม่วงเข้มมากที่สุด พบแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตเพียงส่วนน้อย เนื่องจากเกิดการระเหยที่อุณหภูมิสูง

4.2.3 ลักษณะพลอยทับทิมที่นำไปเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

จากการทดลองเผาพลอยทับทิมร่วมกับแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าลักษณะของพลอยทับทิมที่ได้ยังคงไม่ได้มาตรฐานตามที่ต้องการ ผู้วิจัยจึงได้นำพลอยทับทิมมาเผาซ้ำอีกครั้ง โดยนำพลอยทับทิมที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มาเผาซ้ำที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.2 ลักษณะของพลอยทับทิมเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึง 4.13

ตารางที่ 4.2 แสดงอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในเผาพลอยทับทิมซ้ำ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซ้ำ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลาที่ใช้ในการเผาซ้ำ (ชั่วโมง)
พลอยทับทิมที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง	1,000	12
		18
		24
	1,100	12
		18
		24
	1,200	12
		18
		24
	1,300	12
		18
		24
	1,400	12
		18
		24



a)



b)



c)

รูปที่ 4.9 พลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



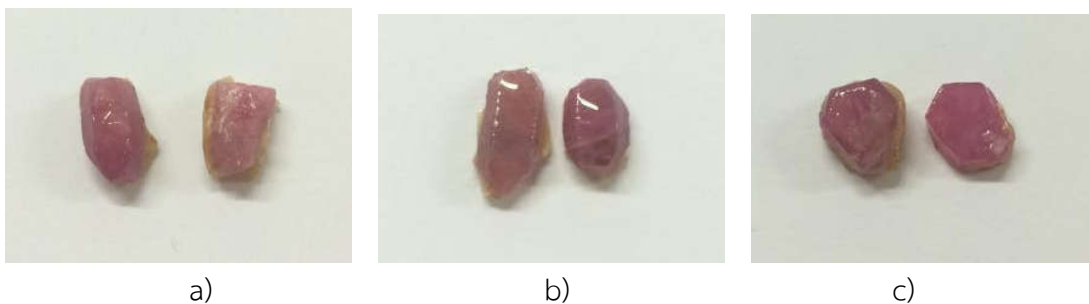
b)



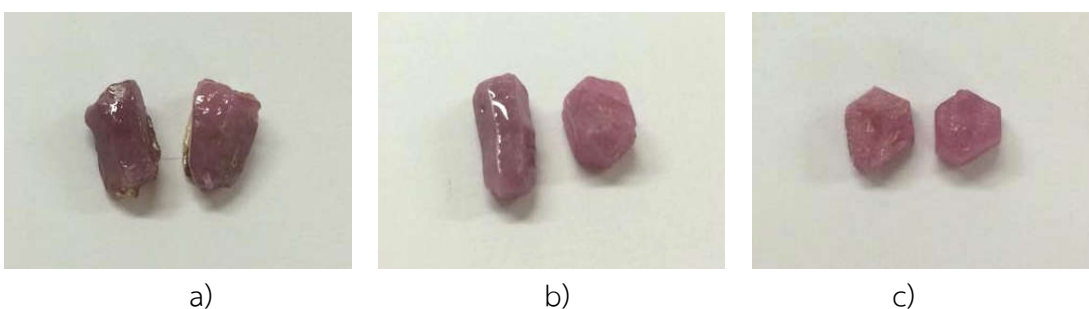
c)

รูปที่ 4.10 พลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 ผลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส
a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 ผลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส
a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



รูปที่ 4.13 ผลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส
a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง

จากการนำผลอยทับทิมมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าผลอยทับทิมที่ได้มีลักษณะดีขึ้นอย่างเห็นชัด โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะผลอยทับทิมที่ได้มีความใสและมีความมันวาว แก้วบิสมีสบอโรซิลิเกตสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของเนื้อผลอยได้เป็นอย่างดี ไม่พบรอยแตกบริเวณผิวของเนื้อผลอย และมีสีโทนแดงอมม่วงสดใส ขณะที่อุณหภูมิเผาซ้ำ 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง ลักษณะผลอยทับทิมที่ได้มีความใสและมีความมันวาวน้อยลง และมีสีโทนแดงอมม่วงเข้มขึ้น

4.2.4 สมบัติทางกายภาพและทางแสงของพลอยทับทิม

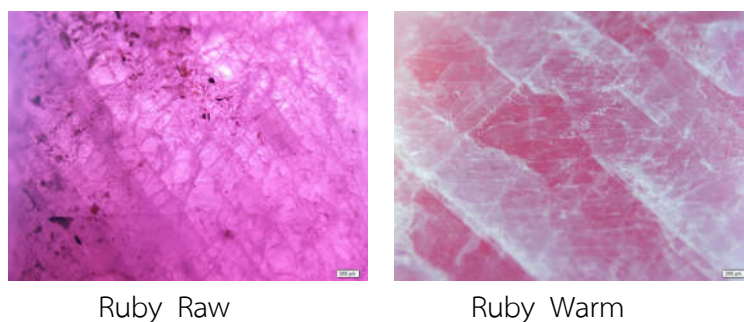
ผู้วิจัยได้นำพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 มาวัดสมบัติทางกายภาพและทางแสง ได้แก่ ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพลอย ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล และค่าสี ค่าความหนาแน่น ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตัวอย่าง	Label
พลอยทับทิมดิบ	Ruby_Raw
พลอยทับทิมหลังอุ่น	Ruby_Warm
1,000 °c 12 ชั่วโมง	1,000°c_12h
1,000 °c 18 ชั่วโมง	1,000°c_18h
1,000 °c 24 ชั่วโมง	1,000°c_24h
1,100 °c 12 ชั่วโมง	1,100°c_12h
1,100 °c 18 ชั่วโมง	1,100°c_18h
1,100 °c 24 ชั่วโมง	1,100°c_24h
1,200 °c 12 ชั่วโมง	1,200°c_12h
1,200 °c 18 ชั่วโมง	1,200°c_18h
1,200 °c 24 ชั่วโมง	1,200°c_24h
1,300 °c 12 ชั่วโมง	1,300°c_12h
1,300 °c 18 ชั่วโมง	1,300°c_18h
1,300 °c 24 ชั่วโมง	1,300°c_24h
1,400 °c 12 ชั่วโมง	1,400°c_12h
1,400 °c 18 ชั่วโมง	1,400°c_18h
1,400 °c 24 ชั่วโมง	1,400°c_24h
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 12 ชั่วโมง	Re_1,000°c_12h
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 18 ชั่วโมง	Re_1,000°c_18h
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 24 ชั่วโมง	Re_1,000°c_24h
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 12 ชั่วโมง	Re_1,100°c_12h
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 18 ชั่วโมง	Re_1,100°c_18h
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 24 ชั่วโมง	Re_1,100°c_24h
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 12 ชั่วโมง	Re_1,200°c_12h
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 18 ชั่วโมง	Re_1,200°c_18h
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 24 ชั่วโมง	Re_1,200°c_24h

1) ผลการวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิม

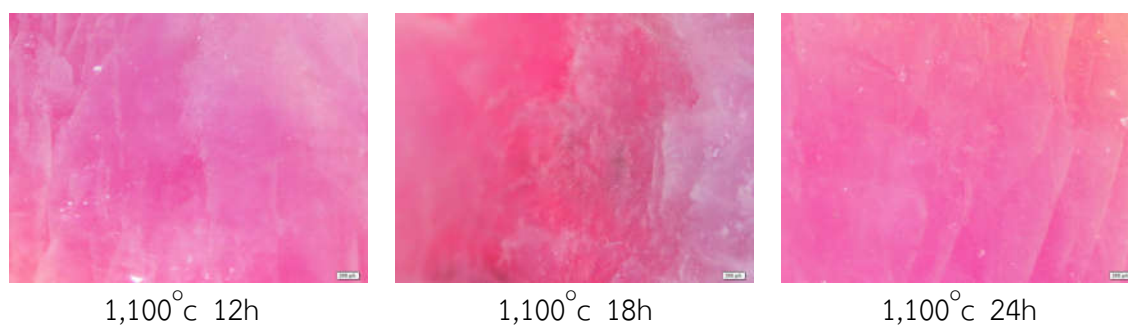
จากการส่องพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆด้วยกล้องไมโครสโคป (Microscope) รุ่น BX41 บริษัท Olympus กำลังขยาย 40 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.14 ถึง 4.24 พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมดิบมีช่องว่างและสารเจือปนปะปนอยู่เนื้อพลอยจำนวนมาก มีสีโทนม่วงอ่อน หลังจากก็นำพลอยทับทิมมาล้างและทำการอุ่นพลอยพบว่าเห็นช่องว่างที่เนื้อพลอยเด่นชัดขึ้น สารเจือปนถูกชะล้าง และสีของพลอยทับทิมมีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตและพลอยทับทิมเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ารอยแตกที่เนื้อพลอยน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการแทรกตัวของแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกต มีสีโทนแดงอมชมพูและโทนแดงอมม่วง



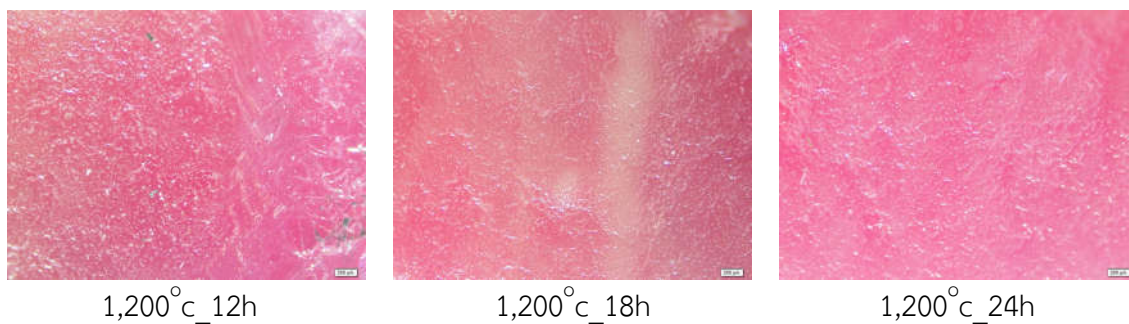
รูปที่ 4.14 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น



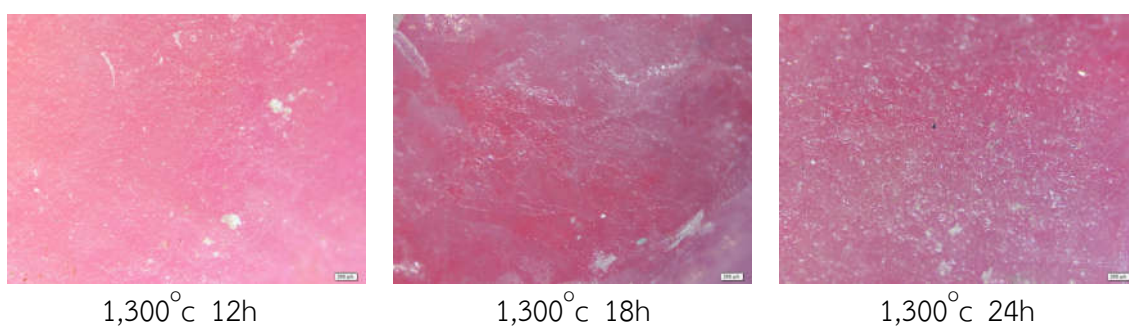
รูปที่ 4.15 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



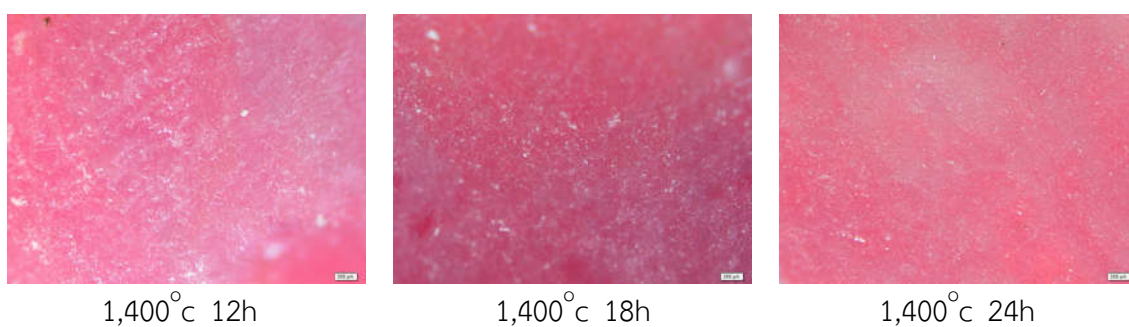
รูปที่ 4.16 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.20 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



Re_1,100°C_12h



Re_1,100°C_18h



Re_1,100°C_24h

รูปที่ 4.21 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส



Re_1,200°C_12h



Re_1,200°C_18h



Re_1,200°C_24h

รูปที่ 4.22 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



Re_1,300°C_12h



Re_1,300°C_18h

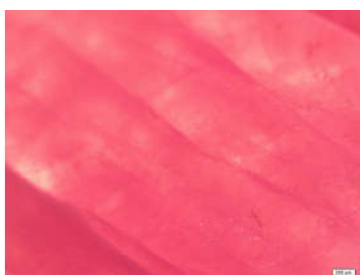


Re_1,300°C_24h

รูปที่ 4.23 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส



Re_1,400°C_12h



Re_1,400°C_18h



Re_1,400°C_24h

รูปที่ 4.24 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF ของพลอยทับทิม

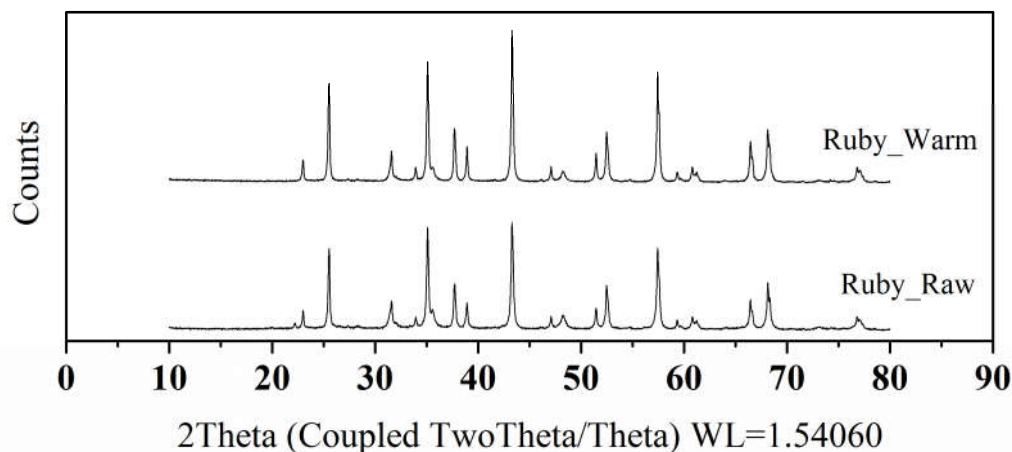
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometer ผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าองค์ประกอบของธาตุส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด มีเพียงซิลิกา (SiO_2) ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัดหลังจากนำพลอยทับทิมไปเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากเนื้อแก้วบางส่วนที่ติดอยู่ตรงผิวของพลอยทับทิมแทรกเข้าไปในเนื้อพลอย ทำให้สัดส่วนของซิลิกาที่ตรวจวัดได้มีค่าน้อยลง

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของธาตุออกไซด์ที่พบในพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ

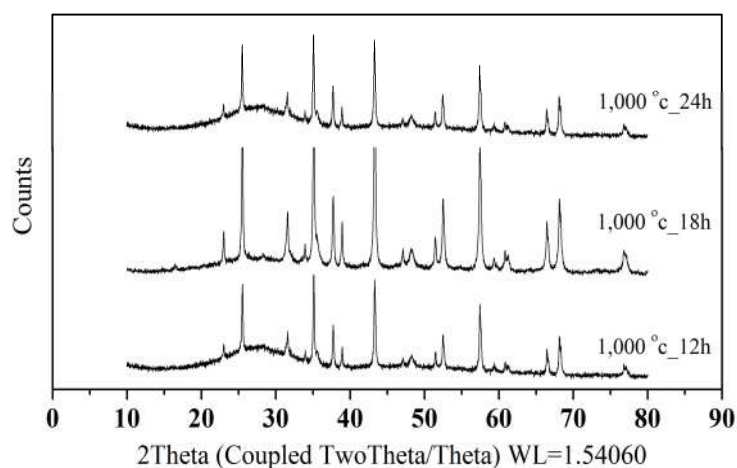
ธาตุ ออกไซด์	องค์ประกอบของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ																
	พลอย ทับทิมดิบ	พลอย ทับทิม หลัง อุ่น	1,000 องศาเซลเซียส			1,100 องศาเซลเซียส			1,200 องศาเซลเซียส			1,300 องศาเซลเซียส			1,400 องศาเซลเซียส		
			12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง
Al ₂ O ₃	95.502	98.08 7	77.551	86.89	86.077	87.123	82.493	82.81	89.286	87.159	85.852	83.402	77.756	81.252	90.623	94.79	94.251
SiO ₂	3.115	0.9	8.08	5.756	5.257	8.911	6.487	6.393	4.351	5.403	5.083	6.365	8.305	6.747	4.855	2.989	4.023
P ₂ O ₅	0.47	0.28		0.408		0.955			0.528	0.665	0.227				0.243	0.31	0.531
K ₂ O	0.102	0.009	0.084	0.053	0.057	0.051											
CaO	0.083	0.06	0.16	0.164	0.138	0.263	0.157	0.161	0.173	0.207	0.143	0.142	0.168	0.167	0.115	0.088	0.139
TiO ₂	0.307	0.181	0.105	0.024	0.018	0.073	0.079	0.021	0.011	0.03	0.063	0.011	0.013	0.032	0.012	0.009	0.009
Cr ₂ O ₃	0.103	0.076	0.042	0.045	0.065	0.025	0.043	0.054	0.025	0.079	0.059	0.059	0.048	0.052	0.047	0.059	0.041
Fe ₂ O ₃	0.214	0.181	0.096	0.095	0.122	0.039	0.107	0.138	0.108	0.155	0.184	0.126	0.113	0.092	0.136	0.172	0.122
Co ₃ O ₄	0.072	0.044	0.08	0.121	0.117	0.051	0.109	0.089	0.102	0.112	0.102	0.072	0.062	0.058	0.08	0.135	0.139
Bi ₂ O ₃	0.032	0.166	13.785	6.417	8.147	2.51	10.526	10.335	5.398	6.171	8.287	9.824	13.524	11.6	3.888	1.449	0.746
ZnO		0.016															
NiO			0.017	0.026					0.018	0.019		0.011					

3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของพลอยทับทิม

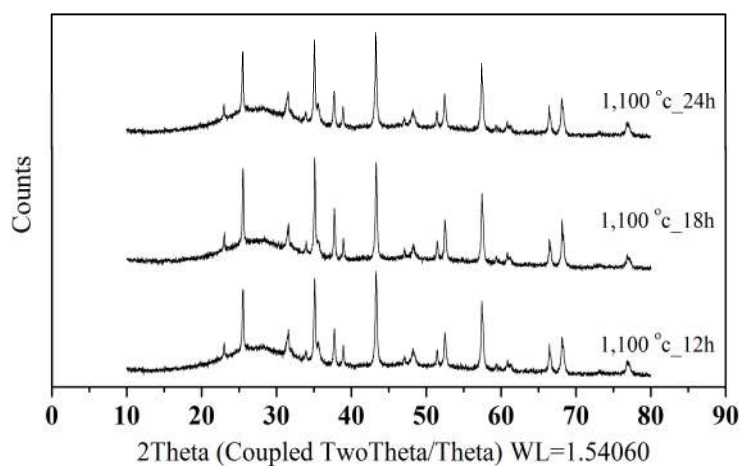
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.35 ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3



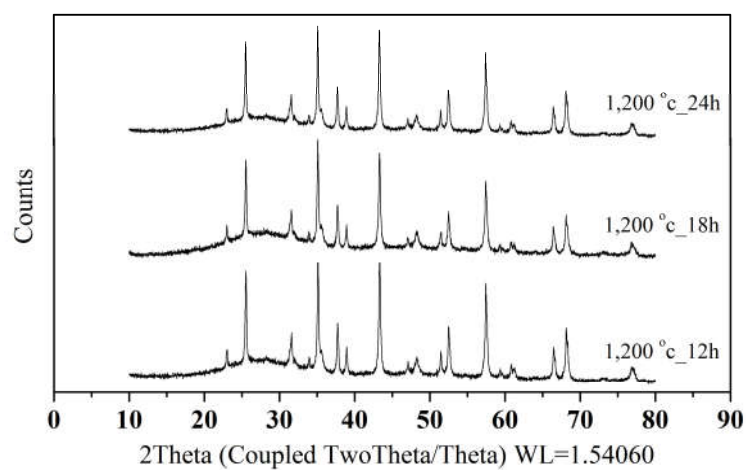
รูปที่ 4.25 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น



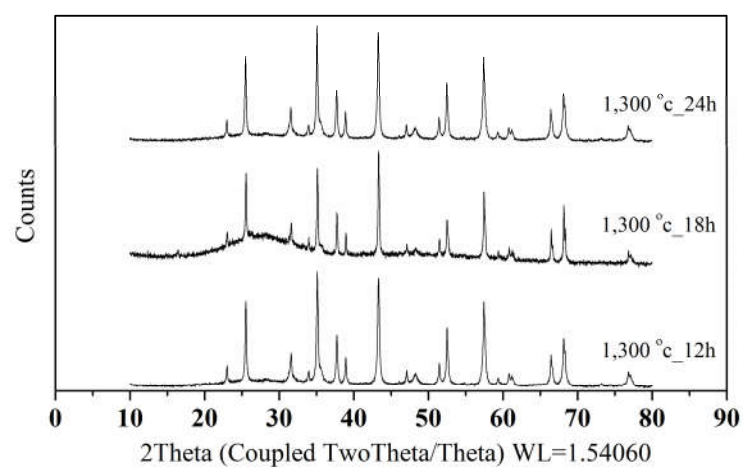
รูปที่ 4.26 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



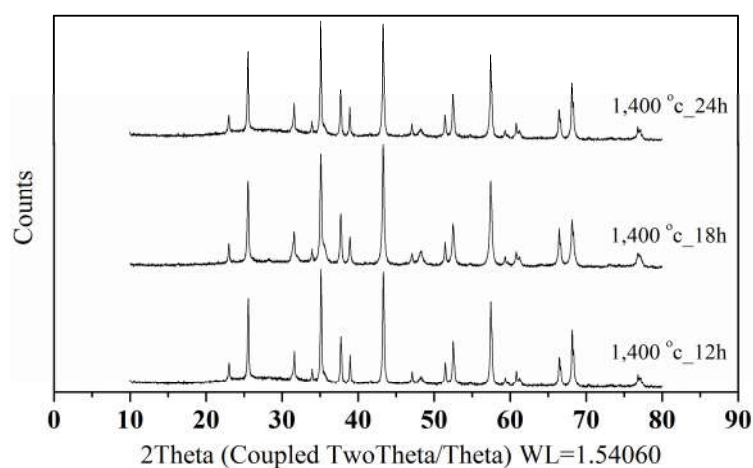
รูปที่ 4.27 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส



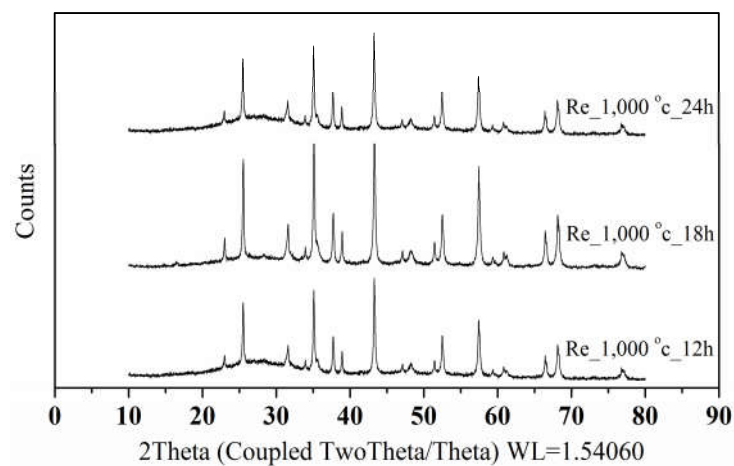
รูปที่ 4.28 โครงสร้างผลึกของฟลอยด์ทาบิมที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



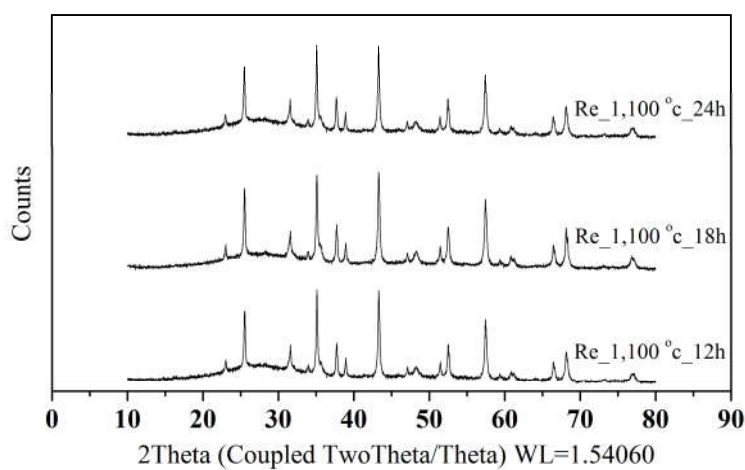
รูปที่ 4.29 โครงสร้างผลึกของฟลอยด์ทาบิมที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส



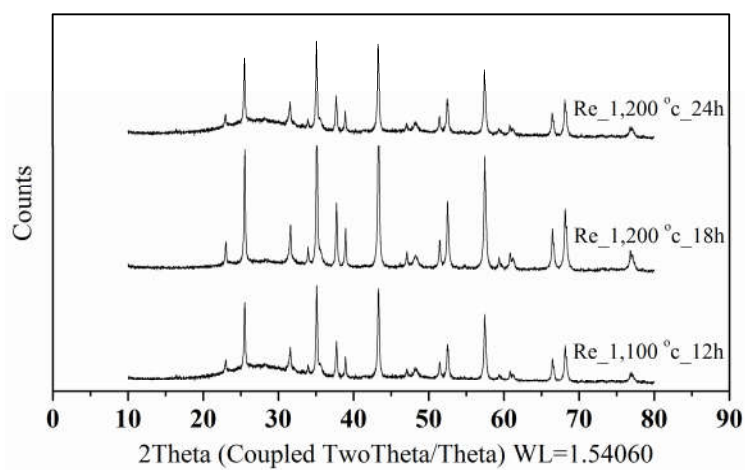
รูปที่ 4.30 โครงสร้างผลึกของฟลอยด์ทาบิมที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส



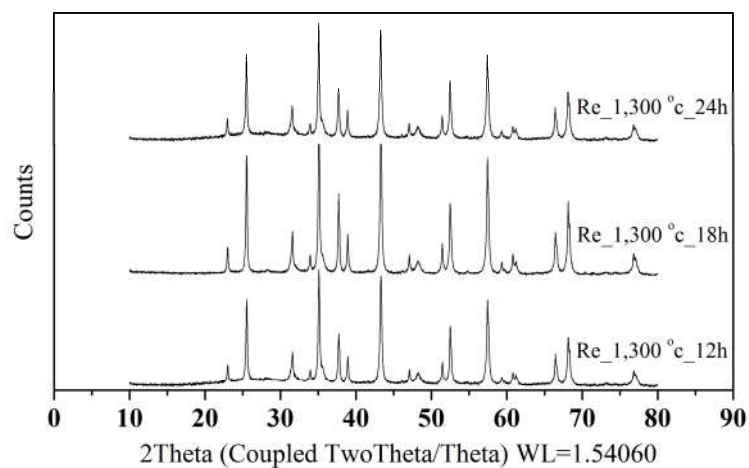
รูปที่ 4.31 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส



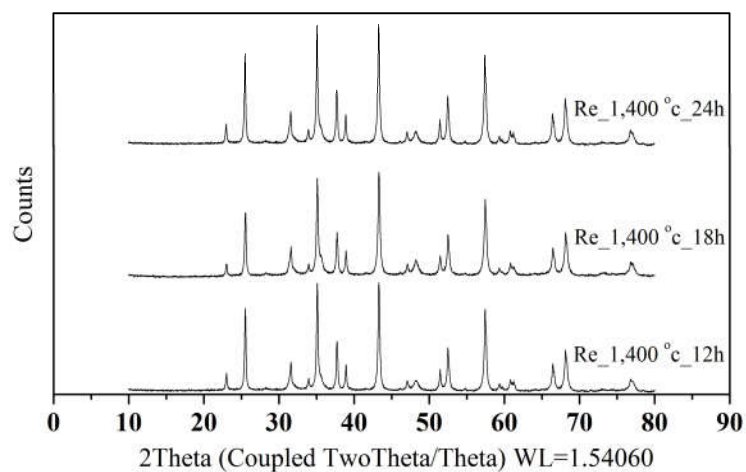
รูปที่ 4.32 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.33 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.34 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส



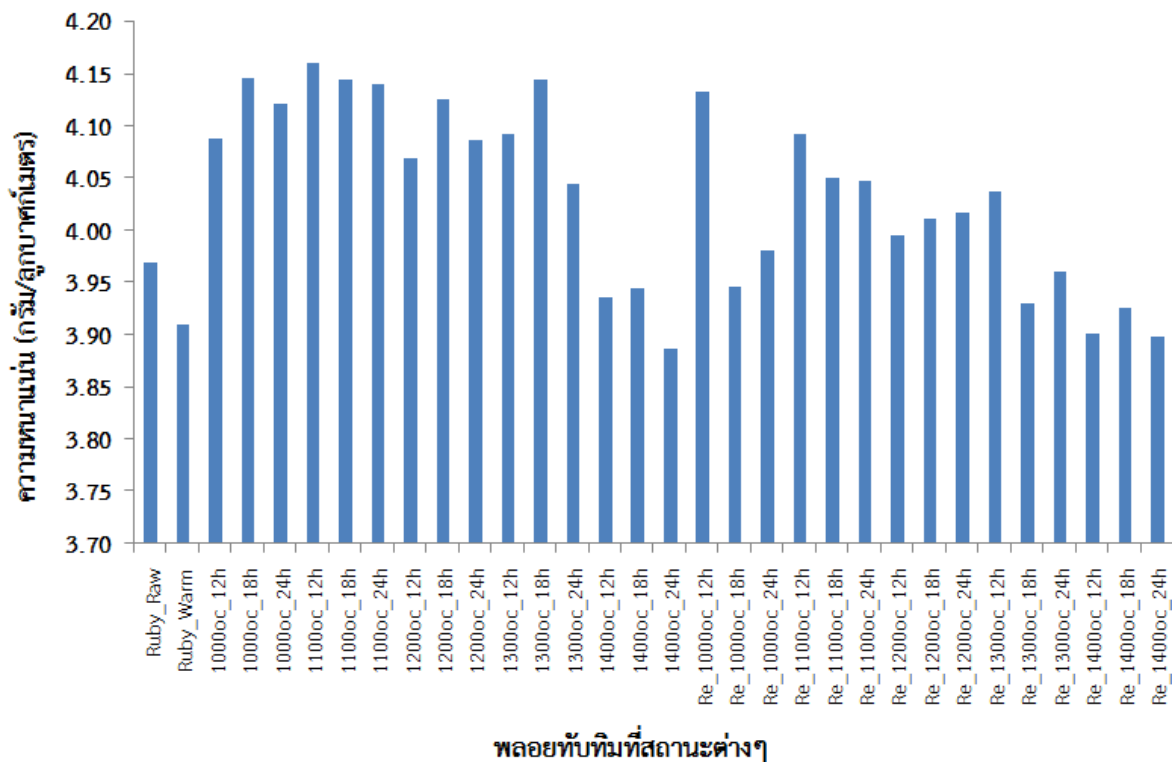
รูปที่ 4.35 โครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส

4) ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิม

จากการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมอยู่ในช่วง 3.886-4.1594 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของพลอยทับทิม (3.900 - 4.100 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) [13] และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำพลอยทับทิมไปเผาและเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.36

ตารางที่ 4.6 ค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ

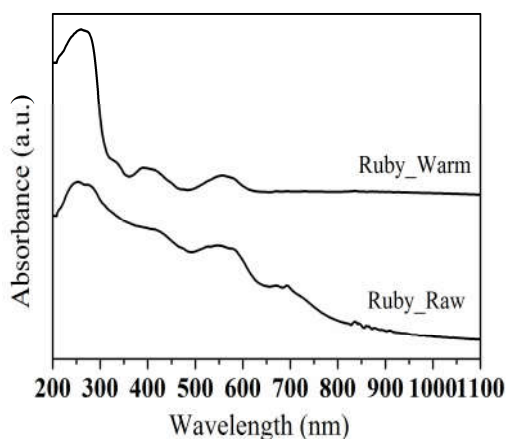
ตัวอย่าง	Label	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
พลอยทับทิมดิบ	Ruby_Raw	3.9632	3.9687	3.9733	3.9684
พลอยทับทิมหลังอุ่น	Ruby_Warm	3.9058	3.9085	3.9108	3.9084
1,000 °c 12 ชั่วโมง	1000°c_12h	4.0907	4.0942	4.0781	4.0877
1,000 °c 18 ชั่วโมง	1000°c_18h	4.1475	4.1382	4.1472	4.1443
1,000 °c 24 ชั่วโมง	1000°c_24h	4.1255	4.1122	4.1235	4.1204
1,100 °c 12 ชั่วโมง	1100°c_12h	4.1699	4.1482	4.1599	4.1594
1,100 °c 18 ชั่วโมง	1100°c_18h	4.1094	4.1614	4.1584	4.1431
1,100 °c 24 ชั่วโมง	1100°c_24h	4.1108	4.1561	4.1484	4.1384
1,200 °c 12 ชั่วโมง	1200°c_12h	4.0847	4.0745	4.0441	4.0678
1,200 °c 18 ชั่วโมง	1200°c_18h	4.1272	4.1281	4.1206	4.1253
1,200 °c 24 ชั่วโมง	1200°c_24h	4.0865	4.0849	4.0849	4.0854
1,300 °c 12 ชั่วโมง	1300°c_12h	4.0937	4.0876	4.0912	4.0908
1,300 °c 18 ชั่วโมง	1300°c_18h	4.1364	4.1464	4.1481	4.1436
1,300 °c 24 ชั่วโมง	1300°c_24h	4.0421	4.0482	4.0412	4.0439
1,400 °c 12 ชั่วโมง	1400°c_12h	3.9389	3.9376	3.9263	3.9342
1,400 °c 18 ชั่วโมง	1400°c_18h	3.9373	3.9489	3.9463	3.9442
1,400 °c 24 ชั่วโมง	1400°c_24h	3.8855	3.8844	3.8885	3.8861
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 12 ชั่วโมง	Re_1000°c_12h	4.1354	4.1276	4.1320	4.1317
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 18 ชั่วโมง	Re_1000°c_18h	3.9464	3.9394	3.9481	3.9446
เผาซ้ำที่ 1,000 °c 24 ชั่วโมง	Re_1000°c_24h	3.9865	3.9741	3.9801	3.9803
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 12 ชั่วโมง	Re_1100°c_12h	4.0780	4.0921	4.1026	4.0909
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 18 ชั่วโมง	Re_1100°c_18h	4.0542	4.0220	4.0720	4.0494
เผาซ้ำที่ 1,100 °c 24 ชั่วโมง	Re_1100°c_24h	4.0490	4.0471	4.0447	4.0469
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 12 ชั่วโมง	Re_1200°c_12h	3.9951	4.0049	3.9846	3.9949
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 18 ชั่วโมง	Re_1200°c_18h	3.9629	4.0320	4.0374	4.0108
เผาซ้ำที่ 1,200 °c 24 ชั่วโมง	Re_1200°c_24h	4.0105	4.0193	4.0193	4.0164
เผาซ้ำที่ 1,300 °c 12 ชั่วโมง	Re_1300°c_12h	4.0356	4.0318	4.0412	4.0362
เผาซ้ำที่ 1,300 °c 18 ชั่วโมง	Re_1300°c_18h	3.9260	3.9294	3.9313	3.9289
เผาซ้ำที่ 1,300 °c 24 ชั่วโมง	Re_1300°c_24h	3.9599	3.9538	3.9655	3.9597
เผาซ้ำที่ 1,400 °c 12 ชั่วโมง	Re_1400°c_12h	3.9065	3.9011	3.8913	3.8997
เผาซ้ำที่ 1,400 °c 18 ชั่วโมง	Re_1400°c_18h	3.9206	3.9422	3.9126	3.9251
เผาซ้ำที่ 1,400 °c 24 ชั่วโมง	Re_1400°c_24h	3.8967	3.9011	3.8930	3.8969



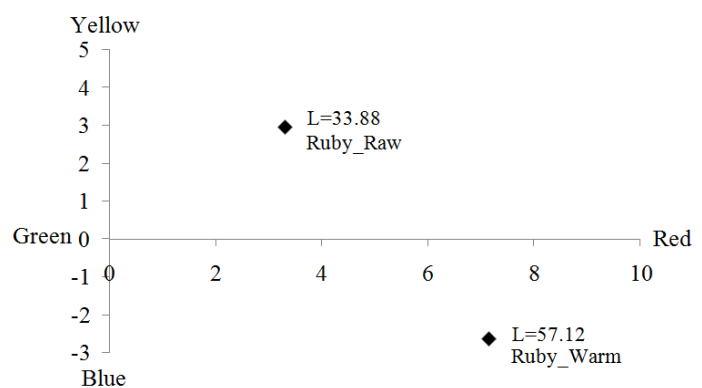
รูปที่ 4.36 ค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ

5) ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงและสีของพลอยทับทิม

จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบพีคการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_1$) และ 550 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_2$) นาโนเมตร เป็นของ Cr^{3+} [14] ซึ่งดูดกลืนแสงสีเขียวทำให้พลอยทับทิมมีสีโทนแดงอมม่วง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ แสดงดังรูปที่ 4.37 ถึง 4.47 โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

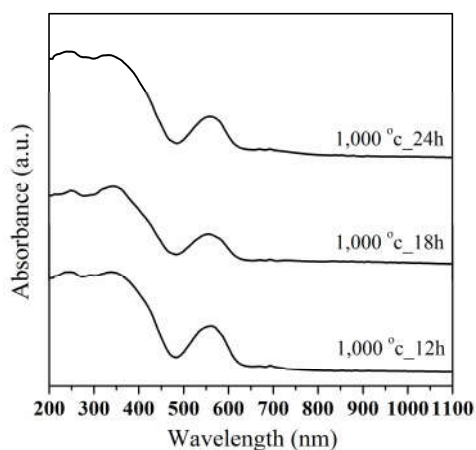


a)

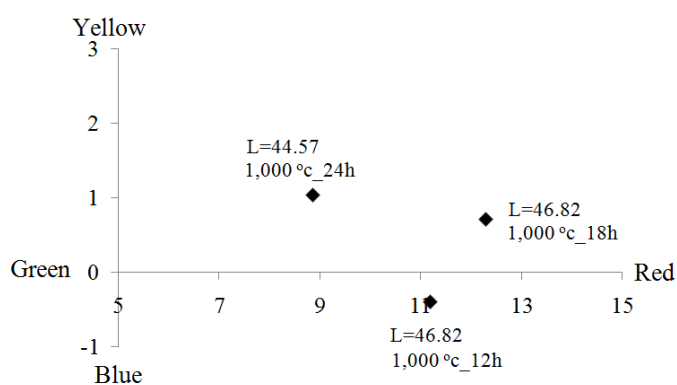


b)

รูปที่ 4.37 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทับทิมก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น

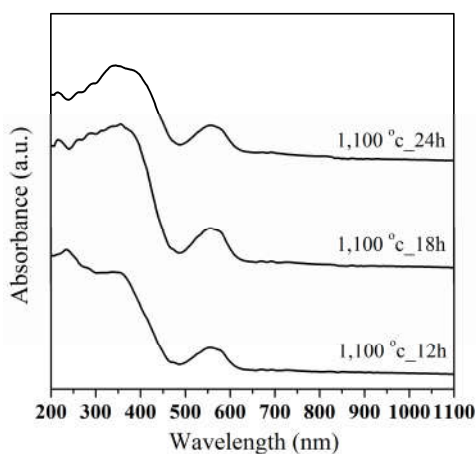


a)

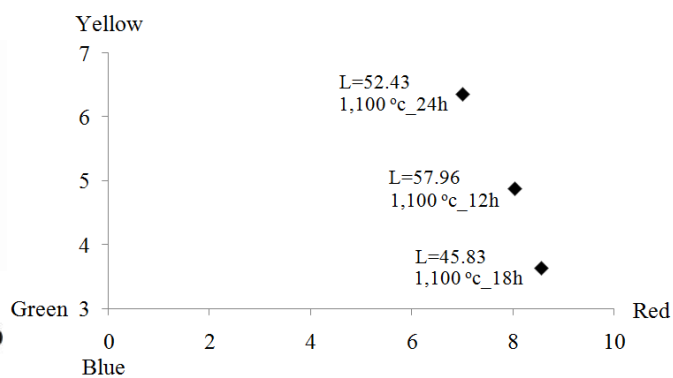


b)

รูปที่ 4.38 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทาบิที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

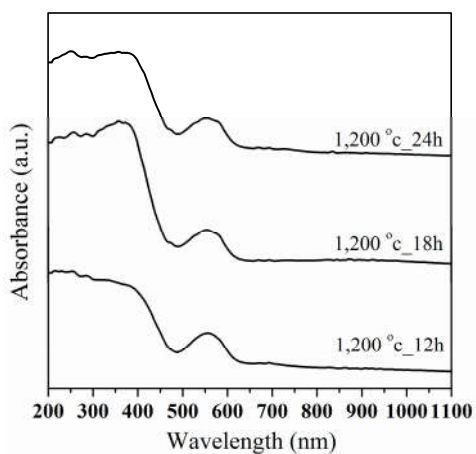


a)

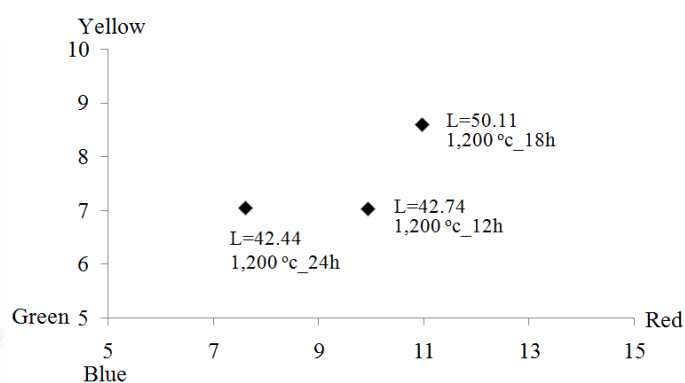


b)

รูปที่ 4.39 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทาบิที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส

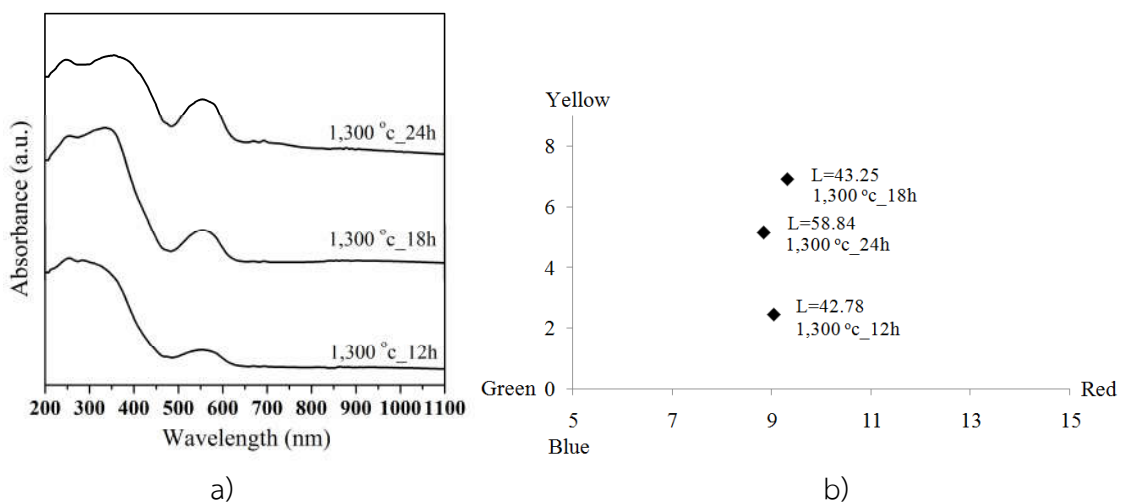


a)

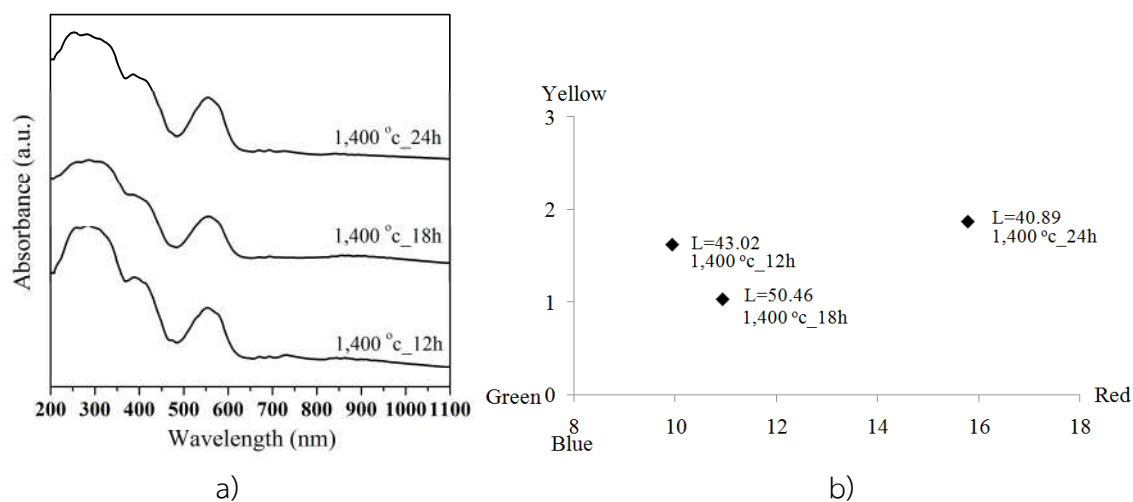


b)

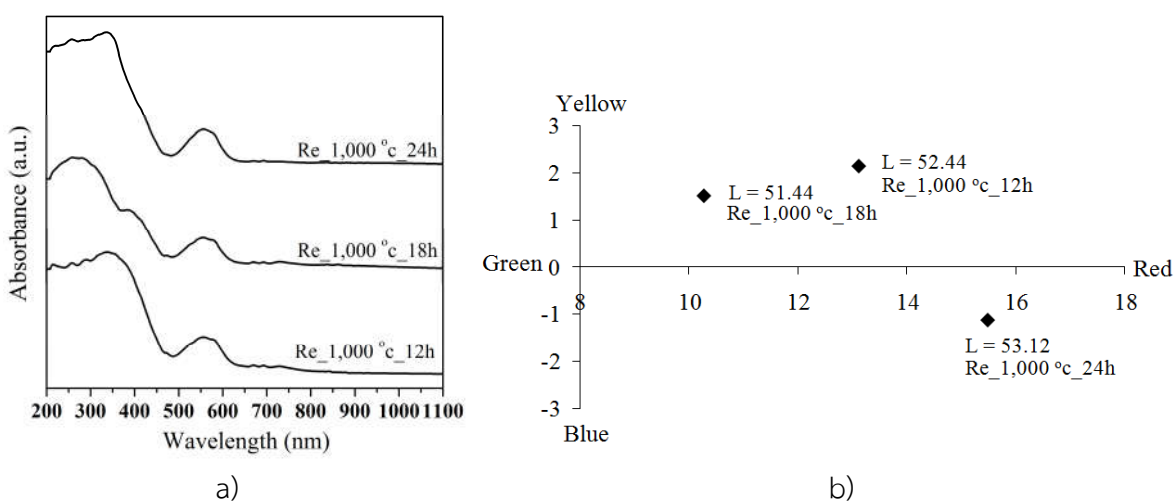
รูปที่ 4.40 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทาบิที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส



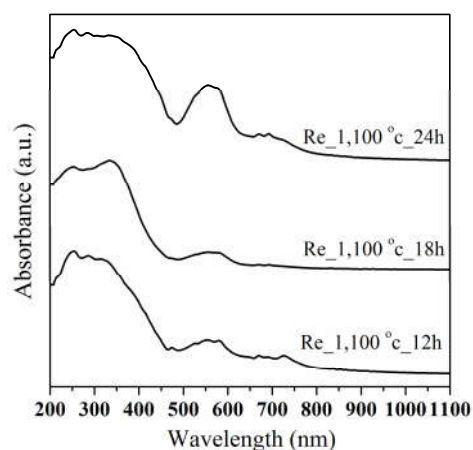
รูปที่ 4.41 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทบิมที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส



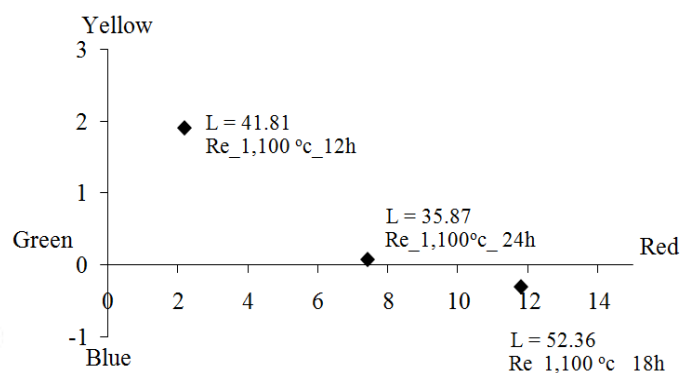
รูปที่ 4.42 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทบิมที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.43 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทบิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส

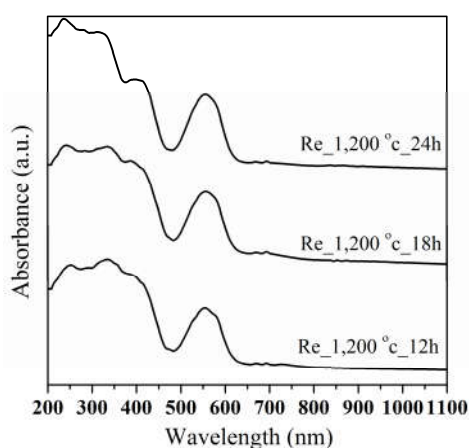


a)

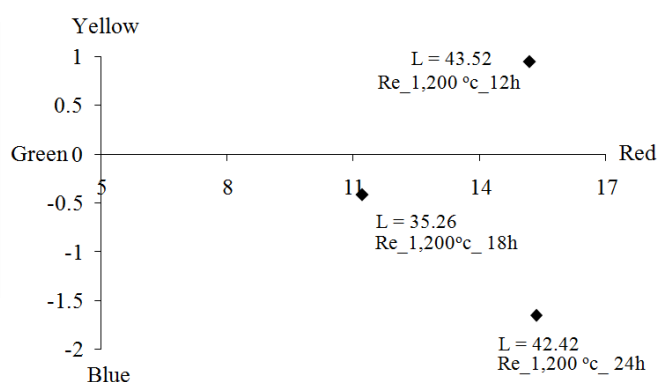


b)

รูปที่ 4.44 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส

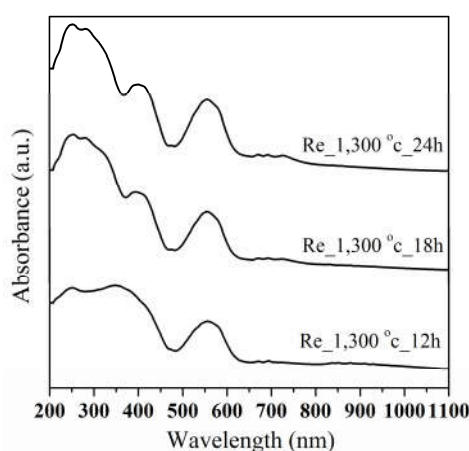


a)

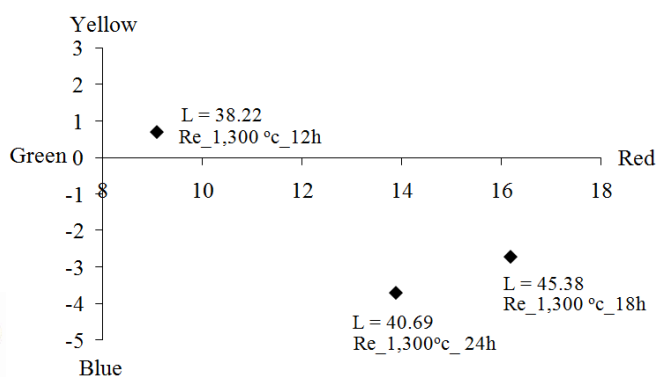


b)

รูปที่ 4.45 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส

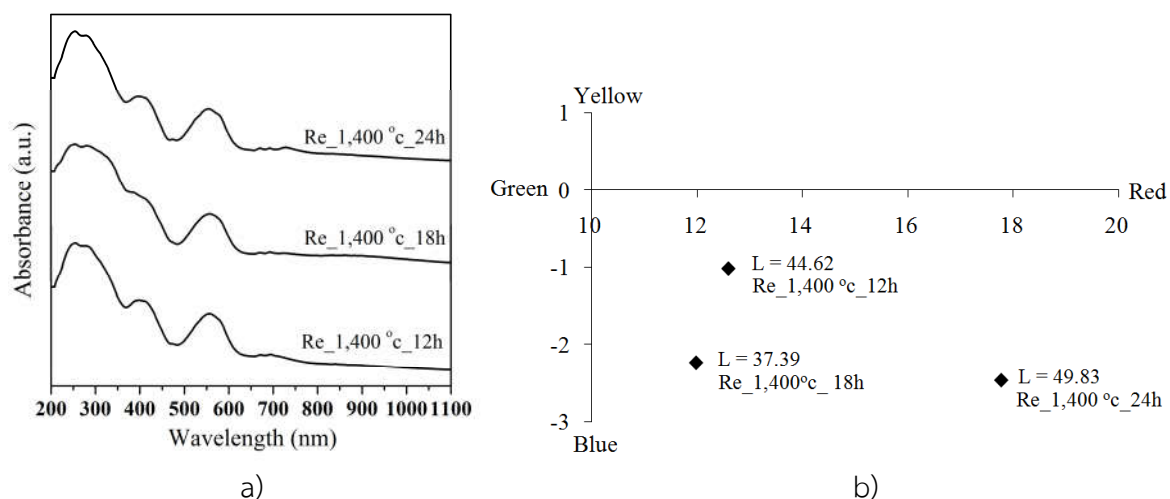


a)



b)

รูปที่ 4.46 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส

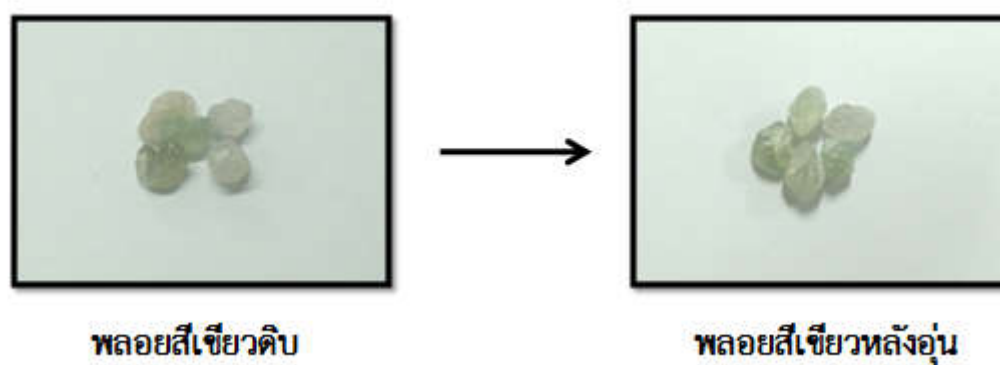


รูปที่ 4.47 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส

4.3 ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว

4.3.1 ลักษณะพลอยสีเขียวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น

จากการล้างพลอยสีเขียวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (กรดกัดแก้ว) ที่เจือจางแล้ว 18% เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำพลอยสีเขียวผ่านการล้างด้วยกรดมาทำการอุ่นพลอย โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 9 ชั่วโมง ปรากฏจากการเดิมสารเคมี พบว่าเนื้อพลอยสีเขียวสะอาดขึ้น สามารถมองเห็นช่องว่างของเนื้อพลอยได้ด้วยตา และสีของพลอยมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากสารปนเปื้อนถูกชะล้างออกแสดงดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 พลอยสีเขียวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น

4.3.2 ลักษณะพลอยสีเขียวที่เผาพร้อมกับแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

ลักษณะของพลอยสีเขียวที่ได้จากการเผาพร้อมกับแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชัน และรีดักชัน แสดงดังรูปที่ 4.49 ถึง 4.54



a)



b)



c)

รูปที่ 4.49 พลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



b)



c)

รูปที่ 4.50 พลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



b)



c)

รูปที่ 4.51 พลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน

a) 12 ชั่วโมง b) 18 ชั่วโมง c) 24 ชั่วโมง



a)



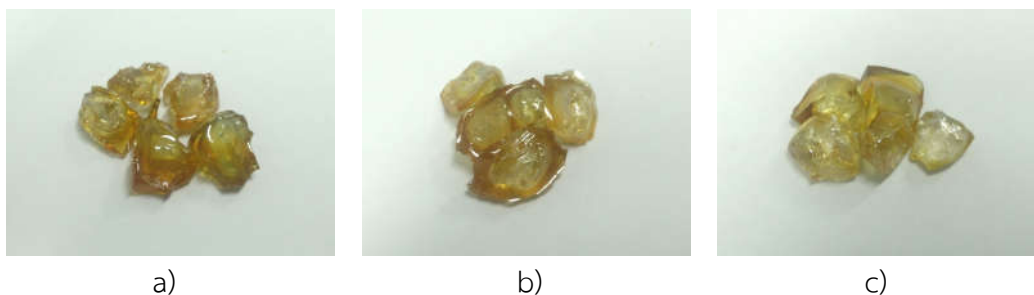
b)



c)

รูปที่ 4.52 พลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน

a) 1 กรัม b) 3 กรัม c) 5 กรัม



รูปที่ 4.53 พอลอยีซีเอวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน
a) 1 กรัม b) 3 กรัม c) 5 กรัม



รูปที่ 4.54 พอลอยีซีเอวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน
a) 1 กรัม b) 3 กรัม c) 5 กรัม

จากการนำพอลอยีซีเอวมาเผาพร้อมกับแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน พบว่าภายใต้สภาวะออกซิเดชัน ลักษณะพอลอยีซีเอวที่ได้มีความใสและมีความมันวาว สีของพอลอยีซีเอวไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 1,300 และ 1,400 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะเห็นได้อย่างชัดเจน สำหรับภายใต้สภาวะรีดักชัน ลักษณะพอลอยีซีเอวที่ได้มีความใสและมีความมันวาว มีสีโทนน้ำตาลเหลืองเล็กน้อย

4.3.3 สมบัติทางกายภาพและทางแสงของพอลอยีซีเอว

ผู้วิจัยได้นำพอลอยีซีเอวที่สถานะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.7 มาวัดสมบัติทางกายภาพและทางแสง ได้แก่ ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพอลอยีซีเอว ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล และค่าสี ค่าความหนาแน่น ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

สภาวะ	ตัวอย่าง	Label
	พลอยสีเขียวดิบ	Sapphire_Raw
	พลอยสีเขียวหลังอุ่น	Sapphire_Warm
ออกซิเดชัน (Oxidation)	1,200 °c 12 ชั่วโมง	1,200°c_12h
	1,200 °c 18 ชั่วโมง	1,200°c_18h
	1,200 °c 24 ชั่วโมง	1,200°c_24h
	1,300 °c 12 ชั่วโมง	1,300°c_12h
	1,300 °c 18 ชั่วโมง	1,300°c_18h
	1,300 °c 24 ชั่วโมง	1,300°c_24h
	1,400 °c 12 ชั่วโมง	1,400°c_12h
	1,400 °c 18 ชั่วโมง	1,400°c_18h
	1,400 °c 24 ชั่วโมง	1,400°c_24h
รีดักชัน (Reduction)	1,200 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 1 กรัม	1,200°c_1g Carbon
	1,200 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 3 กรัม	1,200°c_3g Carbon
	1,200 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 5 กรัม	1,200°c_5g Carbon
	1,300 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 1 กรัม	1,300°c_1g Carbon
	1,300 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 3 กรัม	1,300°c_3g Carbon
	1,300 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 5 กรัม	1,300°c_5g Carbon
	1,400 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 1 กรัม	1,400°c_1g Carbon
	1,400 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 3 กรัม	1,400°c_3g Carbon
	1,400 °c 12 ชั่วโมง + ผงคาร์บอน 5 กรัม	1,400°c_5g Carbon

1) ผลการวิเคราะห์ลักษณะทั่วไปโดยการส่องพลอยสีเขียว

จากการส่องพลอยสีเขียวด้วยกล้องไมโครสโคป (Microscope) รุ่น BX41 บริษัท Olympus กำลังขยาย 40 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.55 ถึง 4.61 พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้นไม่พบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด พลอยมีลักษณะใส มีสีเขียวเล็กน้อย ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่เผาพร้อมกับแก้วบิสบอโรซิลิกเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน พบว่าลักษณะของเนื้อพลอยใสขึ้น โดยใต้สภาวะออกซิเดชันสีของเนื้อพลอยจะมีโทนเขียวอมเหลือง ส่วนภายใต้สภาวะรีดักชันจะมีสีโทนน้ำตาลเหลือง



Sapphire_Raw



Sapphire_Warm

รูปที่ 4.55 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น



1,200°C_12h



1,200°C_18h



1,200°C_24h

รูปที่ 4.56 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน



1,300°C_12h



1,300°C_18h



1,300°C_24h

รูปที่ 4.57 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน



1,400°C_12h



1,400°C_18h



1,400°C_24h

รูปที่ 4.58 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพอลยีสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



1,200°C_1g Carbon



1,200°C_3g Carbon



1,200°C_3g Carbon

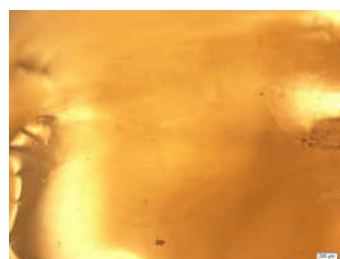
รูปที่ 4.59 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพอลยีสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชั่น



1,300°C_1g Carbon



1,300°C_3g Carbon



1,300°C_3g Carbon

รูปที่ 4.60 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพอลยีสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชั่น



1,400°C_1g Carbon



1,400°C_3g Carbon



1,400°C_3g Carbon

รูปที่ 4.61 ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน

2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF ของพลอยสีเขียว

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometer ผลการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.8

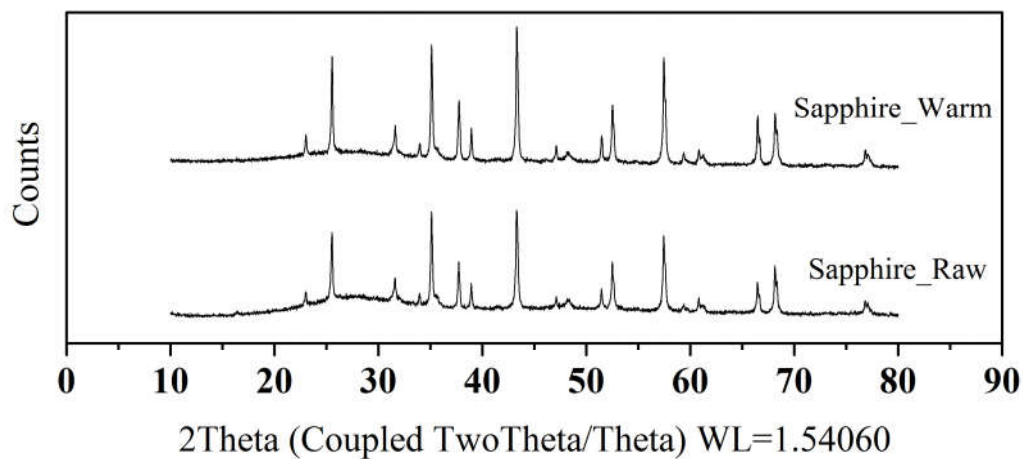
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของธาตุออกไซด์ที่พบในพลอยสีเขียวที่สภาวะต่างกัน

ธาตุออกไซด์	องค์ประกอบของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ																			
	พลอยสีเขียวดิบ	พลอยสีเขียวหลังอุ่น	เผาพลอยสีเขียวที่สภาวะออกซิเดชัน (Oxidation)									เผาพลอยสีเขียวที่สภาวะรีดักชัน (Reduction)								
			1,200 องศาเซลเซียส			1,300 องศาเซลเซียส			1,400 องศาเซลเซียส			1,200 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง			1,300 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง			1,400 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง		
			12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	12 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	1 กรัม	3 กรัม	5 กรัม	1 กรัม	3 กรัม	5 กรัม	1 กรัม	3 กรัม	5 กรัม
Al ₂ O ₃	98.363	98.278	77.132	86.204	82.61	81.179	85.97	97.487	89.806	87.446	97.57	87.621	82.602	82.9	83.513	75.653	85.028	84.001	85.235	85.883
SiO ₂	0.578	0.395	8.098	5.956	6.29	6.42	5.041	0.955	5.201	6.207	1.607	4.412	6.243	6.626	6.281	8.558	7.084	7.492	7.205	8.213
P ₂ O ₅	0.524	0.629	0.37	0.557			0.37	0.36	0.321	0.235	0.282	0.227							0.32	0.234
K ₂ O	0.005	0.004	0.076	0.055	0.056	0.063	0.045	0.006	0.028	0.033	0.007	0.086	0.177	0.217	0.111	0.213	0.189	0.085	0.101	0.145
CaO	0.192	0.335	0.214	0.197	0.147	0.152	0.2	0.156	0.151	0.134	0.06	0.11	0.227	0.337	0.141	0.311	0.31	0.168	0.26	0.361
TiO ₂	0.025	0.043	0.019	0.015	0.022	0.015	0.017	0.01	0.012	0.014	0.013	0.013	0.018	0.018	0.017	0.022	0.018	0.017	0.016	0.02
Cr ₂ O ₃	0.006	0.005						0.004	0.006	0.005	0.006									
Fe ₂ O ₃	0.223	0.214	0.177	0.15	0.178	0.159	0.17	0.219	0.185	0.165	0.174	0.168	0.168	0.188	0.204	0.182	0.196	0.168	0.218	0.168
Co ₃ O ₄	0.071	0.069	0.128	0.1	0.103	0.106	0.122	0.075	0.123	0.132	0.101	0.128	0.111	0.103	0.09	0.094	0.107	0.101	0.129	0.104
Bi ₂ O ₃	0.003	0.006	13.787	6.766	10.594	11.906	8.065	0.727	4.168	5.628	0.18	7.235	10.455	9.61	9.643	14.967	7.068	7.969	6.498	4.872
CuO	0.008	0.022																		
NiO																		0.017		

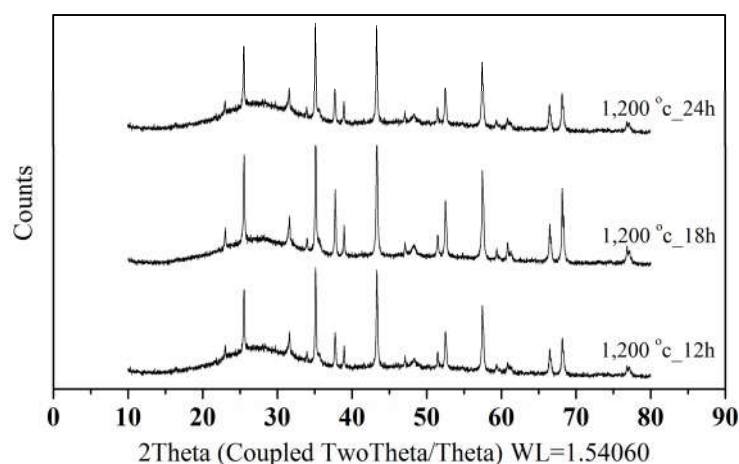
1)

3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง XRD ของพลอยสีเขียว

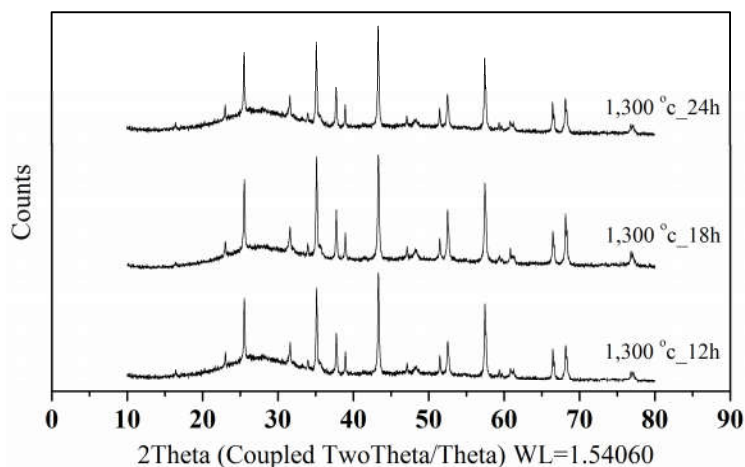
จากการวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ แสดงรูปที่ 4.62-4.68 ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3



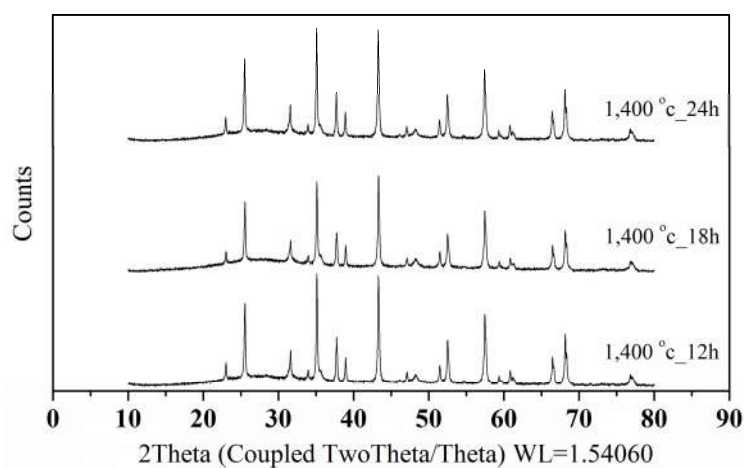
รูปที่ 4.62 โครงสร้างทางผลึกของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น



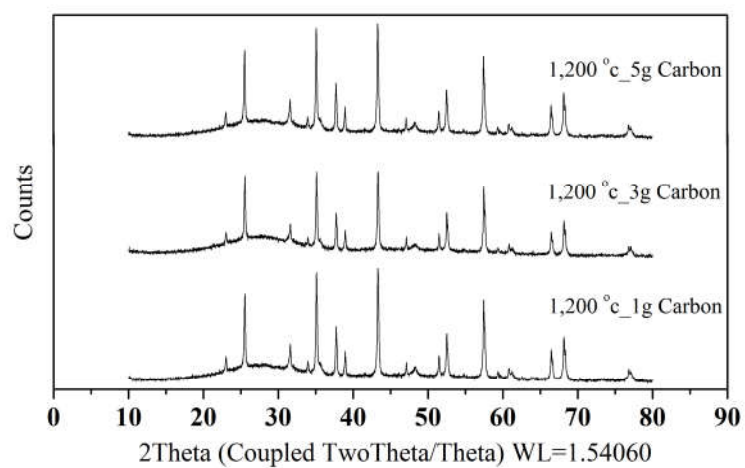
รูปที่ 4.63 โครงสร้างทางผลึกของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



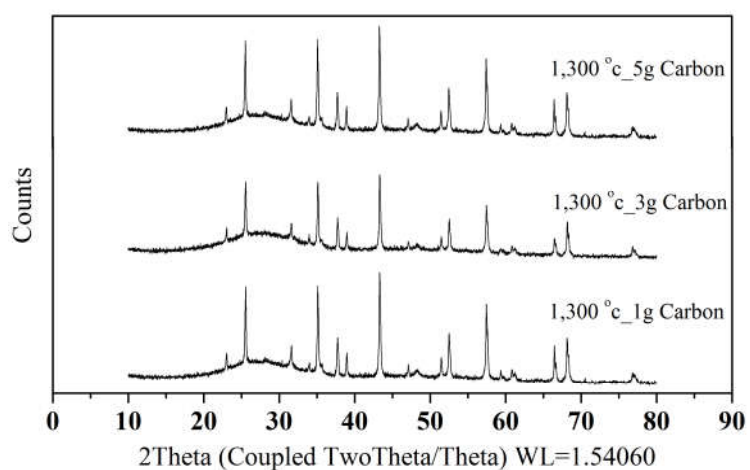
รูปที่ 4.64 โครงสร้างทางผลึกของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



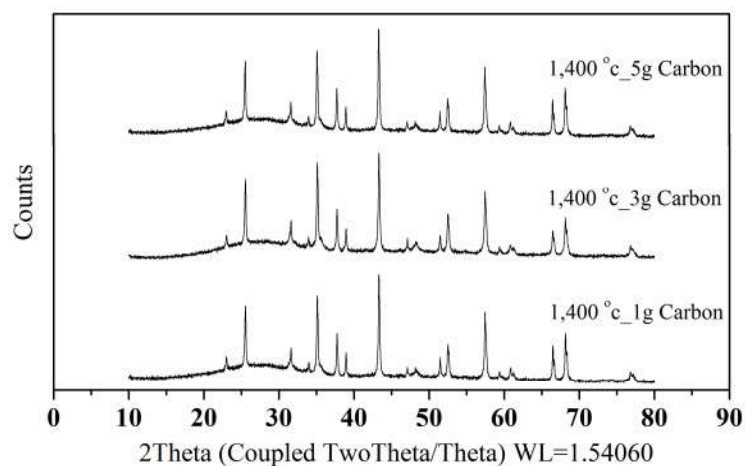
รูปที่ 4.65 โครงสร้างทางผลึกของพอลียะซีที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชัน



รูปที่ 4.66 โครงสร้างทางผลึกของพอลียะซีที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน



รูปที่ 4.67 โครงสร้างทางผลึกของพอลียะซีที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะรีดักชัน



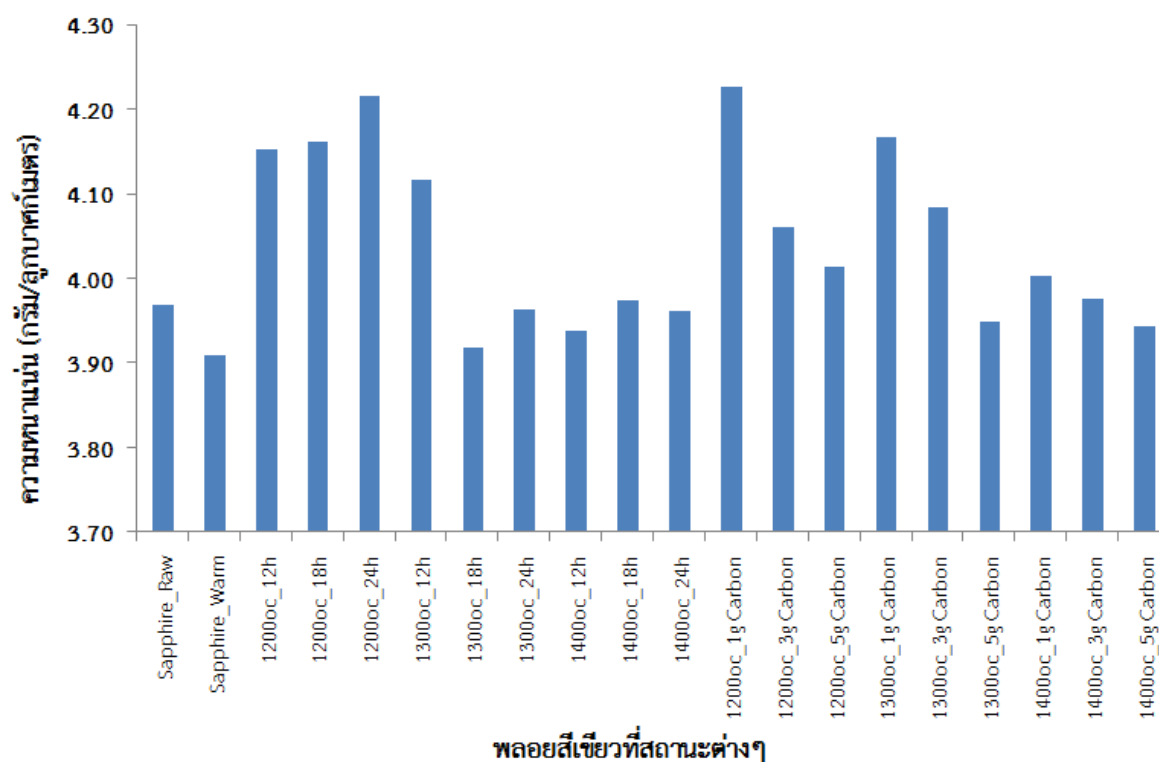
รูปที่ 4.68 โครงสร้างทางผลึกของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน

4) ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียว

จากการวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.9181-4.2262 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของพลอยสีเขียว (3.99-4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) [15] และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน แสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.69

ตารางที่ 4.9 ค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวยุติที่สถานะต่างๆ

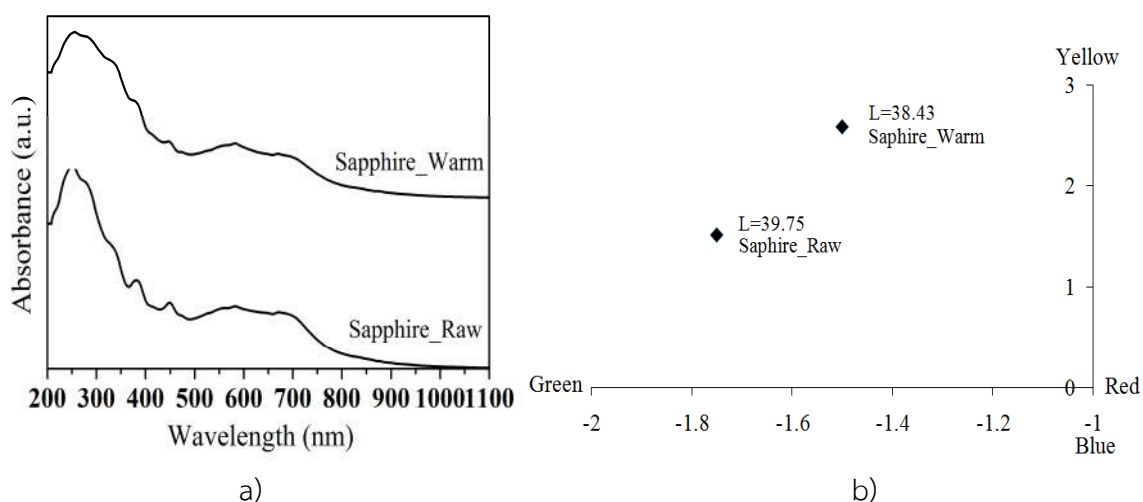
ตัวอย่าง	ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)			ค่าเฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
Sapphire_Raw	4.0903	3.9867	4.0054	4.0274
Sapphire_Warm	3.9953	4.0016	3.9937	3.9969
1,200°C_12h	4.1548	4.1404	4.1597	4.1516
1,200°C_18h	4.0544	4.2109	4.2165	4.1606
1,200°C_24h	4.2104	4.1998	4.2345	4.2149
1,300°C_12h	4.0723	4.1336	4.1445	4.1168
1,300°C_18h	3.9024	3.9158	3.9361	3.9181
1,300°C_24h	3.9587	3.9638	3.9677	3.9634
1,400°C_12h	3.9318	3.9415	3.9398	3.9377
1,400°C_18h	3.9750	3.9729	3.9750	3.9743
1,400°C_24h	3.9579	3.9579	3.9669	3.9609
1,200°C_1g Carbon	4.2074	4.2411	4.2301	4.2262
1,200°C_3g Carbon	4.0497	4.0574	4.0746	4.0606
1,200°C_5g Carbon	3.9886	4.0192	4.0327	4.0135
1,300°C_1g Carbon	4.2045	4.1449	4.1511	4.1668
1,300°C_3g Carbon	4.0656	4.0722	4.1122	4.0833
1,300°C_5g Carbon	3.9448	3.9655	3.9345	3.9483
1,400°C_1g Carbon	4.0429	3.9260	4.0397	4.0029
1,400°C_3g Carbon	3.9732	3.9732	3.9785	3.9749
1,400°C_5g Carbon	3.9049	3.9576	3.9683	3.9436



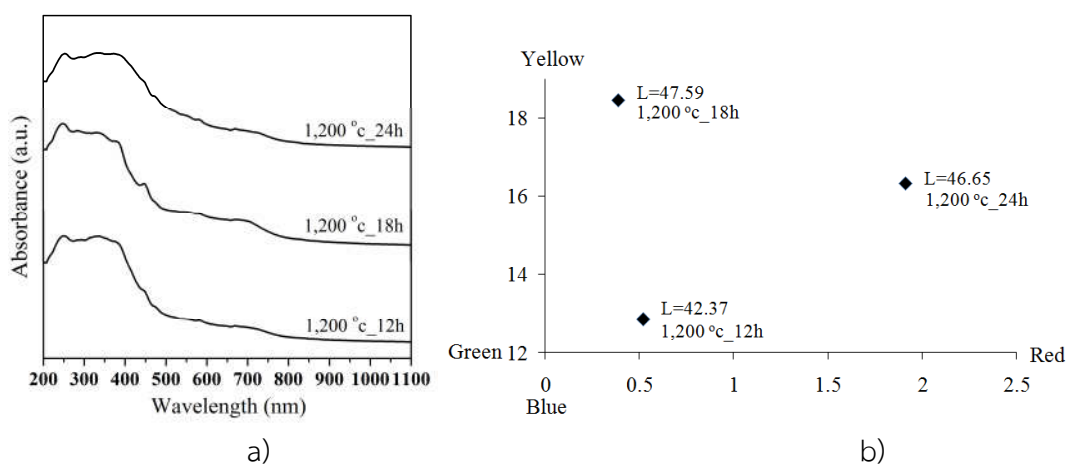
รูปที่ 4.69 ค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวยุติสถานะต่างๆ

5) ผลการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของพลอยสีเขียว

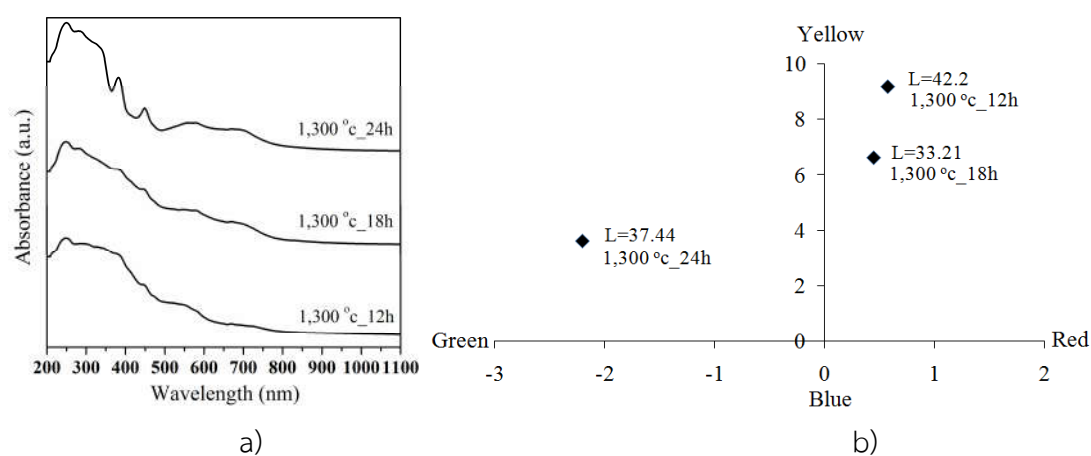
จากการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบพีคการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ของ Fe^{3+} อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 และ 450 และช่วงความยาวคลื่น 550 และ 680 นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ [16] ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของพลอยสีเขียวอมเหลือง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ แสดงดังรูปที่ 4.70 ถึง 4.76



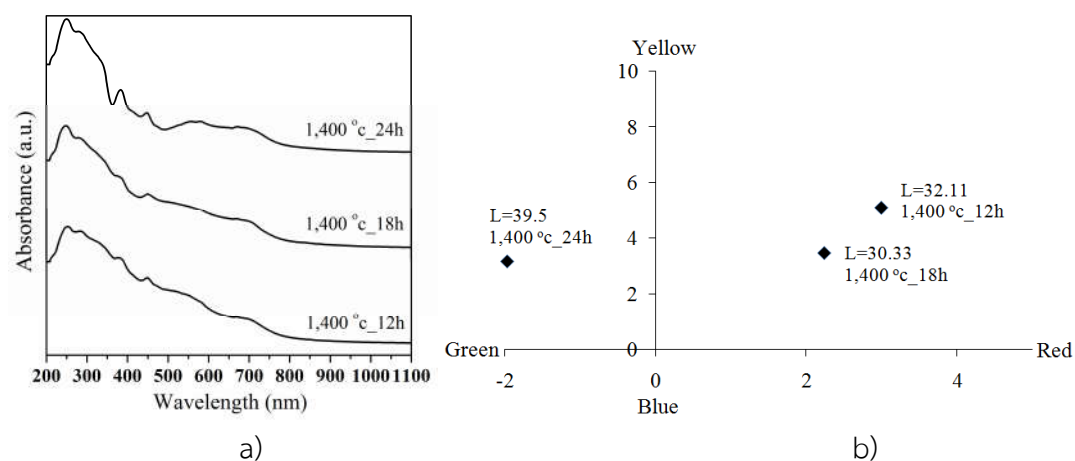
รูปที่ 4.70 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้น



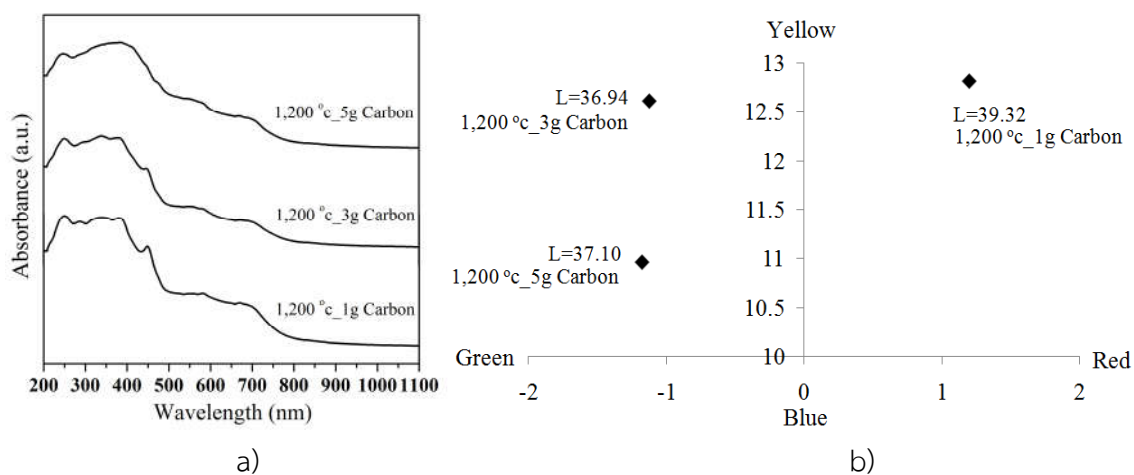
รูปที่ 4.71 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



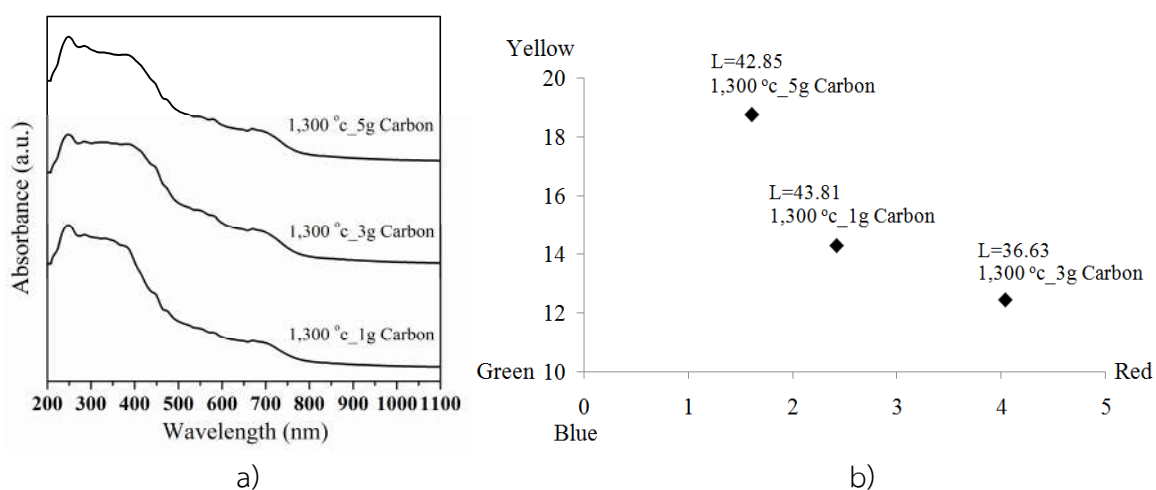
รูปที่ 4.72 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



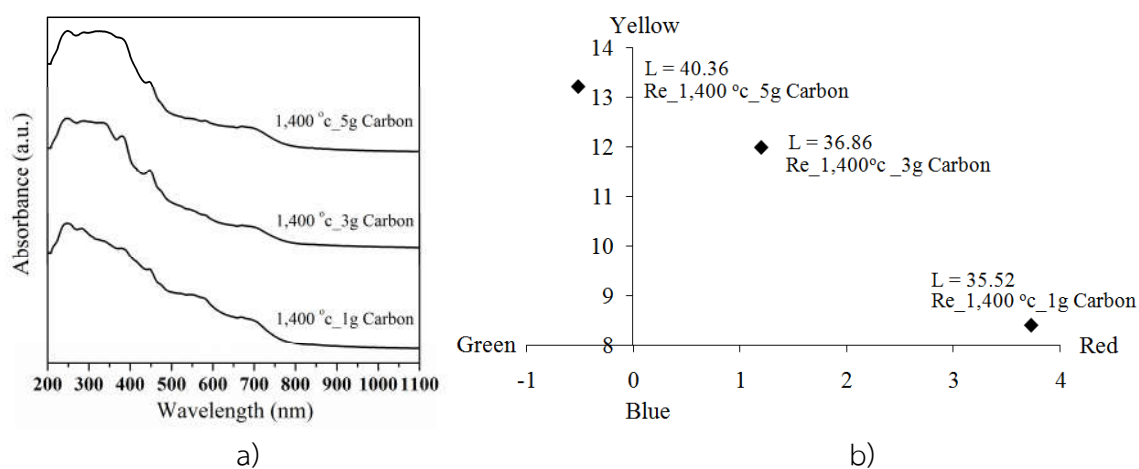
รูปที่ 4.73 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะออกซิเดชั่น



รูปที่ 4.74 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน



รูปที่ 4.75 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน



รูปที่ 4.76 ค่าการดูดกลืนแสง (a) และค่าสี (b) ของพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิ 1,400 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะรีดักชัน

4.4 ค่าดัชนีหักเหของพลอยที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

จากการปรับปรุงคุณภาพพลอยพบว่า พลอยสีแดงที่ผ่านการเผาซ้ำที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นั้นจะมีสีสน้ำใกล้เคียงกับพลอยในธรรมชาติ อีกทั้งเนื้อแก้วที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยยังสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อพลอยจริงได้มากกว่าอุณหภูมิอื่นๆ โดยสามารถวัดค่าดัชนีหักเหของพลอยที่ได้รับการปรับปรุงแล้ว มีค่า 1.761 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าดัชนีหักเหของพลอยสีแดงในธรรมชาติที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.76-1.77 ส่วนพลอยสีเขียวที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าไม่สามารถหาจุดที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมีคุณภาพใกล้เคียงกับพลอยสีเขียวที่พบในธรรมชาติ

ตารางที่ 4.10 ค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างพลอยที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	อุณหภูมิที่เผาซ้ำ (องศาเซลเซียส)	ค่าดัชนีหักเห
 พลอยสีแดง	1,200	1.761
 พลอยสีเขียว	1,200 (ภายใต้สภาวะรีดักชั่น)	1.768

บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย โดยเลือกใช้บิสมาอ็อกไซด์ (Bi_2O_3) ที่ให้ค่าดัชนีหักเหสูง มีสีน้ำตาล และช่วยลดความหนืดของแก้ว แทนที่ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สำหรับเตรียมแก้วตัวอย่างเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย จากนั้นได้นำแก้วตัวอย่างไปเผาพร้อมกับพลอยทับทิมและพลอยสีเขียวที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง ได้แก่ ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพลอย ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิลและค่าสี ค่าความหนาแน่น สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์แก้วบิสมาอ็อกไซด์

จากการเตรียมแก้วบิสมาอ็อกไซด์ในสูตร $40\text{B}_2\text{O}_3 : 40\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20\text{SiO}_2$ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยโมล หลอมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์และศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางแสงของแก้วบิสมาอ็อกไซด์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล ค่าดัชนีหักเห และปริมาตรต่อโมล (Molar volume) พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 4.8040 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าปริมาตรเชิงโมลอยู่ที่ 47.0960 ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.773 และมีการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 450 นาโนเมตร

5.1.2 การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม

เมื่อนำแก้วบิสมาอ็อกไซด์มาเผาพร้อมกับพลอยทับทิมที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมดิบมีช่องว่างและสารเจือปนปะปนอยู่ที่เนื้อพลอยจำนวนมาก มีสีโทนม่วงอ่อน หลังจากที้นำพลอยทับทิมมาล้างและทำการอุ่นพลอยพบว่าเห็นช่องว่างที่เนื้อพลอยเด่นชัดขึ้น สารเจือปนถูกชะล้าง และสีของพลอยทับทิมมีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมาอ็อกไซด์และพลอยทับทิมเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ารอยแตกที่เนื้อพลอยน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการแทรกตัวของแก้วบิสมาอ็อกไซด์ มีสีโทนแดงอมชมพูและโทนแดงอมม่วง การวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆโดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมอยู่ในช่วง 3.886-4.1594 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของพลอยทับทิม (3.9 - 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำพลอยทับทิมไปเผาและเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1,100 นาโนเมตร ของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบว่าการดูดกลืนแสง

ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_1$) และ 550 ($^4A_2 \rightarrow ^4T_2$) นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ Cr^{3+} ซึ่งดูดกลืนแสงสีเขียวทำให้พลอยทับทิมมีสีโทนแดงอมม่วง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

5.1.3 การปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว

เมื่อนำแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตมาเผาพร้อมกับพลอยสีเขียวภายใต้สภาวะออกซิเดชัน กล่าวคือการเผาพลอยสีเขียวภายใต้บรรยากาศปกติที่มีออกซิเจน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และสภาวะรีดักชัน ซึ่งมีการเติมผงคาร์บอนลงไป ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้นไม่พบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด พลอยมีลักษณะใส มีสีเขียวเล็กน้อย ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่เผาพร้อมกับแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน พบว่าลักษณะของเนื้อพลอยใสขึ้น โดยใต้สภาวะออกซิเดชันสีของเนื้อพลอยจะมีโทนเขียวอมเหลือง ส่วนใต้สภาวะรีดักชันจะมีสีโทนน้ำตาลเหลือง จากการวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.9181-4.2262 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของสีเขียว (3.99-4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบพีคการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 และ 450 และช่วงความยาวคลื่น 550 และ 680 นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ Fe^{2+}/Ti^{4+} ซึ่งเป็นการดูดกลืนแสงของพลอยสีเขียวอมเหลือง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

จากผลการการศึกษาพบว่า แก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตในสูตร $40B_2O_3 : 40Bi_2O_3 : 20SiO_2$ สามารถที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับพลอยทับทิมคือการนำพลอยทับทิมที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มาเผาซ้ำที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะพลอยทับทิมที่ได้มีความใสและมีความมันวาว แก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของเนื้อพลอยได้เป็นอย่างดี ไม่พบรอยแตกบริเวณผิวของเนื้อพลอย และมีสีโทนแดงอมม่วงสดใส แต่การนำแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวยังคงไม่ได้สีเขียวตามมาตรฐานที่ต้องการ สามารถสรุปได้ว่าแก้วบิสม์สโบโรซิลิเกตสูตรนี้เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวได้ตามเงื่อนไขต่างๆที่ได้ทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการใช้แก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมจากประเทศมาดากัสการ์เพียงแห่งเดียว ซึ่งอาจมีความเสี่ยงจากตัวแปรของวัตถุดิบ เนื่องจากพลอยแต่ละพื้นที่ล้วนมีความแตกต่างกันทางโครงสร้าง สารเจือปนในเนื้อพลอย เป็นต้น ทำให้ผลการทดลองที่ได้แตกต่างกันเมื่อใช้พลอยทับทิมจากแหล่งอื่น จึงควรมีการศึกษาและทดลองการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมจากแหล่งอื่น
- งานวิจัยนี้ไม่ได้รวมถึงการนำพลอยทับทิมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วไปเจียรระไน และมีการใช้งานในเครื่องประดับ ซึ่งควรมีการทดสอบคุณสมบัติในกระบวนการผลิตก่อนการนำไปใช้งานในเครื่องประดับเช่น การชุบ ความทนทานต่อความร้อน เป็นต้น
- ในส่วนของการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวด้วยแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตยังไม่ได้สีเขียวตามมาตรฐานที่ต้องการ เนื่องจากแก้วบิสมัทบอโรซิลิเกตสูตรในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวเพราะพลอยสีเขียวกับพลอยทับทิมนี้มีเงื่อนไขและกลไกของการเกิดสีที่แตกต่างกันซึ่งแก้วสูตรนี้จะไปมีผลต่อการเปลี่ยนสถานะทางไอออนของโครเมียมมากกว่าไอออนของเหล็ก ผู้วิจัยจึงขออนุญาตทำการพัฒนาสูตรแก้วที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป ตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
- ในส่วนของการตรวจสอบชนิดของพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาแล้ว สามารถใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence-EDXRF) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของพลอย โดยถ้าเป็นพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะพบองค์ประกอบของธาตุซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อแก้วรวมอยู่ด้วย รวมไปถึงการใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) เพื่อตรวจสอบถึงลักษณะของเนื้อพลอย ถ้าเป็นพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะพบริ้วของเนื้อแก้วแทรกอยู่ในเนื้อพลอย

เอกสารอ้างอิงโครงการที่ 1

- [1] Kittiauchawal, T., Limsuwan, P., **The Color Change of Natural Blue Sapphires by Heat Treatment**, *Kasetsart Journal (Natural Science)*, Vol. 41, No. 5 (2007), pp. 262-266.
- [2] ตรีเดชน์ กิตติอัฐวาลย์, 2552, **ผลของความร้อนต่อสมบัติทางกายภาพของแซฟไฟร์ธรรมชาติ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [3] Sheelby, J.E., 2005, *Introduction to Glass Science and Technology*; Second Edition, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.
- [4] สุรชาติพิทย์ ศิริไพศาล และคณะ , 2541, “การศึกษาและพัฒนาสภาวะการเผาทับบทิม”, **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ**, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 115 – 125.
- [5] มงคล ราชนิยม, 2544, **ผลของความร้อนต่อคุณสมบัติกายภาพของทับบทิมธรรมชาติ**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [6] Zhenges, W., 1998, “Impurity Displacement of Fe^{3+} Ion in Al_2O_3 Crystal”, *Journal of Physica B*, Vol. 245, p. 122.
- [7] พงศ์ทิพย์ วิโนทัย และคณะ, 2541, “การเพิ่มและลดสีในแซฟไฟร์จากอัฟริกา”, **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกับอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ**, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 99 – 112.
- [8] Winotai, P., Wichan, T., Tang, I.M. and Yaokulbodee, J., 2001, “Heat Treatments of Tanzania Ruby as Monitored by ESR Spectroscopy”, *Journal of Modern Physics B*, Vol. 14, No. 16, pp. 1693 –1700.
- [9] อภินรรัตน์ รอดศรี, 2545, **ผลของความร้อนต่อคุณสมบัติกายภาพของพลอยทับบทิม**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [10] ตรีเดชน์ กิตติอัฐวาลย์, จิตรา เกตุแก้ว และ พิเชษฐ ลีมสุวรรณ, การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของโลหะแทรนซิชันในพลอยทับบทิมเวียตนาม, 35th Congress on Science and Technology of Thailand.

- [11] Achiwawanich, S., James, B.D. and Liesegang, J., 2008, "XPS and ToF-SIMS Analysis of Natural Rubies and Sapphires Heat-Treated in a Reducing (5 mol% H₂/Ar) Atmosphere", **Applied Surface Science**, Vol. 255, No.5 Part 1, pp. 2388-2399.
- [12] <http://www.antoinettematlins.com/pressroom.html>
- [13] http://www.realgems.org/list_of_gemstones/ruby.html
- [14] Berry, F.J., Vaughan, D.J., 1985, Chemical Bonding and Spectroscopy in Mineral Chemistry, Chapman and Hall, New York .
- [15] http://www.realgems.org/list_of_gemstones/sapphire.html
- [16] Schwarz, D., Kanis, J., Schmetzer, K., 2000, Sapphires from Antsiranana Province: Northern Madagascar, *Gems & Gemology*, Vol 36,pp. 216-233.

แบบสรุปผู้บริหาร [Executive Summary]

1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการ

1.1 ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย

1.2 รายนามคณะผู้วิจัย พร้อมทั้งหน่วยงานที่สังกัดและหมายเลขโทรศัพท์

1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัณฑ์พัฒน์ กิตติธวัชวาลย์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 15000

โทรศัพท์ 086-708-4224 E-mail: k_treedej@hotmail.com

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว

ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัด นครปฐม 73000 โทรศัพท์ 081-921-8716

โทรสาร 034-261-065 E-mail: mink110@hotmail.com

3. อาจารย์ ดร.ยศกิต เรืองทวีป

ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม อำเภอเมือง จังหวัด นครปฐม 73000

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำวิจัย

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2558 จำนวน 891,660 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

เริ่มทำการวิจัยเมื่อ 15 กันยายน 2557 – 14 กันยายน 2558 (12 เดือน) : ส่งร่างรายงานฉบับ

สมบูรณ์

2. สรุปโครงการวิจัย

การพัฒนาแก้วปลอดตะกั่วเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย โดยเลือกใช้บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) ที่ให้ค่าดัชนีหักเหสูง มีสีน้ำตาล และช่วยลดความหนืดของแก้ว แทนที่ตะกั่วออกไซด์ (PbO) สำหรับเตรียมแก้วตัวอย่างเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย จากนั้นได้นำแก้วตัวอย่างไปเผาพร้อมกับพลอยทับทิมและพลอยสีเขียวยที่อุณหภูมิและระยะเวลาต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง ได้แก่ ลักษณะทั่วไปโดยการส่อง องค์ประกอบและโครงสร้างของพลอย ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิลและค่าสี ค่าความหนาแน่น สามารถสรุปได้ดังนี้

การวิเคราะห์แก้วบิสมัทออกไซด์

จากการเตรียมแก้วบิสมัทออกไซด์ในสูตร $40\text{Bi}_2\text{O}_3 : 40\text{Bi}_2\text{O}_3 : 20\text{SiO}_2$ ในหน่วยเปอร์เซ็นต์โดยโมล หลอมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง และนำไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์และศึกษาสมบัติทาง

กายภาพและทางแสงของแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอย ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าการดูดกลืนแสงช่วงยูวี-วิสิเบิล ค่าดัชนีหักเห และปริมาตรต่อโมล (Molar volume) พบว่ามีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 4.8040 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าปริมาตรเชิงโมลอยู่ที่ 47.0960 ลูกบาศก์เมตรต่อโมล ค่าดัชนีหักเหอยู่ที่ 1.773 และมีค่าการดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง 450 นาโนเมตร

การปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม

เมื่อนำแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตมาเผาพร้อมกับพลอยทับทิมที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,000-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมดิบมีช่องว่างและสารเจือปนปะปนอยู่ที่เนื้อพลอยจำนวนมาก มีสีโทนม่วงอ่อน หลังจากก็นำพลอยทับทิมมาล้างและทำการอุ่นพลอยพบว่าเห็นช่องว่างที่เนื้อพลอยเด่นชัดขึ้น สารเจือปนถูกชะล้าง และสีของพลอยทับทิมมีการเปลี่ยนแปลง ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยทับทิมที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตและพลอยทับทิมเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่ารอยแตกที่เนื้อพลอยน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการแทรกตัวของแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกต มีสีโทนแดงอมชมพูและโทนแดงอมม่วง การวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นของพลอยทับทิมอยู่ในช่วง 3.886-4.1594 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของพลอยทับทิม (3.9 - 4.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน เมื่อนำพลอยทับทิมไปเผาและเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1,100 นาโนเมตร ของพลอยทับทิมที่สถานะต่างๆ พบพิศการดูดกลืนแสงส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 400 ($^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_1$) และ 550 ($^4\text{A}_2 \rightarrow ^4\text{T}_2$) นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ Cr^{3+} ซึ่งดูดกลืนแสงสีเขียวทำให้พลอยทับทิมมีสีโทนแดงอมม่วง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ โดยช่วงการดูดกลืนแสงดังกล่าวสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในพลอยทับทิมที่นำมาเผาซ้ำที่อุณหภูมิต่างๆ

การปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียว

เมื่อนำแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตมาเผาพร้อมกับพลอยสีเขียวภายใต้สภาวะออกซิเดชัน กล่าวคือการเผาพลอยสีเขียวภายใต้บรรยากาศปกติที่มีออกซิเจน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12, 18 และ 24 ชั่วโมง และสภาวะรีดักชัน ซึ่งมีการเติมผงคาร์บอนลงไปเป็นปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจะเผาที่อุณหภูมิ 1,200-1,400 องศาเซลเซียส แต่ละอุณหภูมิจะค้างไว้เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางแสง พบว่าลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยเบื้องต้นไม่

พบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัด พลอยมีลักษณะใส มีสีเขียวเล็กน้อย ลักษณะทั่วไปโดยการส่องของพลอยสีเขียวที่เผาพร้อมกับแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน พบว่าลักษณะของเนื้อพลอยใสขึ้น โดยใต้สภาวะออกซิเดชันสีของเนื้อพลอยจะมีโทนเขียวอมเหลือง ส่วนใต้สภาวะรีดักชันจะมีสีโทนน้ำตาลเหลือง จากการวิเคราะห์โครงสร้างของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ในการวิเคราะห์ ไม่พบความแตกต่างของโครงสร้างผลึกของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ โดยพบโครงสร้างผลึกของ PDF 00-010-0173 Al_2O_3 และ PDF 00-0460-1212 Al_2O_3 การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบว่าค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.9181-4.2262 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นมาตรฐานของสีเขียว (3.99-4 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และไม่พบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ภายใต้สภาวะออกซิเดชันและรีดักชัน การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 – 1,100 นาโนเมตร ของพลอยสีเขียวที่สถานะต่างๆ พบพีคการดูดกลืนแสงของ Fe^{3+} อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 และ 450 และช่วงความยาวคลื่น 550 และ 680 นาโนเมตร ซึ่งเป็นของ Fe^{2+}/Ti^{4+} ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของพลอยสีเขียวอมเหลือง สอดคล้องกับค่าสีในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

จากผลการการศึกษาพบว่า แก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตในสูตร $40B_2O_3 : 40Bi_2O_3 : 20SiO_2$ สามารถที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิมได้ โดยสภาวะที่เหมาะสมสำหรับพลอยทับทิมคือการนำพลอยทับทิมที่ได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 12 ชั่วโมง มาเผาซ้ำที่อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ลักษณะพลอยทับทิมที่ได้มีความใสและมีความมันวาว แก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตสามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างของเนื้อพลอยได้เป็นอย่างดี ไม่พบรอยแตกบริเวณผิวของเนื้อพลอย และมีสีโทนแดงอมม่วงสดใสน่าดู แต่การนำแก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวยังคงไม่ได้สีเขียวตามมาตรฐานที่ต้องการ สามารถสรุปได้ว่า แก้วบิสมีสโบโรซิลิเกตสูตรนี้เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยทับทิม แต่ยังไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยสีเขียวได้ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้ทดลอง

3. ความคุ้มค่าและผู้ใช้ประโยชน์

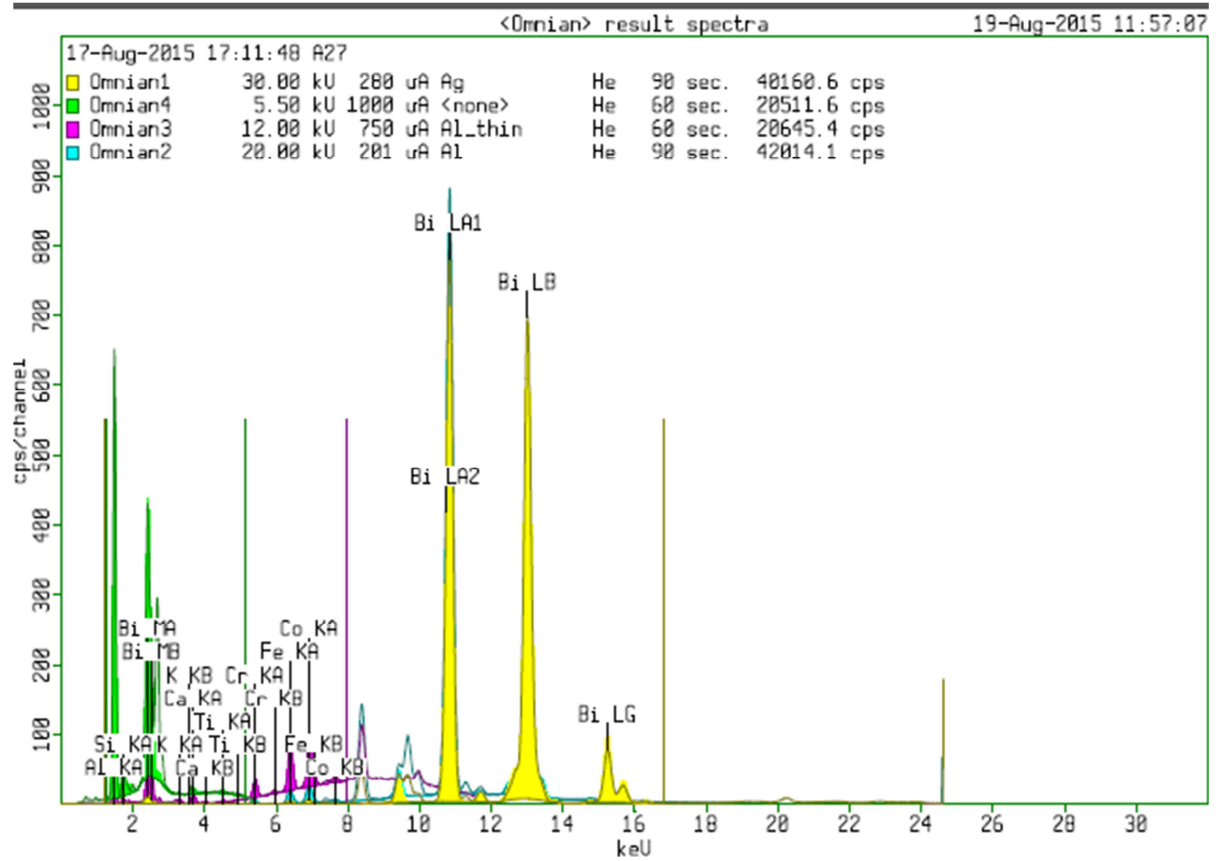
งานวิจัยนี้ได้นำไปเผยแพร่ในวารสาร Key Engineering Materials Volumes 675-676 pp. 315-317 และได้นำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ Applied Physics and Material Applications II และเผยแพร่ในการประชุมเผยแพร่แผนงานวิจัยนวัตกรรมใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่ จังหวัดกาญจนบุรีซึ่งทั้งหมดนี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและในเชิงอุตสาหกรรม

ตารางสรุปความเห็นของ ผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิจัย และผู้ประสานงานต่อรายงานฉบับสมบูรณ์ของโครงการ
ประเด็นวิธีการ

ความเห็นผู้ทรงคุณวุฒิ	คำชี้แจงของนักวิจัย	การจัดการของผู้ประสานงาน
1 ให้ปรับปรุงรายงานให้สมบูรณ์ตามข้อเสนอแนะในโครงการย่อย	ได้ ดำ เน น การ ป ร ิ บ ต า ม ข้อเสนอแนะในแต่ละครงการ ย่อยแล้วดังปรากฏในรายงาน ฉบับสมบูรณ์	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ
2 ให้เสนอร่างแผนงานวิจัยใหม่ ที่ อาจจะส่งในปีงบประมาณต่อไป ที่ ประกอบไปด้วย 2 โครงการย่อย คือ โครงการย่อยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่ม คุณภาพ และโครงการย่อยที่เป็น การเพิ่มมูลค่า (Valued added) ให้ ครบวงจร	อยู่ในระหว่างดำเนินการเขียน แผนงานวิจัยใหม่	☐ ชี้แจงได้กระจ่างและเห็นชอบตามคำชี้แจงของนักวิจัย ☐ ชี้แจงไม่กระจ่าง ให้ความเห็นไม่ได้และ ☐ ส่งให้ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาใหม่แล้วซึ่ง ☐ ผู้ทรงคุณวุฒิเห็นชอบด้วยแล้ว ☐ นักวิจัยแก้ไขตามคำแนะนำของผู้ทรงคุณวุฒิ

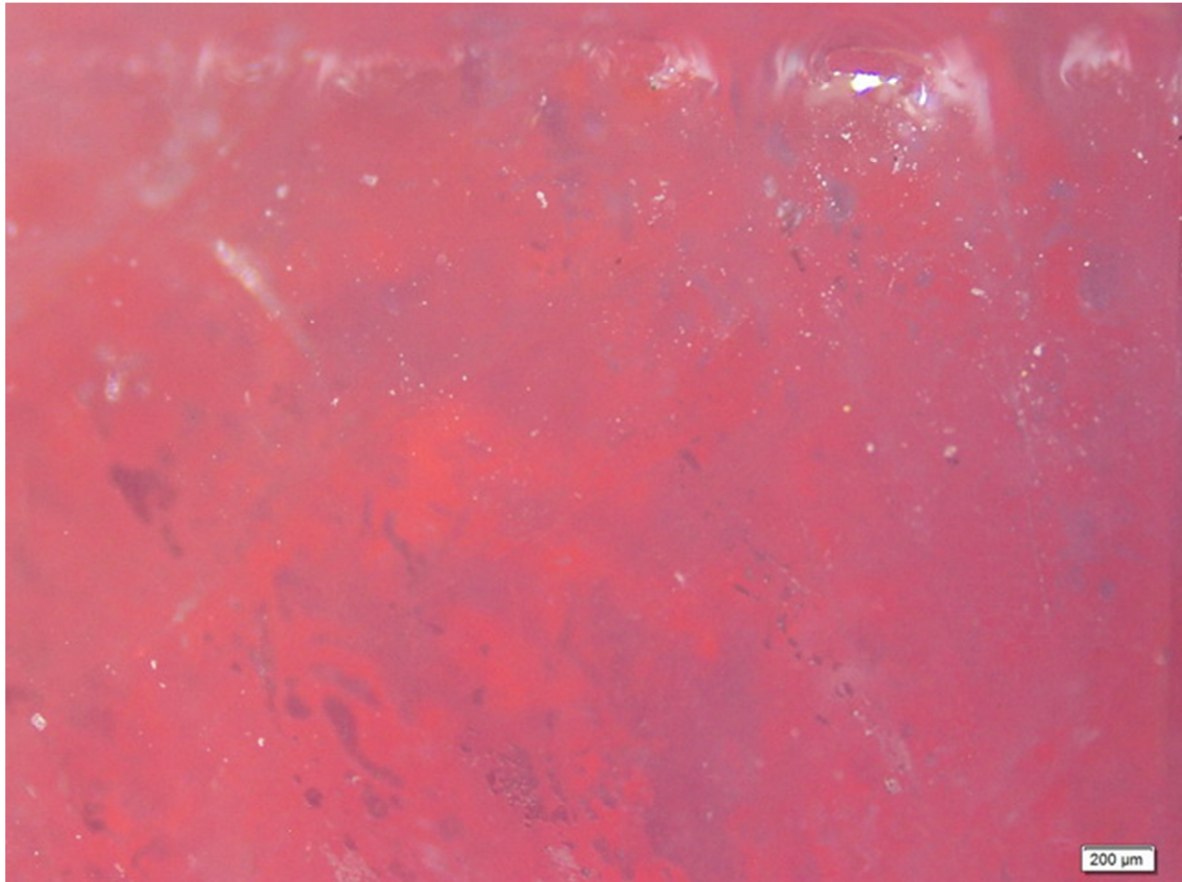
ภาคผนวก ก

แสดงลักษณะของผลการวัดโดยใช้เครื่อง XRF ของพลอยหลังเผา



ภาคผนวก ข

รูปถ่ายจากกล้องไมโครสโคปของพลอยหลังเผา



วิธีการสังเกตให้สังเกตในรอยแตกของพลอย จะแสดงลักษณะของแสงสะท้อนที่มีสีต่างๆ โดยแสงสะท้อนที่มีสีต่างๆ เกิดเนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่ต่างกันมากระหว่างพลอยกับสารเคมีที่แทรกเข้าไปในรอยแตกซึ่งก็คือ แก้วที่นำมาเผาด้วย

ภาคผนวก ค

การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

- ได้องค์ความรู้ทางด้านการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่สามารถตีพิมพ์บทความต่างๆได้ 1 บทความ
ดังรายละเอียดต่อไปนี้

☒ การนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมระดับนานาชาติ (ต่างประเทศ) จำนวน.....1..... ครั้ง

1.รูปแบบการนำเสนอ ☒ โปสเตอร์

☐ วีดีโอ/ สไลด์

☐ อื่นๆ

ชื่องานที่นำผลงานวิจัยไปแสดง..The 2nd International Conference on Applied Physics and
Material Applications (ICAPMA 2015)

หัวข้อที่เสนอ..." Effect of Bismuth Glass Filling Treatment on Physical Properties of
Natural Ruby.."

ประเทศ/ เดือน/ ปี ที่นำเสนอผลงาน.....Thailand/ May/ 2015.....

ได้มีการจัดกิจกรรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยี ดังนี้

ได้มีการจัดกิจกรรม นวัตกรรมใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี เมื่อวันที่ 24 กันยายน 2558 ณ เกาะ
กูด หมู่ 4 ไร่สอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี โดยมีการจัดการบรรยายจากทั้งนักวิจัยในโครงการ และ บริษัทเอกชนที่สนใจ
ผลงานวิจัย และการให้ข้อเสนอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และมีผู้เข้าร่วมสัมมนาทั้งบริษัทเอกชน นักวิชาการ นักศึกษา
ระดับบัณฑิตศึกษา และชาวต่างชาติ โดยมีกำหนดการสัมมนา และรูปภาพดังต่อไปนี้

