



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการใช้เทคนิคไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน
เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงแสงพลอยธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว

The optical modification on natural greenish blue sapphire
by nitrogen ion implantation

โดย ดร. เสวต อินทศิริ และคณะ

ธันวาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้เทคนิคไนโตรเจนไอออนอิมпланเตชัน
เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงแสงพลาสมารวมชาติสีน้ำเงินอมเขียว

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. เสวต อินทศิริ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. ดวงแข บุตรกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
4. บงกช พิชัยกำจรวุฒิ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
5. บริษัท แชนไพร์วิลเลจ (ประเทศไทย) จำกัด	

ชุดโครงการ การพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอขอบคุณ นายช่างเทคนิคและวิศวกรวิจัย ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วย นายระเบียบ สุวรรณโกสุม และ นายวิชณ บัญสุข สำหรับการดูแลรักษา และปรับปรุงเครื่องยิงลำไอออน นายโณม ทองเหลื่อม สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคแทน เต็ม นายชาญชัย อุโมงโน สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องพลาสมา ขอขอบคุณ นายรัฐพล อำพล นายชัยพิพัฒน์ แพ่งเกษร และ นางสาวธัญพร เต็งชัยศรี สำหรับการช่วยบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลพลอยคอ รันดัม ขอขอบคุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิ โรฒ ที่เข้าร่วมเป็นส่วนหนึ่งของโครงการ

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ร่วมกับ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับงบประมาณในการดำเนินงานโครงการ

คณะผู้วิจัย

พฤษภาคม 2558

ประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคุณภาพพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว (blue greenish sapphire) จึงมีความสำคัญ และเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณี ให้ประเทศไทยยังคงเป็นศูนย์กลางการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่สำคัญของโลกต่อไป

ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษา มาจากแหล่งพลอยที่มีความสำคัญในตลาดอัญมณี ประกอบด้วยพลอยจากแหล่งในประเทศไทย ทั้งสิ้น 4 แหล่ง จาก 3 จังหวัด ได้แก่ แพร่ กาญจนบุรี และ จันทบุรี และมีแหล่งจากต่างประเทศ เพื่อนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ออสเตรเลีย และ มาดากัสการ์ ซึ่งเป็นแหล่งที่มีปริมาณธาตุหลักสูง ที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ โดยใช้จำนวนตัวอย่างจำนวนมากต่อแหล่ง เพื่อดูความเป็นไปได้ในเชิงสถิติ ในการทดลองได้แบ่งตัดพลอยแต่ละเม็ดออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปเผาด้วยเทคนิคต่างๆ และส่วนที่ 2 นำไปยิงด้วยไอออนชนิดต่างๆ ผลการทดลองทั้ง 2 ส่วน นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจอีกด้วย

โดยปกติคอร์ันดัมซึ่งมีสูตรเคมีเป็น Al_2O_3 ในระบบผลึกไตรโกนอล (Trigonal) เป็นแร่ที่มีสีใสไม่มีสี การเกิดสีของคอร์ันดัมจะมีลักษณะการเกิดแบบ “Allochromatic” ซึ่งเกิดจากธาตุร่องรอยที่เจืออยู่ในเนื้อพลอยในปริมาณเล็กน้อย โดยธาตุแต่ละชนิดที่เจือจะให้สีแตกต่างกัน และธาตุบางชนิดเมื่อมีเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ที่แตกต่างกันก็จะให้สีที่ต่างกัน ธาตุเจือเหล่านี้สามารถพบได้ในคอร์ันดัมหลายรูปแบบ เช่น อาจพบได้ในรูปแบบของการแทนที่ในโครงสร้างของคอร์ันดัม ซึ่งหากธาตุร่องรอยเหล่านั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับอลูมิเนียม (Al^{3+}) ก็จะสามารถเข้าแทนที่ในโครงสร้างได้ ซึ่งการเจือในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคอร์ันดัม ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุเจือที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดสีแดง และคู่ธาตุเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ในโครงสร้างของคอร์ันดัมซึ่งให้สีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังอาจพบธาตุเจือเหล่านี้ในรูปแบบของมลทิน ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ระดับนาโนเมตรซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จนถึงระดับมิลลิเมตรซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลกับความใสสะอาดของคอร์ันดัม [3] ธาตุเจือเหล่านี้เป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดสีต่างๆในแร่คอร์ันดัม

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆดังนี้ (1) การวัดสีเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานโดยเครื่องวิเคราะห์สี (colorimeter) (2) การศึกษาการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Visible spectroscopy (3) การใช้เครื่อง EDXRF เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมลทินออกไซด์ของโลหะต่างๆเช่น Al_2O_3 , FeO และ TiO_2 (4) การทดลองให้ความร้อนในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างๆ (5) การทดลองใช้กระบวนการทางลำไอออนในสภาวะต่างๆ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว โดยหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลทินต่อโครงสร้างพลอยและปริมาณของธาตุร่องรอย เพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดพลอย เช่น ความสดของสี ความใส-สะอาด มลทินน้อย มีประกายหรือมีการเรืองแสงภายใต้แสงชนิดต่างๆ (6) ทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของแหล่งพลอยต่างๆ เพื่อพัฒนาพลอยให้มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มมูลค่าของพลอยคุณภาพต่ำได้

ในการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย ได้ทดลองใช้การเผาทั้งในแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 – 1750 °C และเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C โดยใช้เทคนิคแบบเผายก และการเผาแบบรีดักชันในเตาน้ำมันดีเซลอุณหภูมิ 1900 °C โดยใช้เทคนิคแบบเผาอบ การพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยเป็นเสมือนการพัฒนาเทคนิคการเปลี่ยนสภาพของเชื้อสีซึ่งเป็นธาตุเจือในคอร์ันดัม ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันของธาตุเจือเหล่านั้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่อยู่ของธาตุเจือและการแปรสภาพของมลทินขนาดเล็ก ให้เกิดการแพร่แทนที่

เข้าสู่โครงสร้างของคอร์นดัม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความสะอาดของคอร์นดัมได้ โดยเทคนิคเหล่านี้จะมีเงื่อนไขตัวแปรหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแหล่งพลังงานในการเผา อุณหภูมิในการเผาและอุณหภูมิสูงสุดในการเผา จำนวนครั้งที่เผา บรรยากาศในขณะทำการเผา ความแรงของการเพิ่มและการลดอุณหภูมิในการเผา และสารเคมีที่ใช้ร่วมกับการเผา เป็นต้น โดยผลจากการทดลองพบว่า การเผาแบบออกซิเดชันช่วยให้พลอยที่มีสีเข้ม-มืด และขุ่นมัว ให้มีสีอ่อนลงและใสขึ้น ส่วนการเผาแบบรีดักชัน ช่วยให้พลอยที่มีสีอ่อน ให้เข้มขึ้น และช่วยให้สีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด นอกจากนี้ ยังช่วยกำจัดเหลือบสีเขียวด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยลำไอออนซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ในการทดลองยิงพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจนในสภาวะสุญญากาศ พบว่ามีความน่าสนใจคือไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างไนโตรเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ไนโตรเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวซึ่งมีสีเหลือจากสีของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้าง หลังการยิงไอออนไนโตรเจนสีเหลืองจางลงจนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ เกิดจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจากเฟอร์ริกไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์นดัม ผลที่ได้คือจะทำให้สีเขียวเจือจางลงหรือหายไป

ในกรณีของการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจน พบว่าพลอยน้ำเงินเข้มทึบแสงหลังการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจนส่งผลให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้นและทำให้เห็นสีน้ำเงินสดเข้มขึ้นด้วย กระบวนการสร้างออกซิเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ออกซิเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี โดยจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตรงข้ามกับการทดลองยิงด้วยลำไนโตรเจน ออกซิเจนไอออนที่ฝังเข้าไปในคอร์นดัมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ทั้งที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้างและที่เป็นมลทินขนาดเล็กในคอร์นดัม เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์นดัม ส่งผลให้สีน้ำเงินทึบแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะของสีที่น้ำเงินที่สว่างขึ้น

นอกจากนี้มลทินขนาดเล็กที่สามารถพบได้ทั่วไปในพลอยคอร์นดัมธรรมชาติ ซึ่งมักเกิดร่วมกับธาตุหลักและไทเทเนียม ทำให้สามารถพบแร่มลทินที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ในเนื้อพลอยคอร์นดัม เช่น แร่อิลมีไนต์ (Ilmenite; FeTiO_3) แร่รูไทต์ (Rutile; TiO_2) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) แร่ไดแอสปอร์ (Diaspore; AlOOH) เป็นต้น โดยมีมลทินขนาดเล็กเหล่านี้จะส่งผลให้พลอยมีลักษณะขุ่นมัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมลทินและขนาดของมลทินด้วย เมื่อมีการยิงลำไอออนของออกซิเจนสู่พลอยคอร์นดัมที่มีมลทินขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จะทำให้เกิดการออกซิไดส์เกิดขึ้นในเนื้อพลอย มลทินขนาดเล็กเหล่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์นดัมในรูปของ $\text{Fe: Al}_2\text{O}_3$, และ $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ ทำให้มลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยแปรสภาพไปโดยอาจมีขนาดที่เล็กลงหรืออาจแพร่หายไปในการสร้างได้ ส่งผลให้พลอยคอร์นดัมมีความสะอาดเพิ่มขึ้นหลังการยิงพลอยคอร์นดัมด้วยออกซิเจนไอออน

ดังนั้นผลจากการเผาผลายที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการยิงตัวอย่างผลายด้วยลำไอออน จะพบว่ามีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก โดยทั้งสองวิธีจะมีตัวแปรที่สำคัญคือบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชันในการปรับปรุงคุณภาพผลาย โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของเหล็กที่จะส่งผลให้มีสีของผลายคอร์รันดัมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของมลทินขนาดเล็กในเนื้อผลายได้เช่นเดียวกัน แต่ในการยิงลำไอออนจะเป็นการเปลี่ยนสภาพของธาตุเจือให้สีโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่จะพบว่าด้วยพลังงานของลำไอออนหรือจำนวนโดสที่ใช้ในการทดลองยังไม่มากเพียงพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของธาตุเจือให้สีที่เด่นชัดเท่ากับการเผาด้วยความร้อน หากมีการพัฒนาเครื่องเร่งลำไอออนให้สมบูรณ์มากขึ้น และเลือกค่าพลังงานหรือจำนวนโดสที่เหมาะสมกว่านี้ น่าจะสามารถปรับปรุงคุณภาพสีของผลายคอร์รันดัมให้เทียบเท่าการเผาได้

ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการยิงไอออนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น อีกทั้งให้มีการเพิ่มช่องใส่ไนโตรเจนเหลวด้วยในระบบ ด้วยจุดประสงค์ให้มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของผลาย เพื่อให้ลดความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและเพิ่มสภาวะการเป็นอสัณฐาน (amorphous phase) ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสง เช่น โปร่งแสงมากขึ้น เป็นต้น

บทคัดย่อ

แม้ว่าพลอยคอร์นดัมจะถูกขุดพบตามแหล่งใหม่ๆ ในโลกอยู่เสมอ แต่พลอยที่ถูกพบจากแหล่งใหม่ รวมกับจากแหล่งเดิมๆ ที่ถูกขุดพบใหม่ ยังคงไม่พอเพียงต่อความต้องการของผู้ใช้ อันเนื่องมาจากแหล่งของพลอยที่ได้รับการยอมรับว่ามีพลอยคุณภาพดีมีจำนวนจำกัด พลอยจากแหล่งใหม่ๆ มักมีคุณภาพต่ำ มนุษย์จึงหาวิธีที่จะปรับปรุงคุณภาพพลอยเหล่านี้ให้สวยงาม เหมาะสมกับความต้องการของตลาด การเผาพลอยเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด ซึ่งทำให้สีของคอร์นดัมดีขึ้นและอยู่คงทนถาวร แต่การเผาจะทำให้พลอยเปลี่ยนแปลงสภาพ มีร่องรอยการเปลี่ยนแปลงจากผลของความร้อนสูง สามารถบอกได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินภายในพลอย นอกจากนี้ การเผาพลอยยังมีความยุ่งยาก ซับซ้อน และใช้เวลานาน เฉพาะผู้เชี่ยวชาญเท่านั้นที่ทำได้ โดยอาศัยการดูหมำหรือมลทินในเนื้อพลอย เป็นตัวกำหนดอุณหภูมิที่จะใช้ในการเผา ปัจจุบัน จึงมีการใส่สารเคมีชนิดต่างๆ ผสมเข้าไประหว่างการเผา เพื่อเร่งให้ปฏิกิริยารวดเร็วขึ้น สารเคมีเหล่านั้น นอกจากจะมีอันตรายต่อผู้ที่เกี่ยวข้องแล้ว ยังทำให้เนื้อพลอยมีคุณภาพต่ำลง มีผู้พยายามใช้เทคโนโลยีอื่นๆ เช่น ยิงด้วยเลเซอร์ อิเล็กตรอน นิวตรอน หรือ แกมมา ซึ่งบางอย่างใช้ได้ผลกับพลอยเนื้ออ่อน แต่มักไม่ได้ผลกับพลอยคอร์นดัม ซึ่งมีโครงสร้างที่แข็งแรงกว่า เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน หรือ การยิงฝังด้วยไอออน ซึ่งเป็นการให้พลังงานโดยตรงกับพลอยโดยไม่เกี่ยวกับความร้อน สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะทางไอออนของธาตุเจือให้สี นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของสีพลอยคอร์นดัม ถือว่าเป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจในการนำมาพัฒนาคุณภาพพลอยคอร์นดัม

เป็นที่ทราบกันดีว่าการที่พลอยสีน้ำเงินที่มีสีเหลืองปน จนทำให้เห็นพลอยเป็นสีน้ำเงินอมเขียวนั้น จัดเป็นพลอยที่ตลาดไม่ให้ความนิยม จึงมีการนำเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี และความใสสะอาด มาปรับปรุงคุณภาพพลอยให้เป็นสีน้ำเงินสด ทำให้พลอยมีมูลค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีปัจจุบันยังทำไม่ได้ส่วนใหญ่ มักจะใช้การเผาโดยเติมธาตุเบริลเลียม เพื่อให้ได้เป็นสีเหลือง งานวิจัยส่วนนี้ เริ่มต้นโดยการรวบรวมพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว จากแหล่งพลอยที่มีความสำคัญในตลาดอัญมณี คือ จากแหล่งรวินดา ออสเตรเลีย และแหล่งพลอยของประเทศไทย 3 แหล่ง ได้แก่ จันทบุรี กาญจนบุรี และแพร่ ซึ่งเป็นแหล่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง ที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ และกลุ่มที่มีปริมาณเหล็กต่ำที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร เช่น มาดากัสการ์ และศรีลังกา จากนั้น ได้แบ่งพลอยออกเป็นกลุ่มๆ ตามลักษณะเด่นของพลอย สี ขนาด และปริมาณของธาตุเจือที่ทำให้พลอยแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกัน รวมทั้งศึกษาลักษณะของอินคลูชันในพลอยแต่ละกลุ่ม พลอยแต่ละเม็ดได้นำไปผ่าครึ่งแล้วนำไปพัฒนาคุณภาพ ใน 2 รูปแบบ ได้แก่ (i) การยิงฝังด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบคอมแพ็ค โดยไม่มีกระบวนการอื่นเพิ่มหลังยิงไอออน ยกเว้นการทำความสะอาดผิวพลอยด้วยพลาสมา และ (ii) การเผาด้วยความร้อนสูงโดยไม่ใส่สารเคมี ซึ่งทำในหลายรูปแบบ ทั้งเผาแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้า และเผาแบบรีดักชันในเตาน้ำมัน โดยใช้อุณหภูมิสูง ตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป พลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วได้นำมาวิเคราะห์สมบัติทางแสง จนได้เป็นข้อสรุปทางวิทยาศาสตร์ ถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 วิธี ท้ายที่สุดได้เปรียบเทียบกระบวนการและผลที่เกิดขึ้น และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 วิธี

Abstract

Although new occurrences of natural gemstones are found from time to time in many parts of the world, these localities combined with historically important gem deposits have not always provided the best quality material in sufficient amounts to meet the current demand for gemstones among consumers. Besides the relatively small amount of high quality gem material typically produced at a given mining locality, there is also recovered a much larger percentage of lower quality material that has little market value. Individuals continue to strive to develop methods to treat this lower-quality material in the laboratory to enhance its appearance and thereby its marketability for gem purposes. Heat treatment is the most popular technique commercially used for the improvement of quality of gemstones. It mainly modifies color, unifies inclusions, increases transmittance and improves luster. However, the technique causes structural changes in corundum, e.g. the rutile which forms the silk dissolves into the stone at high temperature. The dissolving of microscopic rutile needles or tiny gas bubbles in pockets of liquid is evidence that the stones have been heated. Heat treatment is also difficult to control, i.e., it can eliminate inclusions or it can form them. It all depends on a number of factors including pressure, temperature, rate of heating and cooling and chemistry. Nowadays, a number of substances, which being toxic, have been intentionally added to the normal heat treatment for speeding up the process. Alternative treatments are exposing the gemstones to energetic particle beams and laser beams. Laser beams do not produce localized heating, whereas low mass particles such as electrons produce localized but yield poor coloration. Heavy ion beams are a good candidate of irradiating gemstones, for they are able to bring about both heating effect and introduction of defects, impurities and charges for modification of the optical properties, as well as treat individually different gems. Thus, ion beam irradiation has potentials for quality enhancement of the gems in corundum family.

It known that the most highly valued blue sapphires are velvety blue to violetish blue, in medium to medium dark tones. Preferred sapphires also have strong to vivid color saturation. The saturation should be as strong as possible without darkening the color and compromising brightness. On the other hand, greenish blue color or strong greenish blue pleochroism is commercial-grade sapphires, but its color isn't very marketable. Thus, various methods have been applied for improving the color quality of the dark blue and greenish blue sapphire. The popular one is heating in beryllium atmosphere to turn them to yellow sapphire. In the present study, we have applied our ion beam technology for color enhancement of the sapphire in this group. Blue sapphire deposits from Rwanda, Australia and Thailand which are basaltic in origin and those from Sri Lanka and Madagascar which are non-basaltic or metamorphic are chosen for investigation. Each sample was cut into half and submitted to polish before any investigation. Optical analysis using microscope, chemical analysis using PIXE and EDXRF, and absorption analysis using UV-NIR spectroscopy were applied for characterization. Each half of samples was

treated by 2 methods, i.e., (i) ion beam treatment and (ii) conventional heat treatment. On one hand, ion beam technology treatment was performed by nitrogen and oxygen ion implantation. No post treatment, except surface plasma cleaning, was done after the treatment. On the other hand, heat treatment was performed in both oxidation and reduction atmosphere. Results of post-treatment characterization were drawn for conclusions. Finally, ion beam technology and heat treatment are compared in term of economically evaluation.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
แบบสรุปผู้บริหาร	ง
บทคัดย่อ	ช
Abstract	ณ
สารบัญรูป	ฐ
สารบัญตาราง	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	4
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	4
2.1.2 การเกิดสีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน	6
2.1.3 สมบัติทางกายภาพของแซปไฟร์สีน้ำเงิน	7
2.1.4 คุณสมบัติทางแสงของแซปไฟร์สีน้ำเงิน	10
2.1.5 มลทินภายใน	17
2.1.6 แหล่งพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	18
2.2 เทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชันกับการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์ันดัม	22
2.2.1 เทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชัน	22
2.2.2 การพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ในประเทศไทย	26
2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์ด้วยลำไอออน	30
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	33
3.1 วัสดุ	33
3.2 อุปกรณ์	33
3.2.1 เครื่องมือตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา	33
3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมี	36
3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ทางแสง	40
3.2.4 เครื่องมือตรวจสอบมลทินภายในพลอย	47
3.2.5 เครื่องมือสำหรับปรับปรุงคุณภาพพลอย	51

3.3 ระเบียบวิธีการวิจัย	54
3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	54
3.3.2 แผนการดำเนินงาน	56
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	58
4.1 ผลการคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	58
4.1.1 การคัดเลือกตัวอย่างที่นำมาศึกษาและแหล่งที่นำมาศึกษา	58
4.1.2 การเตรียมตัวอย่างพลอย	62
4.1.3 สรุปลอยตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย	65
4.1.4 การตรวจวัดคุณสมบัติของพลอย	69
4.2 ผลการยึงฝังไอออนพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	83
4.2.1 การยึงฝังด้วยไอออนออกซิเจน	83
4.2.2 การยึงฝังด้วยไอออนไนโตรเจน	97
4.3 ผลการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน	107
4.3.1 การทดลองเผาด้วยเตาไฟฟ้า	107
4.3.2 การทดลองเผาด้วยเตาแก๊ส	125
4.3.3 การทดลองเผาด้วยเตาน้ำมัน	130
4.4 การวิเคราะห์ผลการศึกษาวิจัย	143
4.4.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของพลอยจากแหล่งต่างๆ	143
4.4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้เทคนิคให้ความร้อนและการใช้ลำไอออน	161
4.4.3 การทดลองในกลุ่มตัวอย่างที่มากขึ้นเพื่อหาข้อสรุปเชิงสถิติ	164
4.4.4 การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัย	164
บทที่ 5 บทสรุป	166
5.1 สรุปผลการทดลอง	166
5.2 ข้อเสนอแนะ	169
เอกสารอ้างอิง	170
ภาคผนวก	173
ก) เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ	174
ข) ข้อมูลพื้นฐานของพลอยจากแหล่งต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง	176

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 โครงสร้างของคอร์ันดัมและตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออน มองจากด้านข้างและด้านบน	5
2-2 แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure	5
2-3 รูปผลึกของคอร์ันดัม (corundum)	6
2-4 ความแข็งของอัญมณีในหน่วยโมห์ เทียบกับความแข็งมาตรฐานในหน่วย Knoop และ Vickers	8
2-5 ภาพวาดแสดงแนวแตกแบบ pinacoid และแนวแตกแบบ rhombohedron	9
2-6 แสดงแนวแตกในเนื้อแซปไฟร์สีน้ำเงิน	9
2-7 แนวแตกแบบขรุขระ	9
2-8 การดูตกถื่นคลื่นแสงสีขาวของพลอย และปล่อยคลื่นแสงสีที่ส่องผ่านมายังสายตาเห็นเป็นสีพลอย	10
2-9 ชุดประเมินคุณภาพสีพลอยตามมาตรฐานของสถาบัน Gemological Institute of America (GIA)	14
2-10 ลักษณะประกายของแซปไฟร์สีน้ำเงิน ซึ่งจะเป็นประกายแบบกึ่งเพชรถึงแก้ว	15
2-11 ลักษณะของ doubling ในพลอย	16
2-12 แถบสี (color zoning) ในแซปไฟร์สีน้ำเงิน	17
2-13 บริเวณที่พบ basalts ยุค Cenozoic ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมักจะพบพลอยคอร์ันดัม ในบริเวณเดียวกันด้วย	20
2-14 แผนที่แสดงบริเวณแหล่งพลอยคอร์ันดัมในบริเวณจันทบุรี-ตราด	21
2-15 กลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน	23
2-16 ลักษณะองค์ประกอบทั่วไปของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์	24
2-17 ความลึกของการฝังไอออนโบรอนในเนื้อซิลิกอนที่ไอออนพลังงานค่าต่างๆ	24
2-18 ความลึกของการฝังไอออนฟอสฟอรัสพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในซิลิกอน ในแนวขานลิ่ง	25
2-19 ไดอะแกรมและรายละเอียดทางไฟฟ้าของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ศักย์ไฟฟ้าเร่งไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	27
2-20 ภาพถ่ายและไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด สำหรับงานพลอยคอร์ันดัม ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	28
2-21 ภาพร่างพลอยสำหรับยิงไอออน ในเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	29
2-22 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันที่โดสค่าต่างๆ	31
2-23 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนที่มีแถบสีน้ำเงินเข้มก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน	31
2-24 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน	32

2-25	เปรียบเทียบพลอยจากแหล่งดีอาโก้ประเทศมาดากัสการ์ 2 ตัวอย่าง ระหว่างก่อนและหลังยิงไอออน	32
3-1	เครื่องชั่งละเอียด Mettler Toledo CG1003	34
3-2	เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ Duplex II	34
3-2	เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ Duplex II	35
3-4	โต๊ะแสงที่ใช้ในการทดสอบความโปร่งแสง	35
3-5	เครื่องเร่งอนุภาค 1.7 ล้านโวลต์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่และอูวีเคราะห์ (analysis chamber)	36
3-6	สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03	37
3-7	ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบ X-ray spectrometer (DX 95, บริษัทฟิลิปส์)	38
3-8	เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)	38
3-9	ไดอะแกรมการติดตั้ง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)	39
3-10	EPMA ประกอบด้วย electron gun อูวีเคราะห์พร้อมหัววัด control console และ monitors	40
3-11	Electronic transitions และ UV-visible spectra ในอะตอม และโมเลกุล	41
3-12	UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U4001 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ	41
3-13	ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer	41
3-14	UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-4100 ของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	42
3-15	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03 บันทึกจากเครื่อง UV-Vis-NIR spectroscopy	43
3-16	เปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่และจากเอกสารอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าพลอยชนิดนี้กำเนิดจาก magmatic segregation	43
3-17	Optical Spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics นำมาดัดแปลงเพื่อใช้วัดสีของพลอยโดยตรง	44
3-18	การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)	44
3-19	กราฟ Absorbance และ Chromaticity diagram ของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่	45
3-20	แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy	46
3-21	เครื่อง FTIR ยี่ห้อ Nicolet รุ่น 6700 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ	46
3-22	กล้องจุลทรรศน์อัญมณีพร้อมอุปกรณ์ถ่ายภาพ	47
3-23	มลทินชนิดต่างๆที่พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่ บันทึกภาพโดยกล้องไมโครสโคป	47
3-24	ไดอะแกรมแสดงระดับชั้นพลังงานของการให้แสงแบบต่างๆ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์	48

3-25	สเปกตรัมรามานของคอร์ันดัมสังเคราะห์ชนิดแซปไฟร์สีเหลืองหมายเลข X080003 กระตุ้นโดยเลเซอร์ความยาวคลื่น 780 nm ในแนวสุ่ม (unoriented) พร้อมโหมดที่นิยามโดย Porto และคณะ	49
3-26	สเปกตรัมรามานของแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03	49
3-27	สเปกตรัมรามานของอินคลูชันชนิด Feldspar พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่	50
3-28	สเปกตรัมรามานของมลทินชนิด Graphite พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่	50
3-29	ภาพถ่ายและแผนภาพของเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์	51
3-30	ภาพถ่ายและแผนภาพของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยเชิงพาณิชย์ที่สร้างขึ้นใช้งานเอง	52
3-31	Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร	53
4-1	พลอยจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่	58
4-2	พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ชุดที่ 1	59
4-3	พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ชุดที่ 2	59
4-4	พลอยจากแหล่งตากพรหม ชุดที่ 1	60
4-5	พลอยจากแหล่งตากพรหม ชุดที่ 2	60
4-6	พลอยจากแหล่งบางกะจะ ชุดที่ 1	61
4-7	พลอยจากแหล่งบางกะจะ ชุดที่ 2	61
4-8	ตัวอย่างพลอยในแต่ละกลุ่มสีทั้ง 7 กลุ่ม	63
4-9	การหล่อพลอยเข้าเบ้าเรซินเพื่อทำการขัดหน้าเรียบ	65
4-10	พลอยจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่ ที่ไม่ได้ตัดแบ่งครึ่ง	66
4-11	พลอยจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่ ที่นำมาตัดแบ่งครึ่งตามแนวตั้งฉากแกน C	66
4-12	พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ที่นำมาตัดแบ่งครึ่งตามแนวตั้งฉากแกน C	67
4-13	พลอยจากแหล่งตากพรหมกลุ่มน้ำเงิน นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ	67
4-14	พลอยจากแหล่งตากพรหมกลุ่มน้ำเงิน-เขียว นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ	68
4-15	พลอยจากแหล่งบางกะจะกลุ่มสีน้ำเงิน-เขียว นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ	68
4-16	พลอยจากแหล่งบางกะจะกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ	69
4-17	ตัวอย่างมลทินภายในที่พบในตัวอย่างก่อนทำการเพิ่มคุณภาพ	74
4-18	Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkB 03 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศา และ 90 องศา	75

4-19 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	76
4-20 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrWtC 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	76
4-21 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpZn 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	77
4-22 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpSlZn 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	77
4-23 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	78
4-24 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcPt 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสง ในแนว 0 องศาและ 90 องศา	78
4-25 Population field appearance ของ Ti + Fe และ Ga ของพลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้	82
4-26 ตัวอย่าง PhrDkC18_2 เปรียบเทียบก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน จะเห็นว่าพลอยโปร่งแสง ขึ้น สีสนิมลดลง และสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น	83
4-27 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC05_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	87
4-28 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC06_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	88
4-29 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC07_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	89
4-30 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	90
4-31 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC15_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	91
4-32 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC16_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	92
4-33 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC17_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	93
4-33 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC17_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	94
4-35 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC19_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยวัดในแนวแกน 0 องศา และแนวแกน 90 องศา	95

4-36 ตัวอย่าง BkZn27_02 เปรียบเทียบก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะเห็นว่าเหลือบสีเขียวหายไป และพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น	97
4-37 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn02_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	99
4-38 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn04_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	100
4-39 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	100
4-40 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn11_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	101
4-41 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn15_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	101
4-42 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn20_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	102
4-43 ตัวอย่าง BkSlZn 04_2 เปรียบเทียบก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะเห็นว่าพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น	102
4-44 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง KcPt06_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	105
4-45 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง KcPt08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน	105
4-46 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01_1 ในทิศทางขนานแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	111
4-47 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	112
4-48 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 08_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	113
4-49 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 08_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	114
4-50 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC12_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	115
4-51 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC12_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	116

4-68 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 03_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	138
4-69 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrSLZn 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	139
4-70 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrZn 01_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	140
4-71 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrZn 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	140
4-72 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkC 03_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	141
4-73 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkC 03_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน	141

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของแชปไฟร์สีน้ำเงินกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี	7
2-2 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	29
3-1 ตำแหน่งของอะตอมในผลึกคอร์รันดัม และ Raman active modes ของคอร์รันดัม	49
3-2 กิจกรรมในระหว่างโครงการและผู้รับผิดชอบ	57
4-1 ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างพลอยในแต่ละกลุ่ม	69
4-2 ผลการตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแชปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว ในหน่วยเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก (wt%) ด้วยเทคนิค EDXRF	79
4-3 ผลของการยิงไอออนออกซิเจนต่อพลอยแชปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวจากแหล่งต่างๆ	83
4-4 ผลของการยิงไอออนไนโตรเจนต่อพลอยแชปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว แหล่งบางกะจะ	97
4-5 ผลของการยิงไอออนไนโตรเจนต่อพลอยแชปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว แหล่งแพร่ แหล่งตกพรหม และแหล่งกาญจนบุรี	103
4-6 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลงสีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้นเห็นลักษณะ Trapiche ชัดเจนขึ้น และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และสีน้ำตาลลดลง	109
4-7 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลง เห็นลักษณะแกนกลางสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตั้งแต่ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และแถบสีน้ำตาลลดลง	110
4-8 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น แขนของ Trapiche ลดลง สีกระจายทั่วทั้งเม็ด	117
4-9 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเด่นชัด และกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง	118
4-10 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นชัดเจน บริเวณแกนกลางสีเข้มมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ	118
4-11 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก	119
4-12 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า สีเขียวและคราบ ในตัวอย่างชุดนี้หายไปเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น	119

4-13	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด แขนของ Trapiche จางลงหรือหายไป แต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่	125
4-14	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง	126
4-15	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น สีกระจายมากขึ้นและเห็นมลทินสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น	126
4-16	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก	131
4-17	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก	132
4-17	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก	133
4-19	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียวลดลงและเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น	134
4-20	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียวลดลงและเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น	135
4-21	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียวลดลงและเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น	136
4-22	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้นหยาบสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด	136
4-23	เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง	137
4-24	สรุปกิจกรรมการทดลองเผาตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งประกอบด้วยกิจกรรมทดลองเผา 3 ครั้งหลักด้วยกัน	142
4-25	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มทึบแสง (Opaque) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสถานะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ	143
4-26	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มทึบแสง (Opaque) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสถานะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C	144
4-27	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสถานะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ	145
4-28	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสถานะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C	145

4-29	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	146
4-30	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาเตาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ	148
4-31	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า	149
4-32	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C	150
4-33	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark core) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	151
4-34	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (White core) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า	152
4-35	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (White core) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	153
4-36	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C	154
4-37	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส	154
4-38	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	155
4-39	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (Zoning) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	157
4-40	การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแถบสีน้ำเงินไม่เด่นชัด (Slight zoning) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C	160

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เป็นที่ทราบกันดีว่าพลอยแซฟไฟร์ที่มีสีน้ำเงินปนสีเหลือง ทำให้เห็นพลอยมีสีน้ำเงินอมเขียว นั่น เป็นสีที่ไม่ได้รับความนิยมในตลาดอัญมณี [1] จึงมีการนำเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพสีพลอยวิธีต่างๆ มาปรับปรุงสี (color) รวมถึงความใสสะอาด (clarity) เพื่อให้ได้สีน้ำเงินสด ซึ่งทำให้พลอยมีมูลค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีปัจจุบันยังไม่สามารถทำให้ได้สีน้ำเงินสดได้อย่างสมบูรณ์ จึงมักนำพลอยดังกล่าวไปปรับปรุงคุณภาพสีโดยการเผา ร่วมกับสารเบริลเลียม (Be) เพื่อปรับปรุงสีให้ได้เป็นสีเหลือง [1] โดยเทคนิคนี้ นอกจากจะใช้อุณหภูมิสูงและอาศัยความชำนาญของผู้เผา เพื่อให้พลอยเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการอย่างสมบูรณ์แล้ว ยังมีหลายปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความสำเร็จในการเผาพลอย เช่น สภาวะบรรยากาศของการเผา อุณหภูมิสูงสุดในการเผา ระยะเวลาที่ใช้ อัตราการให้ความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัวในแต่ละช่วงอุณหภูมิ และการคงระดับความร้อน ณ อุณหภูมิใดๆ แหล่งกำเนิดพลอย รวมทั้งธรรมชาติของวัตถุหรือสารเคมีที่สัมผัสกับเม็ดพลอย ซึ่งผู้ประกอบการต้องยอมรับความเสี่ยงที่เผาแล้วไม่ได้ผลตามที่คาดเช่นกัน และเนื่องจากการเผาเป็นการให้พลังงานในรูปของความร้อน และต้องใช้เวลาานาน ผลคือพลอยจะได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอทั้งเม็ด หรืออาจทำให้พลอยแตกร้าว หรือเปลี่ยนสภาพไปจนมีลักษณะเป็นหินได้ [1] ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว (blue greenish sapphire) จึงมีความสำคัญในแง่การพัฒนาวិธีการ เพื่อเพิ่มมูลค่าพลอยให้สูงขึ้น

วัสดุที่ใช้ในการทดลองในโครงการเป็นพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวจากหลายแหล่ง ประกอบด้วยพลอยจากแหล่งในประเทศไทย ทั้งสิ้น 4 แหล่ง จาก 3 จังหวัด ได้แก่ แพร่ กาญจนบุรี และ จันทบุรี ซึ่งเป็นแหล่งที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์และมีปริมาณธาตุเหล็กสูง นอกจากนี้ยังมีแหล่งจากต่างประเทศเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบการทดลอง ได้แก่ แหล่งประเทศออสเตรเลีย และ ประเทศมาดากัสการ์ โดยใช้จำนวนตัวอย่างจำนวนมากต่อแหล่งเพื่อหาความเป็นไปได้ในเชิงสถิติ นำมาทดลองยังด้วยลำไอออนทั้งในโตรเจนและออกซิเจน นอกจากนี้ยังนำตัวอย่างมาทำการทดลองเปรียบเทียบกับเทคนิคการเผาแบบที่นิยมทำกันในปัจจุบัน เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจอีกด้วย

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะทำการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังนี้

- 1) วัดสีตัวอย่างเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานโดยเครื่องวิเคราะห์สี (colorimeter)
- 2) ศึกษาการดูดกลืนแสงของตัวอย่างโดยเครื่อง UV-Visible spectroscopy
- 3) ใช้เครื่อง EDXRF วิเคราะห์หาปริมาณผลหินออกไซด์ของโลหะต่างๆ เช่น Al_2O_3 Fe_2O_3 และ TiO_2
- 4) ทดลองให้ความร้อนในสภาวะมีออกซิเจน (ออกซิเดชัน) และไร้ออกซิเจน (รีดักชัน) เปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างๆ
- 5) ทดลองใช้กระบวนการทางลำไอออนในสภาวะต่างๆ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงของพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว โดยหาความสัมพันธ์ของปริมาณผลหินต่อโครงสร้างพลอยและปริมาณของธาตุร่องรอย เพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดพลอย เช่น ความสดของสี ความใส-สะอาด มลทินน้อย มีประกายหรือมีการเรืองแสงภายใต้แสงชนิดต่างๆ

- 6) ทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของแหล่งพลอยต่างๆ เพื่อพัฒนาพลอยให้มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มมูลค่าของพลอยคุณภาพต่ำได้ เป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ คุ่มค่า และ เกิดประโยชน์สูงสุด เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณี ให้ประเทศไทยยังคงเป็นศูนย์กลางการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่สำคัญของโลกต่อไป

ในการยิงพลอยตัวอย่างด้วยลำไนโตรเจนไอออนในสถานะสุญญากาศ พบว่ามีความน่าสนใจคือไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่มียู่แล้วในพลอยธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างไนโตรเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ไนโตรเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้จะไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่จะเกิดผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสง คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวจากสีเหลืองของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ผลที่ได้คือจะทำให้สีเขียวเจือจางลงหรือหายไป จนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น ดังนั้นหากมีการให้พลังงานอย่างเหมาะสมจะสามารถลดสีเหลือง ส่งผลให้สีเขียวลดน้อยลงหรือหายไปได้ ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ และทำให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น มีสีน้ำเงินสดเข้มขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนากระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการให้ความร้อนภายในระบบ เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น อีกทั้งให้มีการเพิ่มช่องใส่ไนโตรเจนเหลวในระบบด้วยจุดประสงค์ให้มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของพลอย เพื่อช่วยลดความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและเพิ่มสภาวะความเป็นอสัณฐาน (amorphous phase) ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสง เช่น โปร่งแสงมากขึ้น เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของธาตุมลทินในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ที่มีต่อสมบัติการเปล่งแสง (luminescence) และการดูดกลืนแสง (absorption) ของพลอยชนิดนี้
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพสี ความโปร่งใส และลดตำหนิในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคลำไอออน
- 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพกับวิธีการเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในปัจจุบัน
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาด และปรับปรุงคุณภาพผิวพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ด้วยเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมา
- 5) เพื่อศึกษาวิธีการนำพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอออนแล้ว มาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้เทคนิคใหม่สำหรับปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ด้วยเทคนิคลำไอออน
- 2) ได้ข้อมูลเชิงเปรียบเทียบระหว่างการเผาพลอย ด้วยวิธีการเผาในปัจจุบัน กับเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันทั้งในแง่ของต้นทุนและผลที่ได้รับ

- 3) ได้องค์ความรู้ใหม่ทางวัสดุศาสตร์และเทคโนโลยีอัญมณีที่สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศได้
- 4) ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลอยแซปไฟรส์น้ำเงิน

พลอยแซปไฟรส์เป็นพลอยในตระกูลคอร์ันดัมหรือแรคอร์ันดัม มีสูตรทางเคมี คือ Al_2O_3 [2] โครงสร้างของคอร์ันดัมประกอบด้วยออกซิเจนหกอะตอม เชื่อมต่อกับอะลูมิเนียมอะตอมหนึ่งหรือมากกว่า ออกซิเจนอะตอมเชื่อมแน่นกันแบบหกเหลี่ยม (hexagonal closed packing) โดยมีอะตอมอะลูมิเนียมอยู่ในตำแหน่งที่ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม จึงมีอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปอยู่ในตำแหน่งนี้เพียง 2/3 ของช่องว่างที่มีอยู่ สีของแซปไฟรส์น้ำเงิน เกิดจากการเข้าแทนที่โดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) จำนวนเล็กน้อย

การพิจารณาระบบผลึก คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางเคมีของแซปไฟรส์น้ำเงิน อาจพิจารณาในรูปพลอยในกลุ่มแรคอร์ันดัมก็ได้ แต่ก็มีสมบัติบางประการที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวของแซปไฟรส์น้ำเงิน แตกต่างจากพลอยในกลุ่มคอร์ันดัม ซึ่งจะกล่าวต่อไป

2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซปไฟรส์น้ำเงิน

ประเภท : สารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

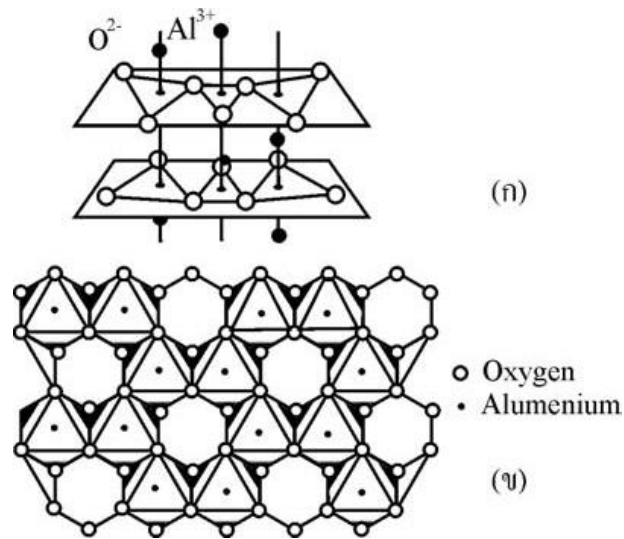
จุดหลอมเหลว : 2030 – 2050 องศาเซลเซียส

กลุ่ม Oxide (กลุ่ม haematite)

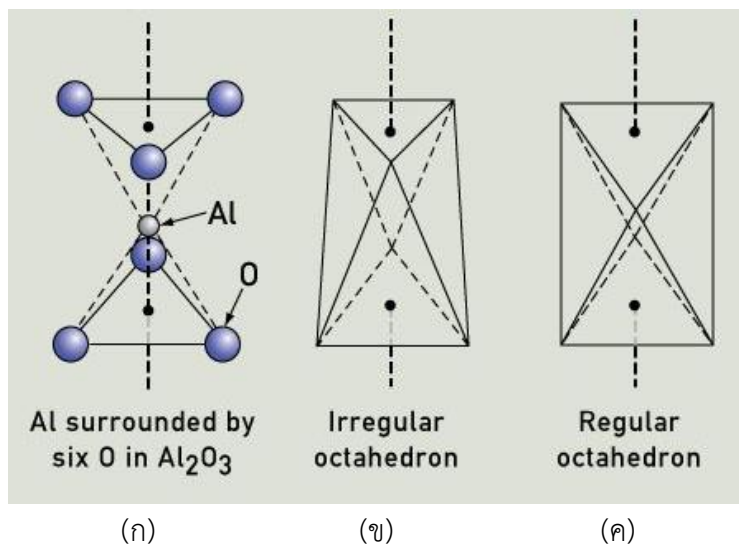
องค์ประกอบทางเคมีของแซปไฟรส์น้ำเงินประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด คือ อะลูมิเนียม (Al) 52.9 % และออกซิเจน (O) 47.1 % (อัตราส่วน 2:3) และมีธาตุเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เป็นธาตุร่องรอยที่ทำให้เกิดสีฟ้าหรือสีน้ำเงิน แต่กรณีที่มีเหล็กเข้าแทนที่เพียงอย่างเดียวจะทำให้คอร์ันดัมมีสีเหลือง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีปริมาณเล็กน้อย โดยทั่วไปคอร์ันดัมมีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรอล (Rhombohedral) ในระบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) คอร์ันดัมบริสุทธิ์จะไม่มีสี แต่ในธรรมชาติมีสารอื่นที่เป็นมลทินแทรกตัวอยู่ในปริมาณน้อย (ในหน่วย ppm) ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆกัน ส่วนประกอบของสารเจือปนปริมาณน้อยแต่ละชนิดจะแตกต่างกันไปแล้วแต่แหล่งที่เกิดในธรรมชาติ คอร์ันดัมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างแข็งแรง ผลึกมีพันธะเคมีสองแบบ คือ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ อะตอมอะลูมิเนียมมีชั้นอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตำแหน่ง เรียงดังนี้ $3s^2, 3p^1$ อะตอมออกซิเจนมีชั้นอิเล็กตรอนวงนอกสุดคือ $2p^4$ ออกซิเจนไอออนสองลบ (O^{2-}) มีเส้นผ่านศูนย์กลางไอออน 2.8 อังสตรอม (Å) ในโครงสร้างผลึกโมเลกุลที่อยู่อย่างเดี่ยวๆเป็นอิสระ จะมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนอย่างสมบูรณ์ไม่ได้ เมื่อจัดเรียงตัวออกซิเจนไอออนสองลบแบบเฮกซะโกนอล จะมีช่องว่างที่ล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออน 6 ตัว ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างเพียงพอสำหรับอะลูมิเนียม (Al^{3+}) แต่อะลูมิเนียม จะวางตัวเพียง 2 ช่องว่างในทุกๆช่องว่าง 3 ช่อง [3,4] โครงสร้างของคอร์ันดัมดังแสดงในรูปที่ 2-1 [4] และ 2-2 [5]

เนื่องจากอะลูมิเนียมถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออน (O^{2-}) 6 ตำแหน่ง เมื่ออยู่ท่ามกลางไอออนลบประจุไฟฟ้าลบของไอออนทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นมารอบๆ ไอออนของอะลูมิเนียม ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าสนามผลึก (crystal field) และสามารถบอกลักษณะเฉพาะในรูปแบบจำนวนสมมาตร การบิดของโครงสร้างทรง

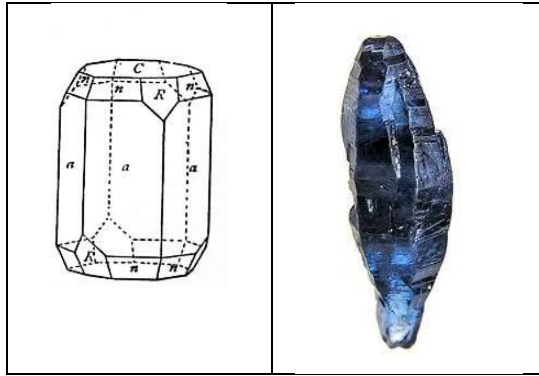
เหลี่ยมแปดหน้า รวมทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าสถิตย์ จากรูปที่ 2-1 โดยให้พิจารณารูปที่ 2-2 (ก) ผลึกบริเวณที่มี อลูมิเนียม (Al^{3+}) เพียงตำแหน่งเดียวและถูกปิดล้อมด้วยออกซิเจนไอออน 6 ตำแหน่ง และรูปที่ 2-2 (ข) อลูมิเนียม อยู่สูงหรือต่ำกว่าตำแหน่งที่เหมาะสม คืออยู่ชิดด้านใดด้านหนึ่งของชั้นออกซิเจนไอออน ทำให้โครงสร้างทรงเหลี่ยม แปดหน้าบิดไป (distorted octahedron) รูปที่ 2-2 (ค) แสดงให้เห็นว่าอลูมิเนียมอยู่ประมาณกึ่งกลาง ระหว่างชั้น ออกซิเจนไอออน ทำให้เกิดโครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้าแบบสมมาตรปกติ (regular octahedron) ทั้ง 3 รูป ยังคงสมมาตรแบบสามแกน (three fold symmetry) ตัวอย่างรูปผลึกของคอร์ันดัมแสดงดังในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-1 โครงสร้างของคอร์ันดัมและตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออน โดยที่ (ก) มองจากด้านข้าง (ข) มองจากด้านบน [4]



รูปที่ 2-2 แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure [5]

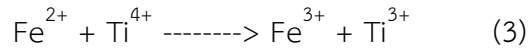
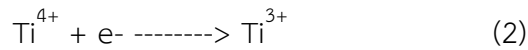
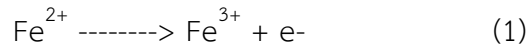


รูปที่ 2-3 รูปผลึกของคอแรนด์ (corundum)

2.1.2 การเกิดสีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน

เป็นการเกิดสีแบบ Allochromatic สีของพลอยที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดมาจากธาตุหลัก แต่เกิดจากธาตุที่ไม่จำเป็นต่อโครงสร้างทางเคมีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน ได้แก่ เหล็ก (Fe) และ ไทเทเนียม (Ti) อาจมีมลทินจากธาตุอื่นๆ เช่น โครเมียม (Cr) ที่ก่อให้เกิดสีแดง ธาตุอื่นนอกจากเหล็กและไทเทเนียมนั้นจะทำให้แซปไฟร์สีน้ำเงินมีสีเพี้ยนออกไปจากสีน้ำเงินหรือฟ้า สีน้ำเงินจะเข้มสดนั้นไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของธาตุเหล็กและไทเทเนียมเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับประจุไฟฟ้า (valance state) ของอะตอมธาตุมลทินของธาตุทั้งสองด้วย กระบวนการที่ทำให้เกิดสีในแซปไฟร์สีน้ำเงินนั้นเกิดจากกระบวนการ Intervalance Charge Transfer (IVCT) กระบวนการดังกล่าวเกิดจากธาตุอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นธาตุหลักในแซปไฟร์สีน้ำเงินถูกแทนที่ด้วยธาตุเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) โดยธาตุเหล็กอาจจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัส (Fe^{2+} - ferrous) และเฟอร์ริก (Fe^{3+} - ferric) ส่วนธาตุไทเทเนียมอาจจะอยู่ในรูปของไทเทโนส (Ti^{3+} - titanous) และไทเทนิก (Ti^{4+} - titanic) หากมี Fe^{2+} และ Ti^{4+} อยู่ในพลอยร่วมกันแล้วนั้นจะเกิดการทำปฏิกิริยากัน โดยอิเล็กตรอนจาก Fe^{2+} จะกระโดดไปยัง Ti^{4+} ซึ่งเรียกว่าการแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) คือ Ti^{4+} จะได้รับอิเล็กตรอนเพิ่มอีก 1 ตัวกลายเป็น Ti^{3+} ส่วน Fe^{2+} นั้นหลังจากสูญเสียอิเล็กตรอนไป 1 ตัวจะกลายเป็น Fe^{3+} กระบวนการนี้เรียกว่า “ Fe^{2+} - Ti^{4+} Intervalance Charge Transfer”

ผลึกของคอแรนด์มีไทเทเนียมในเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมากทำให้ไม่มีสี เมื่อไทเทเนียม (Ti) ถูกแทนที่ด้วยเหล็ก (Fe) อาจทำให้มองเห็นเป็นสีเหลืองจาง ๆ หากไทเทเนียมและเหล็กรวมกันในปริมาณที่เหมาะสม และเกิดจากการถ่ายเทประจุ (charge transfer) กลไกลักษณะนี้ทำให้เกิดสีน้ำเงินในแซปไฟร์ จะทำให้ได้สีน้ำเงินเข้มทั้งดงาม (blue sapphire) นั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนชั้น 3d เกิดการ displacement จากโอออนของเหล็กไปยังตัวอื่น โดยการดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุชั้น 3d เป็นการชั่วคราว สีเข้มหรือดําก็เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เป็นตัวที่ทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุได้ การถ่ายเทของประจุเกิดขึ้นใน Ligand field สามารถทำให้เกิดสี หรือแม้แต่อิเล็กตรอนไร้คู่ ก็เป็นสาเหตุให้เกิดสีโดยกลไกการเปลี่ยนแปลง d-d และ f-f transition ตัวอย่างเช่นการเกิดสีน้ำเงินในพลอยแดง ซึ่งจะทำให้พลอยเป็นสีแดงอมม่วง เกิดจากเหล็กและไทเทเนียม เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของอะลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 ทำให้ Octahedron บิดเบี้ยวไป ดังรูปที่ 2-2 (ข) โดยเหล็กจะมีได้หนึ่งตัว คือ Fe^{2+} (Ferrous) ขณะที่ไทเทเนียมมักจะอยู่ในรูป Ti^{4+} ถ้า Fe^{2+} อยู่ใกล้ชิดกับตำแหน่งของ Al ดังรูปที่ 2-2 (ข) ซึ่งแสดง Octahedron 2 ลูก ที่มีหน้าร่วมกันตามแนวแกน c จะเห็นว่า Fe และ Ti อยู่ห่างกัน 2.65 Å และมีการเหลื่อมกันระหว่าง d_{z^2} ออบิตอล ทำให้อิเล็กตรอนผ่านจากโอออนหนึ่งไปโอออนอื่นๆ โดย Fe^{2+} อิเล็กตรอนหายไป 1 ตัว กลายเป็น Fe^{3+} และ Ti^{4+} ได้รับอิเล็กตรอนมากกลายเป็น Ti^{3+} ดังสมการ [5]



นอกจากกระบวนการดังกล่าวนี้ ยังมีกระบวนการอื่นๆที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินของแซปไฟร์สีน้ำเงิน ได้แก่ กระบวนการ $\text{Fe}^{3+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$ และ Fe^{3+} pair ($\text{Fe}^{3+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$) สาเหตุการเกิดสีเหล่านี้เกิดขึ้นเนื่องจากในกรณีมีธาตุหลักมาก แต่ไทเทเนียมมีน้อยมากหรือไม่มีเลย กรณีนี้สีน้ำเงินที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนปริมาณของ valance state ของธาตุหลัก โดยกระบวนการ $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Ti}^{4+}$ IVCT โดยแซปไฟร์สีน้ำเงินที่ได้นั้นจะมีสีน้ำเงินเข้มขึ้น ความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการสร้างพลังงานของอะตอม Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่จะเปลี่ยนพลังงานให้เป็นสี ยังมีพลังงานสูงเท่าไร สีของแซปไฟร์สีน้ำเงินก็จะเข้มขึ้นเท่านั้น โดยความสัมพันธ์ระหว่างสีกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสีในแซปไฟร์สีน้ำเงินแสดงดังตารางที่ 2-1

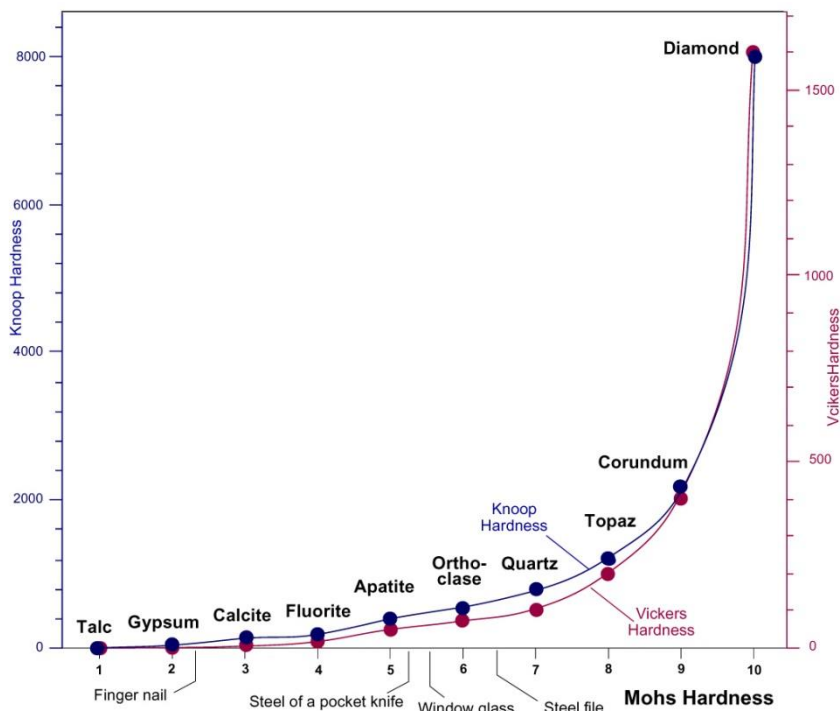
ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของแซปไฟร์สีน้ำเงินกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี [5]

สีที่ปรากฏ	กระบวนการที่ทำให้เกิดสี
น้ำเงิน	➤ $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Fe}^{4+}$ IVCT process บางครั้งอาจเกิดประกอบกับ $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$ และ Cr^{3+} ก่อให้เกิดสีน้ำเงินอ่อนและน้ำเงินอมม่วง ➤ $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ pairs
น้ำเงิน – ม่วง	➤ $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Ti}^{4+}$ IVCT process และ Cr^{3+} ➤ $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$ pairs (หรือ Fe^{3+}) และ Cr^{3+}

2.1.3 สมบัติทางกายภาพของแซปไฟร์สีน้ำเงิน (physical properties)

(ก) ความแข็ง (Hardness)

หมายถึง ความทนทานของพลอยต่อการขีดข่วนหรือการขีดสี ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะเคมี (bond) หรือแรงยึดเกาะกันระหว่างอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของพลอยชนิดนั้น ถ้าแรงยึดเกาะของพันธะเคมีนั้นสูงจะทำให้มีความแข็งมากนั่นเอง ค่าความแข็งจะบอกเป็นเลข 1-10 ตามสเกลมาตรฐานในการวัดความแข็งของโมห์ (Moh's scale of hardness) ความแข็งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของพลอย สามารถช่วยในการจำแนกชนิดของพลอยได้ นอกจากนี้ ยังช่วยแยกพลอยแท้ออกจากพลอยเทียมได้อีกด้วย แซปไฟร์สีน้ำเงินที่อยู่ในกลุ่มคอร์ันดัมนี้มีค่าความแข็งในระดับ 9 ซึ่งนับว่าแข็งแรงรองจากเพชรเท่านั้น บ่งบอกได้ว่าแซปไฟร์สีน้ำเงินเป็นพลอยที่ทนต่อแรงขีดข่วนและขีดสีได้ดี ความแข็งของอัญมณีในหน่วยโมห์ เทียบกับความแข็งมาตรฐานในหน่วย Knoop และ Vickers แสดงดังในรูปที่ 2-4



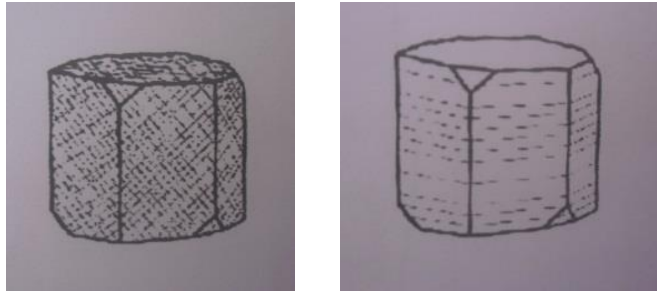
รูปที่ 2-4 ความแข็งของอัญมณีในหน่วยโมห์ เทียบกับความแข็งมาตรฐานในหน่วย Knoop และ Vickers [6]

(ข) ความเหนียว (Toughness)

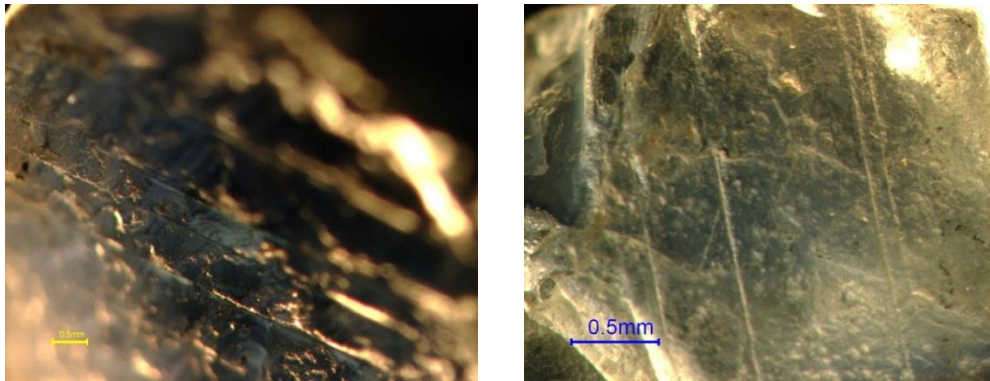
หมายถึง ความคงทนต่อการแตกหัก การโค้งงอ การฉีกขาด หรือ การบด ความเหนียวและความแข็งนั้นจะบ่งบอกถึงความคงทน (durability) ของพลอย แต่ไม่จำเป็นต้องสัมพันธ์กัน แชลไพร์สีน้ำเงินจัดอยู่ในความเหนียวมาก (excellent) จึงมีความเหมาะสม และสะดวกในการนำมาเป็นเครื่องประดับ ซึ่งระดับความเหนียวของรัตนชาติแบ่งได้เป็น เหนียวดีมาก (exceptional) ได้แก่ หยก เหนียวมาก (excellent) ได้แก่ คอรัันดัม เหนียวปานกลาง (good) ได้แก่ ควอตซ์ สปิเนล ไม่เหนียว (poor) เพราะ ได้แก่ โทแพซ เพอริโดท ความเหนียวของพลอยจะมีผลในการนำเอาพลอยชนิดนั้นมาตกแต่ง เพราะพลอยที่ไม่เหนียวจะยากต่อการนำมาแกะสลัก ตลอดจนยากต่อการดูแลรักษาเพราะแตกง่าย เสียหายได้ง่าย

(ค) แนวแตกเรียบ (cleavage) แนวแตก (Parting) และรอยแตก (fracture)

แนวแตกเรียบ (cleavage) เป็นแนวแตกเป็นระนาบตามโครงสร้างอะตอมในผลึกแร่ เป็นทิศทางที่อะตอมจับตัวกันไม่แข็งแรง โดยทั่วไปจะขนานกับหน้าผลึก อาจมีแนวเดียวหรือหลายแนวก็ได้ ส่วน แนวแตก (Parting) เกิดจากแนวระนาบที่โครงสร้างไม่แข็งแรง มักเป็นระนาบเชิงซ้อน (polysynthetic twin) หรือบางครั้งเรียกว่า “false cleavage” ข้อแตกต่างของแนวแตกเรียบกับแนวแตกก็คือ แนวแตกจะแตกตามแนวของระนาบแฝด โดยมีระยะห่างระหว่างแนวแตกห่างกันพอสมควร แต่ระยะอาจไม่เท่ากัน แต่แนวแตกแบบเรียบนั้นจะแตกตามแนวโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง ระยะห่างระหว่างรอยแตก คือ ระยะห่างระหว่างอะตอม (interatomic spacing) ซึ่งห่างเป็นระยะเท่าๆกัน ในพลอยคอรัันดัมไม่มีแนวแตกเรียบ แต่มีแนวระนาบเชิงซ้อนทั้งในแนวขนานกับหน้า rhombohedron และหน้า pinacoid จึงอาจแสดงแนวแตกได้ถึง 4 แนว ดังรูปที่ 2-5 ถึง 2-6

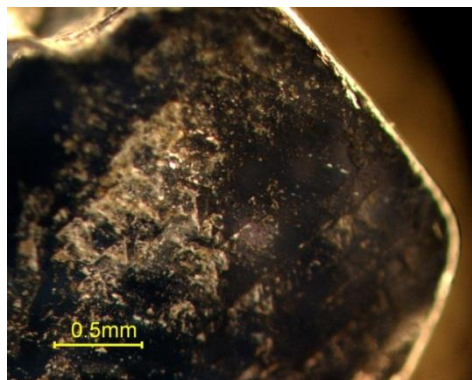


รูปที่ 2-5 ภาพวาดแสดง (ซ้าย) แนวแตกแบบ pinacoid และ (ขวา) แนวแตกแบบ rhombohedron



รูปที่ 2-6 แสดงแนวแตกในเนื้อแซปไฟร์สีน้ำเงิน

ส่วนรอยแตก (fracture) หมายถึงแนวอื่นๆที่ไม่ใช่แนวแตกเรียบ (cleavage) หรือแนวแตก (parting) มักจะมีทิศทางที่ไม่แน่นอน สามารถแบ่งออกได้หลายแบบ อาทิ รอยแตกแบบเรียบ (even fracture) มีลักษณะแตกเป็นแนวเรียบ รอยแตกแบบไม่เรียบ (uneven fracture) มีลักษณะแตกไม่เรียบผิวขรุขระ รอยแตกแบบขรุขระ (granular fracture) (รูปที่ 2-7) มีลักษณะแตกเป็นเม็ดๆ คล้ายผิวน้ำตาลก้อน รอยแตกแบบขั้นบันได (steplike fracture) มีลักษณะการแตกของแนวแตกแบบเรียบมากกว่า 1 ทิศทาง หรือแตกแบบแนวแตกแบบเรียบ (cleavage) ปนกับแนวแตก (parting) รอยแตกแบบเส้นใย (splintery or fibrous) มีลักษณะแตกเป็นเส้นใยคล้ายเนื้อไม้ที่แตกเป็นเส้นๆ รอยแตกแบบก้นหอย (conchoidal fracture) มีลักษณะเป็นวงซ้อนกันเหมือนกัน หอย และรอยแตกแบบกึ่งก้นหอย (subconchoidal fracture) มีลักษณะเหมือนกับรอยแตกแบบก้นหอย แต่ไม่เด่นชัดเท่า รอยแตกนับว่าเป็นสมบัติเฉพาะตัวของแร่ กล่าวคือแต่ละแร่จะมีรอยแตกไม่เหมือนกัน เช่น ควอร์ต การ เนต และเบริล มักมีรอยแตกแบบโค้งงอ หยกมักมีรอยแตกแบบเส้นใย และเพชรมีรอยแตกแบบเรียบ เป็นต้น



รูปที่ 2-7 แนวแตกแบบขรุขระ

(ง) ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity; S.G.)

ความถ่วงจำเพาะหรือเรียกสั้นๆว่า ถ.พ. หมายถึง ค่าอัตราส่วนความหนาแน่นของวัตถุต่อความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่กำหนด เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความหนาแน่น (density) ของเนื้อสาร ค่า ถ.พ. ของพลอยแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ ในกรณีของแซปไฟร์สีน้ำเงินหรือคอรัันดัมทั่วไป ค่า ถ.พ. อยู่ระหว่าง 3.95 – 4.1

2.1.4 คุณสมบัติทางแสง (Optical properties) ของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน

เมื่อมีแสงตกกระทบกับพลอย จะเกิดการสะท้อน และบางส่วนผ่านเข้าไปในตัวพลอย ก่อให้เกิดสีที่สวยงาม มีประกายที่แวววาว สมบัติทางแสงนี้แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visual characteristics) และแบบที่ต้องตรวจสอบด้วยเครื่องมือ (Optical tests)

คุณสมบัติทางแสงมีหลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น

(ก) สี (Color)

สีของพลอยนั้นเกิดจากการที่แสงสีขาวซึ่งเป็นแสงที่เรามองเห็น (visible light) มีลักษณะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ประกอบด้วยช่วงคลื่นแสงสี (Spectrum) 6 สี คือ แดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน และ ม่วง มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตร กระแทกกับผิวของพลอย ซึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับ (reflect) บางส่วนหักเห (refract) เข้าไปในเนื้อพลอย บางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ ส่วนที่เหลือจะปลดปล่อยเข้าตาเรา (รูปที่ 2-8) ทำให้เห็นเป็นสีตามช่วงแสงที่ปล่อยออกมา

ช่วงสีแดง 700 – 630 nm

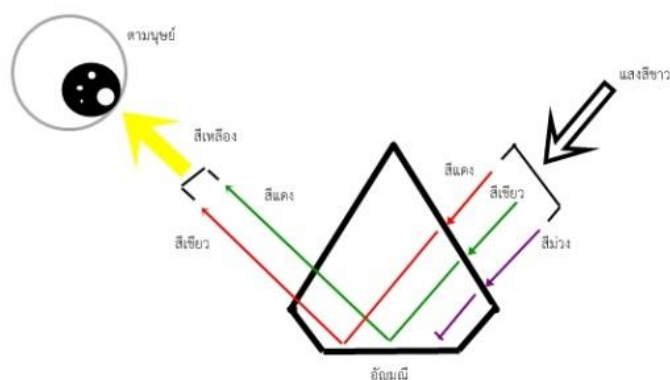
ช่วงสีส้ม 630 – 590 nm

ช่วงสีเหลือง 590 – 550 nm

ช่วงสีเขียว 550 – 490 nm

ช่วงสีน้ำเงิน 490 – 440 nm

ช่วงสีม่วง 440 – 400 nm



รูปที่ 2-8 การดูดกลืนคลื่นแสงสีขาวที่ส่องผ่านพลอย และปล่อยคลื่นแสงสีในแสงสีขาวที่ส่องผ่านมายังสายตาเห็นเป็นสีพลอย

ช่วงคลื่นแสงที่เข้าไบนั้นจะแบ่งออกเป็น ช่วงคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนไว้ (selective absorption) และช่วงคลื่นแสงที่ปล่อยออกมา (selective transmission) สีของพลอยนั้นอาจจะมีสีเดียวสม่ำเสมอทั้งเม็ด (regular color) สีเดียวไม่สม่ำเสมอ (Irregular color) หรืออาจมีแถบสีเข้มสลับสีอ่อน (Color banding) บางครั้งเป็นโซนสีเข้มสลับอ่อน เรียก โซนสี (Color zoning)

(ข) ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดกลืนแสงในพลอย

ชนิดของไอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดสีในพลอย เนื่องจากภายในโครงสร้างพลอยจะมีอะตอมของธาตุบางชนิดซึ่งเป็นธาตุที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า chromophores หรือ dispersed metal ions ซึ่งได้แก่ ธาตุโลหะ 8 ชนิด (Transition elements) ได้แก่

- โครเมียม (Chromium) ให้สีแดงในทับทิม (Ruby) และสปิเนล (Spinel) สีเขียวในมรกต (Emerald) และ หยกเจไดต์ (Jadeite)
- เหล็ก (Iron) ให้สีเหลืองในคริสโซเบอริล (Chrysoberyl) และซิทริน (Citrine) ให้สีฟ้า ทัวมาลีน (Tourmaline) อะความารีน (Aquamarine) สีฟ้าสปิเนล (Spinel) และสีแดงในการ์เนทอัลมานไดน์ (Almandite Garnet)
- แมงกานีส (Manganese) เป็นธาตุที่พบได้ทั้งพลอยประเภทอิดิโอโครเมติก (Idiochromatic) และประเภทอัลโลโครเมติก (Allochromatic) โดยให้สีชมพูในโรโดโครไซต์ (Rhodocrosite) และโรโดไนท์ (Rhodonite) มอร์แกนไนท์ (Morganite) และ कुนไซต์ (Kunzite) สีส้มในการ์เนทสเปสซาร์ไทน์ (Spessartite Garnet)
- ทองแดง (Copper) พบในพลอยประเภทอิดิโอโครเมติก (Idiochromatic) เท่านั้น โดยให้สีฟ้าในคริสโซโคลลา (Chrysocolla) เทอร์ควอยซ์ (Turquoise) และอะซูไรท์ (Azurite) สีเขียวในมาลาไคท์ (Malachite)
- นิกเกิล (Nickel) โดยทั่วไปแล้วมักไม่พบในพลอย โดยจะให้สีเขียวในคริสโซเพรส (Chrysoprase) และเพรสโอปอล (Prase Opal) ส่วนใหญ่จะพบการใช้ในการให้สีแก่พลอยสังเคราะห์ เช่น แซปไฟร์สังเคราะห์สีเหลือง เป็นต้น
- วานาเดียม (Vanadium) ให้สีเขียวในเบอริล (Beryl) กรอสซูลาไรท์ (Grossularite) ซาโวไรท์ (Tsavorite) อเล็กซานไดรท์ คล้ายแซปไฟร์สังเคราะห์ (Synthetic Zalexandrite-like Sapphire) และ ซอยไซต์ (Zoisite)
- ไทเทเนียม (Titanium) เป็นธาตุที่จะพบร่วมกับธาตุเหล็ก (Iron) ในบางครั้ง โดยให้สีน้ำเงินในแซปไฟร์ (Sapphire) และเบนิทอยท์ (Benitoite)
- โคบอลต์ (Cobalt) เป็นธาตุที่พบในธรรมชาติได้น้อยมาก แต่นิยมใช้ให้สีในพลอยสังเคราะห์ และพลอยเลียนแบบ โดยให้สีน้ำเงินในสปิเนลสังเคราะห์ (Synthetic Spinel) แก้ว (Glass) ควอตซ์น้ำเงินสังเคราะห์ (Synthetic Blue Quartz)

ธาตุเหล่านี้ถึงแม้มีในปริมาณเล็กน้อย แต่เป็นสาเหตุสำคัญในการเกิดสี โดยการเกิดสีนั้นเนื่องมาจากในแต่ละชั้นพลังงาน (orbital) อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นจะมีพลังงานที่ต่างกัน เมื่อถูกกระตุ้นจากแสงที่ส่องมายังตัวพลอย จะส่งผลให้อิเล็กตรอนกระโดดจากชั้นในที่มีพลังงานต่ำ มายังชั้นนอกที่มีพลังงานสูงได้ โดยจะดูดกลืนแสงบางช่วงไว้ในขณะถูกกระตุ้นทำให้มองเห็นพลอยเป็นสีต่างๆ นอกจากนี้ชนิดของไอออนอื่นที่อยู่ใกล้กับธาตุที่ให้สี ยังส่งผล

ต่อการดูดกลืนแสงของพลอยด้วย เพราะจะส่งผลกระทบกับอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละชั้น และตำแหน่ง (coordination sites) ที่ธาตุให้สีเข้าไปอยู่ก็มีผลต่อสีของพลอยที่ปรากฏอีกด้วย ปัจจัยสำคัญคือ จำนวนประจุบวก (oxidation state) ของธาตุที่ให้สี ในคอร์ันดัมนั้นสีไม่ได้เกิดจากธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งก็คืออะลูมิเนียม (Al) แต่เกิดจากธาตุมลทิน (impurity) ที่เข้าไปแทนที่ธาตุหลักบางส่วนในปริมาณเล็กน้อย ถ้าคอร์ันดัม (สูตรเคมี Al_2O_3) บริสุทธิ์ไม่มีธาตุอื่นเลยจะใส ไม่มีสี แต่ถ้ามีธาตุอื่นมาเจือปนจะทำให้มีสีเกิดขึ้น ในกรณีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน (blue sapphire) ดังได้กล่าวแล้วนั้น เกิดจากมีธาตุเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เข้าแทนที่ Al^{3+} ทำให้มีสีน้ำเงินเกิดขึ้น

(ค) ความเข้มของสีและโทนสี

ความเข้มของสี (Saturation or intensity) คือ ความเข้มของสีว่ามีมากน้อยเพียงใด เช่น ในแซปไฟร์สีน้ำเงิน มีสีน้ำเงินอ่อนไปจนถึงสีน้ำเงินเข้ม ส่วนโทนสี คือ ความสว่างของสีว่ามีมากน้อยเท่าไร บ่งบอกว่าสีนั้นมีสีดำน้อยหรือมากหรือไม่ ในแซปไฟร์สีน้ำเงินหากมีสีน้ำเงินมืด แสดงถึงการมีสีน้ำเงินอมดำมาก ตรงข้ามกับน้ำเงินสว่างที่เป็นสีน้ำเงินเพียวๆ ไม่มีสีดำปน ซึ่งในการศึกษาจะทำการเทียบสีของพลอยตัวอย่างก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ โดยจะมีการเปรียบเทียบสี ความเข้มสี และโทนสี ด้วยชุดประเมินคุณภาพสีพลอยตามมาตรฐานของสถาบัน Gemological Institute of America (GIA) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงคุณภาพสีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน โดยใช้ค่าที่อ่านได้จากการเทียบสีเป็นรหัสสี เช่น B 6/5 , vB 8/3 เป็นต้น

ชุดประเมินคุณภาพสีพลอย (รูปที่ 2-9) ประกอบด้วยแท่งพลาสติกหลายเฉดสี มีองค์ประกอบของสี 3 ส่วน คือ สีหลัก (hue) ความสว่างหรือความมืดของสี (tone) และความเข้มหรือความอึดตัวของสี (saturation) แตกต่างกันไปในแต่ละแท่ง การประเมินคุณภาพสีทำได้โดยการศึกษาองค์ประกอบของสีทั้ง 3 ส่วน เป็นตัวกำหนดลักษณะของสี ซึ่งสามารถจำแนกเฉดสีที่ตามองเห็นได้ออกเป็น 31 สี ความสว่าง 10 ระดับ ความอึดตัวของสี 6 ระดับ โดยใช้รหัสตัวอักษรและตัวเลขแสดงคุณลักษณะของสีดังต่อไปนี้

สีหลัก (Hue) เฉดสีที่ตาสามารถมองเห็นได้มี 31 เฉดสี มีตัวย่อกำกับ ดังนี้

Hue	ตัวย่อ	Hue	ตัวย่อ
Purple	P	yellowish Green	yG
reddish Purple	rP	slightly yellowish Green	slyG
Purple-Red or Red-Purple	PR/RP	Green	G
strongly purplish Red	stpR	very slightly bluish Green	vslbG
slightly purplish Red	slpR	bluish Green	bG
Red	R	very strongly bluish Green	vstbG
orangy Red	oR	Green-Blue or Blue-Green	GB/BG
Red-Orange or Orange-Red	RO/OR	very strongly greenish Blue	vstgB
reddish Orange	rO	greenish Blue	gB
Orange	O	very slightly greenish Blue	vslgB
yellowish Orange	yO	Blue	B
orangy Yellow	oY	violetish Blue	vB

Yellow	Y	bluish Violet	bV
greenish Yellow	gY	Violet	V
Yellow-Green or Green-Yellow	YG/GY	bluish Purple	bP
strongly yellowish Green	styG		
Exception			
Pink	Pk		
Brown	Br		

ความสว่างหรือความมืด (Tone) GIA ได้แบ่งระดับความสว่างหรือความมืดเป็น 10 ระดับ ดังนี้

Tone	ตัวอย่าง
0 colourless or white	c (w)
1 extremely light	exl
2 very light	vl
3 light	l
4 medium light	ml
5 medium	m
6 medium dark	mdk
7 dark	dk
8 very dark	vdk
9 extremely dark	exd
10 black	bl

ความเข้มหรือความอืดตัว (Saturation) หมายถึง ความเข้มของสีหลัก จำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ สีเย็น (cool hue) คือ สีที่มองแล้วสบายตา ได้แก่ กลุ่มของสีน้ำเงิน สีน้ำเงินถึงสีเขียว และสีม่วง โดยการมีสีเทาจะทำให้ความเจิดจ้าหรือความสดใสของสีพลอยต่ำลง และสีร้อน (warm hue): สีที่อยู่ในโทนร้อน ได้แก่ กลุ่มของสีส้ม สีแดง และสีเหลือง โดยการมีสีน้ำตาลมาก จะทำให้ความเจิดจ้าหรือความสดใสของสีพลอยต่ำลง ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มสามารถแบ่งความเข้มหรือความอืดตัวของสีได้เป็น 6 ระดับ ดังนี้

Saturation	ตัวอย่าง
1 grayish (brownish)	gr (br)
2 slightly grayish (brownish)	slgr (slbr)

3	very slightly grayish (brownish)	vslgr (vslbr)
4	moderately strong	mst
5	strong	st
6	vivid	v



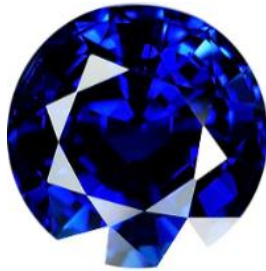
รูปที่ 2-9 ชุดประเมินคุณภาพสีพลอยตามมาตรฐานของสถาบัน Gemological Institute of America (GIA)

(ง) ประกาย หรือ ความวาว (Luster)

เป็นปริมาณและคุณภาพของแสงที่สะท้อนจากผิวพลอย สามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ คือ ประกายแบบโลหะ (metallic luster) และประกายแบบไม่ใช่โลหะ (non-metallic luster) แต่จะมีพลอยบางชนิดมีลักษณะระหว่าง 2 แบบเรียกว่า ประกายกึ่งโลหะ (sub-metallic luster) ซึ่งพลอยส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มนี้ นอกจากนี้ ยังแบ่งประกายเป็นลักษณะย่อยๆ ได้ดังนี้

- ประกายแบบเพชร (adamantine) แสดงประกายสูงสุดของอัญมณี พลอยในกลุ่มนี้มีดัชนีการหักเหที่สูง ได้แก่ เพชร
- ประกายแบบกึ่งเพชร (sub-adamantine) ลักษณะประกายอยู่ระหว่างเพชรกับแก้ว ได้แก่ เพทาย คอรัันดัม
- ประกายแบบแก้ว (vitreous) เป็นประกายที่พบได้ในพลอยทั่วไป โดยเฉพาะพลอยโปร่งแสง ได้แก่ คอรัันดัม ควอตซ์ โทพาส ทัวร์มา린
- ประกายแบบไหม (silky) ลักษณะเหมือนผ้าไหม มีมลทินภายในเหมือนเส้นใยขนานกัน ประกายเกิดจากแสงของพลอยที่มีโครงสร้างเป็นแถบขนานกัน (parallel fibers) ได้แก่ คตไม้สักเสื่อ (Tiger's eye quartz)
- ประกายแบบยางสน (resinous) ลักษณะคล้ายยางไม้ ได้แก่ อำพัน
- ประกายแบบมุก (pearly) ลักษณะประกายเหมือนเปลือกหอยมุก ไข่มุก
- ประกายแบบน้ำมัน (greasy) ลักษณะคล้ายทาด้วยน้ำมัน ได้แก่ หยกเนฟไฟรต์ (Neph) และพลอยที่เนื้อเป็นเม็ดแร่ที่เกาะกันเป็นกลุ่ม (aggregate)
- ประกายแบบขี้ผึ้ง (waxy) เป็นประกายคล้ายเทียน หรือเล็บ เช่น โมรา (Chrysoprase)

ในกรณีของแซปไฟร์สีน้ำเงิน จะมีลักษณะประกายแบบกึ่งเพชรจนถึงแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งพลอยส่วนใหญ่จะมีประกายแบบนี้



รูปที่ 2-10 ลักษณะประกายของแซปไฟร์สีน้ำเงิน ซึ่งจะเป็นประกายแบบกึ่งเพชรถึงแก้ว

(จ) ความโปร่งใส (Transparency)

เป็นปริมาณแสงที่ผ่านพลอย ขึ้นกับปริมาณที่สะท้อนกลับ ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน และปริมาณแสงที่กระจัดกระจายเมื่อผ่านตัวพลอย มีหลายแบบ ได้แก่

- โปร่งใส (transparent) แสงผ่านพลอยได้มาก ดูใส เมื่อแสงส่องผ่านมองเห็นวัตถุชั้นล่างได้ชัดเจน เช่น โทแพซ
- กึ่งโปร่งใส (semitransparent) ยังมองเห็นพลอยค่อนข้างใส เมื่อแสงส่องผ่านมองเห็นวัตถุได้ แต่ไม่ชัดเจน
- โปร่งแสง (translucent) ดูพลอยลักษณะมีดมัว แต่แสงยังพอส่องผ่านได้ ไม่สามารถบอกวัตถุด้านล่างได้ เช่น jadeite
- กึ่งโปร่งแสง (semi translucent) แสงจะผ่านเฉพาะขอบของพลอย เช่น aventurine quartz
- ทึบแสง (opaque) แสงผ่านพลอยไม่ได้เลย เช่น turquoise และ malachite

ในกรณีของแซปไฟร์สีน้ำเงินนั้นจะมีความโปร่งใสหลายระดับด้วยกัน โดยจะมีความโปร่งใสในลักษณะโปร่งใส ถึง กึ่งโปร่งแสง

(ฉ) การเรืองแสง (Luminescence หรือ Fluorescence)

ทดสอบโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (UV) 2 ช่วง คือ คลื่นยาว (long-wave) หรือ LWUV ที่ 365.4 นาโนเมตร และช่วงคลื่นสั้น (short-wave) หรือ SWUV ที่ 253.7 นาโนเมตร ในแซปไฟร์สีน้ำเงินเมื่อนำไปทดสอบ มักไม่เรืองแสงทั้ง 2 ช่วงคลื่น

(ช) ค่าดัชนีหักเห (Refractive Index)

ค่าดัชนีหักเห เป็นค่าอัตราส่วนความเร็วของแสงในอากาศต่อความเร็วของแสงในพลอย แสดงในรูปไซน์ของมุมตกกระทบต่อค่าไซน์ของมุมหักเห ค่าดัชนีหักเหวัดได้จากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (Refractometer)

(ซ) การกระจายแสง (Dispersion)

ค่ากระจายแสง เป็นค่าแสดงความแตกต่างของค่าดัชนีหักเหเมื่อวัดด้วยแสงสีแดง (มีความยาวคลื่นยาวที่สุดในบรรดาแสงที่ตามองเห็น เดินทางได้เร็วที่สุด และมีค่าหักเห่น้อยที่สุด) และแสงสีม่วง (มีความยาวคลื่นสั้นที่สุดในบรรดาแสงที่ตามองเห็น เดินทางได้ช้าที่สุด และมีค่าหักเหมากที่สุด) การกระจายแสงจะส่งผลต่อความแวววาว ยิ่งค่าสูงความแวววาวจะมากตามไปด้วย ในทางปฏิบัติไม่สามารถวัดการกระจายแสงได้โดยตรง แต่สามารถสังเกตจากความแวววาวในการคาดคะเนได้

(ณ) การหักเหของแสง (Refraction)

คอร์รันดัมนี้เป็นพลอยที่มีรูปผลึกในระบบ hexagonal จะมีแนวแกนแสงที่ไม่แยกเดินทาง (vibrate) เป็น 2 ระนาบอยู่ 1 แกน เรียกว่า แกนแสง (optic axis) ซึ่งเป็นแนวเดียวกับแนวแกน c ของผลึก และเรียกพลอยเหล่านี้ว่าเป็น ยูนิแอกเซียล (uniaxial) ลำแสงที่เคลื่อนตัวในแนวราบ เรียกว่า ordinary ray หรือ o-ray ส่วนลำแสงที่เคลื่อนตัวในแนวตั้งฉาก เรียกว่า extraordinary ray หรือ e-ray ลำแสงทั้งสองทิศทางต่างเดินทางด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน จึงเกิดการหักเหไม่เท่ากัน ทำให้เกิดค่าดัชนีหักเห 2 ค่า ค่าที่สัมพันธ์กับ o-ray เรียกว่า ω (omega) และค่าที่สัมพันธ์กับ e-ray เรียกว่า ϵ (epsilon) โดยค่าดัชนีหักเหที่สัมพันธ์กับ o-ray จะมีค่าเท่ากันทุกทิศทางในผลึก แต่ค่าดัชนีหักเหที่สัมพันธ์กับ e-ray จะเปลี่ยนไปตามทิศทางต่างๆ ในผลึก โดยถ้า ϵ มีค่าสูงกว่า ω แสดงว่าพลอยเป็นแกนแสงบวก (positive optic sign) แต่ถ้า ϵ มีค่าต่ำกว่า ω แสดงว่าเป็นแกนแสงลบ (negative optic sign) ค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหทั้ง 2 ค่านี้เรียกว่าไบรีฟริงเจนส์ (birefringence) พลอยที่เป็น anisotropic ทุกชนิดมีค่า birefringence เฉพาะตัว แต่อาจซ้ำกับพลอยชนิดอื่นได้ เช่น คอร์รันดัมมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า คือ 1.762 และ 1.770 ส่วน โทแพซ ซึ่งมีค่าดัชนีหักเห 2 ค่า คือ 1.619 และ 1.627 แต่ต่างมีค่า birefringence เท่ากัน คือ 0.008

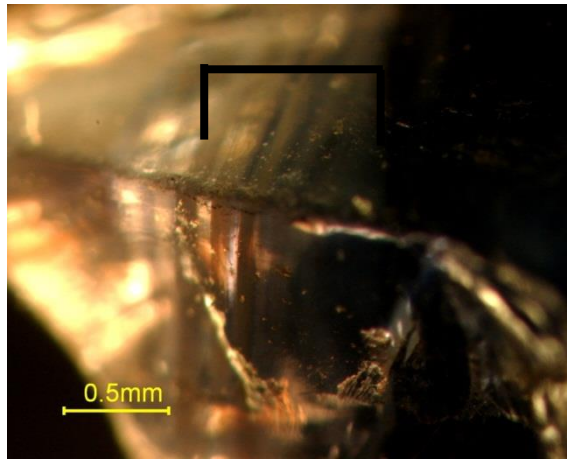
สำหรับการหาค่า birefringence เป็นค่าตัวเลขที่ถูกต้อง หาได้โดยใช้ refractometer โดยพลอยที่มีค่า birefringence สูง เช่น เซอร์คอน (ค่า birefringence สูงถึง 0.059) หรือ peridot (0.036) เมื่อมองดูจากด้านหน้าด้านบน (table) ลงไป จะเห็นขอบที่หน้าเจียรระนาบมาชนกัน มีลักษณะเป็นเส้นซ้อนกัน 2 เส้น (doubling) ที่บริเวณหน้าเจียรระนาบด้านล่าง (pavilion) ดังรูปที่ 2-11 แต่อาจไม่เห็นในทุกเม็ด ขึ้นกับทิศทางของการตั้งหน้าเจียรระนาบ การตรวจสอบว่าพลอยมีการหักเหแสงแบบใดสามารถทำได้โดยใช้เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) และโพลาริสโคป (polariscop) จากการทดสอบคอร์รันดัมทั่วไป พบว่าค่าดัชนีหักเห (Refractive index) จะมี 2 ค่าคือ $\omega = 1.770$ และ $\epsilon = 1.762$ (+0.009 ถึง -0.005)



รูปที่ 2-11 ลักษณะของ doubling ในพลอย

2.1.5 มลทินภายใน (Inclusions)

มลทิน หรือ inclusions คือ แร่ที่มีขนาดเล็กอยู่ภายในเนื้อพลอย เป็นอีกสาเหตุในการเกิดสี ในคอร์ันดัมพวกแซปไฟร์สีน้ำเงินนั้น มลทินภายในมีลักษณะเป็นแถบสี (color zoning) ดังแสดงในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2-12 แถบสี (color zoning) ในแซปไฟร์สีน้ำเงิน

พลอยชนิดต่างๆที่เกิดตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีสิ่งเจือปนที่เรียกว่า “หม่า” ในภาษาอังกฤษ เรียกว่า “อินคลูชัน (inclusion)” ฝังอยู่ในเนื้อพลอย [7] ในทางธรณีวิทยาแบ่งออกเป็นสามประเภทคือ อินคลูชันที่เป็นของแข็ง เช่น แร่ที่เป็นสารประกอบต่างๆ เช่น แร่อะพาไทต์ [Apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})_2$] แร่อัลแมนดิน (Almandine, $\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) และแร่ไพไรโรไทต์ (Pyrrhotite) ในพลอยสกุลคอร์ันดัมที่พบในประเทศไทย อินคลูชันที่เป็นของเหลว มักจะเป็นน้ำบริสุทธิ์หรือน้ำที่ละลายเกลือบางชนิด เช่น NaCl , NH_4Cl โดยมีรูปทรงต่าง ๆ กัน เช่น เป็นรูปไข่ หรือออกเป็นแขนงคล้ายกิ่งไม้ หรือ เป็นรูปขนนก อินคลูชันที่เป็นก๊าซ มักเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีลักษณะเป็นฟองอากาศที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน

พลอยที่มีอินคลูชันมาก จะทำให้ขุนมัว ไม่สวยงาม การให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหมาะสม อาจทำให้อินคลูชันสลายตัวไป โดยเฉพาะอินคลูชันที่เป็นของเหลวและก๊าซ ความร้อนจะทำให้เป็นไอระเหยออกตามรอยแตก ทำให้พลอยโปร่งใสขึ้น ส่วนอินคลูชันที่เป็นของแข็ง การเผาอาจทำให้กระจายตัวออก แต่ก็ไม่ช่วยทำให้พลอยสดใสขึ้นมากนัก แต่ในบางกรณีอินคลูชันของแข็งที่เป็นผง กระจัดกระจายอยู่ในเนื้อพลอยบางบริเวณ ทำให้เห็นเป็นสีเข้มเกินไป การให้ความร้อนจะทำให้บริเวณที่เป็นสีเข้มมีความโปร่งใสมากขึ้น เช่นผงแร่ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) หรือโครไมต์ (Chromite, FeCr_2O_4) ในพลอยสกุลคอร์ันดัม เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1500-1700 °C ทำให้ผลเหล่านี้สลายตัว ไอออน Fe^{2+} หรือ Cr^{3+} ที่เป็นองค์ประกอบของอินคลูชัน สามารถแพร่เข้าไปแทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของพลอย ทำให้พลอยมีความโปร่งใสมากขึ้น เปลี่ยนจากสีเข้มเป็นสีจางลง หรือเปลี่ยนจากสีจางเป็นสีเข้มขึ้น การที่พลอยต่างๆมีสีได้นั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของพลอยมีไอออนของธาตุทรานซิชัน เช่น Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{4+} , Zr^{4+} หรือมีไอออนของธาตุในกลุ่มชาโคเจนไนด์ (Chalcogenide) เช่น S^{2-} และ Se^{2-} ถ้าธาตุทำให้เกิดสีเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่จะขาดไม่ได้ (แร่ประกอบหินที่จำเป็น) เช่น โกเมนประเภทอัลแมนดิน ($\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) และพลอยมาลาไคต์ ($\text{CuCO}_3 \cdot (\text{OH})_2$) สีของพลอยพวกนี้ยากที่จะเผาให้สีเปลี่ยนแปลงได้ แต่พลอยบางชนิดหากบริสุทธิ์แล้วจะโปร่งใส ไม่มีสี แต่ที่พบเห็นสีได้เพราะมีธาตุที่ทำให้เกิดสีแทรกอยู่ในโครงสร้างของโครงสร้างผลึก เช่น พลอยทับทิม (Al_2O_3) มีสีแดงเพราะมี Cr^{3+} มรกต ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) มีสีเขียวเพราะมี Cr^{3+} สีของพลอยที่มีธาตุแทรกอยู่ในโครงสร้างในลักษณะนี้ สามารถ

เผาให้สีเข้มขึ้นหรือจางลงได้ เมื่อเผาในภาวะที่เหมาะสม นอกจากนั้นการเปลี่ยนจากสีหนึ่งเป็นอีกสีหนึ่ง พลอยบางชนิดที่มีสีสันไม่เป็นที่ต้องการ สามารถนำมาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อให้เปลี่ยนสีให้เป็นสีที่ถูกต้องได้ กลไกที่ทำให้พลอยเปลี่ยนสี สันนิษฐานว่าเกิดได้ 2 ลักษณะคือ โดยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้เกิดการแพร่ของออกซิเจน (diffusion of oxygen gas) ในโครงสร้างของพลอยสกุคอรันดัมที่มี Cr^{3+} , Fe^{3+} หรือ Fe^{2+} แทนที่ Al^{3+} ในกรณีที่ Cr^{3+} แทรกอยู่ทำให้พลอยมีสีแดงคือทับทิม แต่ในกรณีที่ Fe^{2+} แทรกอยู่พลอยจะไม่มีสี เมื่อนำมาเผาในบรรยากาศของออกซิเจนเป็นเวลานานพอสมควร เชื่อว่าจะมีอะตอมของออกซิเจนแทรกเข้าไปในเนื้อพลอย และทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน โดยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transferation) ในพลอยสกุคอรันดัม ที่มี Ti^{4+} และ Fe^{2+} แทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของ Al_2O_3 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่าง Ti^{4+} และ Fe^{2+} จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกที่ล้อมรอบ Ti^{3+} และ Fe^{3+} ส่งผลให้เกิดสีน้ำเงิน ไอออนของธาตุไทเทเนียม (Ti^{4+}) เข้าแทนที่ (substitutional) Al^{3+} ในโครงสร้างของ Al_2O_3 เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 800-1500 °C เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้ไอออนของธาตุไทเทเนียมแยกตัวออกมา ทำปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุออกซิเจน กลายเป็น TiO_2 หากมีอะตอมของธาตุไทเทเนียมมากพอ ทำให้ TiO_2 ที่เกิดขึ้นรวมตัวกันเป็นผลึก ที่มีลักษณะเป็นรูปเข็ม แทรกอยู่ระหว่างเส้นแบ่งครีงของรูปผลึกของพลอยสกุคอรันดัม ในธรรมชาติพลอยแต่ละชนิดจะมีไอออนของธาตุที่ทำให้เกิดสีหลายชนิดแทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้พลอยที่ผ่านการเผา อาจจะมีสีและความเข้มแตกต่างกันออกไป [5]

2.1.6 แหล่งแซปไฟร์สีน้ำเงิน

แหล่งแซปไฟร์สีน้ำเงินในปัจจุบันมีค่อนข้างที่จะหลากหลาย พบได้ทั่วโลกในลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกัน แซปไฟร์สีน้ำเงินในแต่ละแหล่งนั้นจะมีลักษณะทางกายภาพได้แก่ สี มลทิน ความวาว ที่แตกต่างกันออกไป และมีคุณสมบัติทางเคมี อาทิ ธาตุองค์ประกอบที่เฉพาะตัวที่ต่างกัน ขึ้นกับกระบวนการเกิดของพลอย แหล่งแซปไฟร์สีน้ำเงินพอสรุปได้ดังนี้

(ก) แหล่งพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินในต่างประเทศ

พบทั้งในภูมิภาคเอเชีย ออสเตรเลีย แอฟริกา และอเมริกา ตัวอย่างแหล่งพลอยแซปไฟร์ที่น่าสนใจ มีดังนี้

- แซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์ (Kashmir)

แคชเมียร์อยู่ทางภาคเหนือของอินเดีย เป็นแหล่งกำเนิดแซปไฟร์สีน้ำเงินที่สวยงามที่สุดในโลกแห่งหนึ่ง มีสีคล้ายสีน้ำเงินดอกข้าวโพด (Cornflower Blue) คล้ายกับมะหยี่สีน้ำเงินอมม่วง ซึ่งเป็นที่นิยมกันมากที่สุด มีโทนสีมืดปานกลาง แต่พลอยจากแคชเมียร์มีลักษณะขุ่น (Sleepy) ไม่โปร่งใสเท่าที่ควร เพราะมีเส้นไหม (Silks) จำนวนมากเป็นตำหนิอยู่ภายใน ซึ่งผิดกับแซปไฟร์จากแหล่งอื่นๆ ตามประวัติศาสตร์ แซปไฟร์ (Sapphire) เริ่มมาจากอินเดียถึงแม้ว่าจะมีเหมืองอยู่บ้าง แต่เนื่องจากสิ่งแวดล้อมและสภาวะทางการเมืองทำให้ต้องปิดเหมืองไปในที่สุด

- แซปไฟร์สีน้ำเงินพม่า

แซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งพม่า จัดว่ามีสีสวยงามมากเช่นกัน คุณภาพแซปไฟร์สีน้ำเงินของพม่านี้ ใช้เป็นตัวชี้วัดระดับคุณภาพแซปไฟร์สีน้ำเงินในการซื้อขายในอเมริกา สีที่สวยงามของแซปไฟร์สีน้ำเงินพม่า คือ สีน้ำ

เงินเข้มอมม่วงเล็กน้อย มีโทนสีมืดปานกลางเช่นเดียวกับแซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์ แต่ไม่มีความนุ่มนวลเหมือนกำมะหยี่ มีสีน้ำเงินเข้มที่เรียกว่า สีรอยแยบลู (Royal blue) สีน้ำเงินของแซปไฟร์สีน้ำเงินพมานี้จัดเป็นสีน้ำเงินที่สวยงาม แต่จะขาดความสุกใส ประกายมีชีวิตชีวาไปเล็กน้อย แซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งไทย ศรีลังกา เขมร ก็มีสีแบบนี้ได้เช่นกัน ข้อแตกต่างของแซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์และแซปไฟร์สีน้ำเงินพมา คือ แซปไฟร์สีน้ำเงินพมาไม่มีลักษณะเนื้อนุ่มนวลแบบกำมะหยี่เหมือนแซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์

- แซปไฟร์สีน้ำเงินกัมพูชา

กัมพูชาเป็นแหล่งที่มีแซปไฟร์สีน้ำเงินสวยที่สุดในโลกอีกแห่งหนึ่ง สีน้ำเงินของแซปไฟร์สีน้ำเงินเขมรจะคล้ายกับของแคชเมียร์ แต่เนื่องจากเหตุผลทางการเมืองทำให้แซปไฟร์สีน้ำเงินกัมพูชามีไม่มาก ในตลาดเหมืองที่ขุดแซปไฟร์สีน้ำเงินได้ชื่อ "บ่อโพลิน" จึงใช้ชื่อนี้ เรียกพลอยคอร์นดัมสีน้ำเงินที่มาจากกัมพูชาตามชื่อแหล่ง ตลาดแซปไฟร์สีน้ำเงินที่สำคัญคือจังหวัดจันทบุรี เพราะอยู่ใกล้ชายแดนติดกับประเทศกัมพูชา

- แซปไฟร์สีน้ำเงินซีลอน (ประเทศศรีลังกา)

ซีลอนเป็นแหล่งของแซปไฟร์สีน้ำเงินที่อยู่ในประเทศศรีลังกา เป็นแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มีลักษณะเด่น คือ มีสีไม่สม่ำเสมอ สีพลอยออกเทาน้ำเงิน จัดเป็นสีน้ำเงินที่สวยงาม มีประกายมีชีวิตชีวา เป็นสีน้ำเงินที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าแซปไฟร์สีน้ำเงินพมา การที่แซปไฟร์สีน้ำเงินซีลอนมีโทนสีอ่อนกว่าแซปไฟร์สีน้ำเงินพมา ทำให้ดูสุกใสมีประกายกว่า และอาจพบสีที่พบสวยใกล้เคียงกับแซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์ได้ แซปไฟร์สีน้ำเงินซีลอนได้จากพลอยก้อนสีขาวขุ่นเหมือนนํ้านม มีจุดสีน้ำเงินอยู่ในเนื้อ เมื่อนำไปเผาจะให้พลอยสีน้ำเงินทั้งสวยและไม่สวย ที่สวยก็นำมาขายเป็นแซปไฟร์สีน้ำเงินซีลอน ส่วนที่เผาแล้วไม่สวย ก็จะได้เป็นสีฟ้าอ่อนใส หรือขาว ซึ่งไม่ค่อยมีราคานัก เรียกตามภาษาชาวบ้านว่า แซปไฟร์สีน้ำเงินซีลอนเผาไม่ออก โดยแหล่งซีลอนเป็นแหล่งกำเนิดของแซปไฟร์สีน้ำเงินสีต่างๆ หลายสี ส่วนมากจะเป็นสีน้ำเงินอมเทาอ่อนๆ ถึงน้ำเงินอมม่วง เป็นพลอยที่มีไฟดีมาก

- แซปไฟร์สีน้ำเงินออสเตรเลีย

ปกติมีสีน้ำเงินมืด คล้ายน้ำหมึก เป็นสีน้ำเงินอมเขียวเข้ม ถึงสีน้ำเงินอมม่วงมืด ลักษณะเด่นชัด คือ โทนสีมืด มีแถบสี หรือลายสีชัด ส่วนมากพลอยสีมืดจะถูกส่งมาประเทศไทยเพื่อจัดการเผาสีให้จางลง มีสีน้ำเงินมืดสนิทกว่าแซปไฟร์สีน้ำเงินไทย หรือคล้ายแซปไฟร์สีน้ำเงินไทย แต่ไม่มีลักษณะเนื้อกำมะหยี่ปนอยู่เลย

- แซปไฟร์สีน้ำเงินแอฟริกา

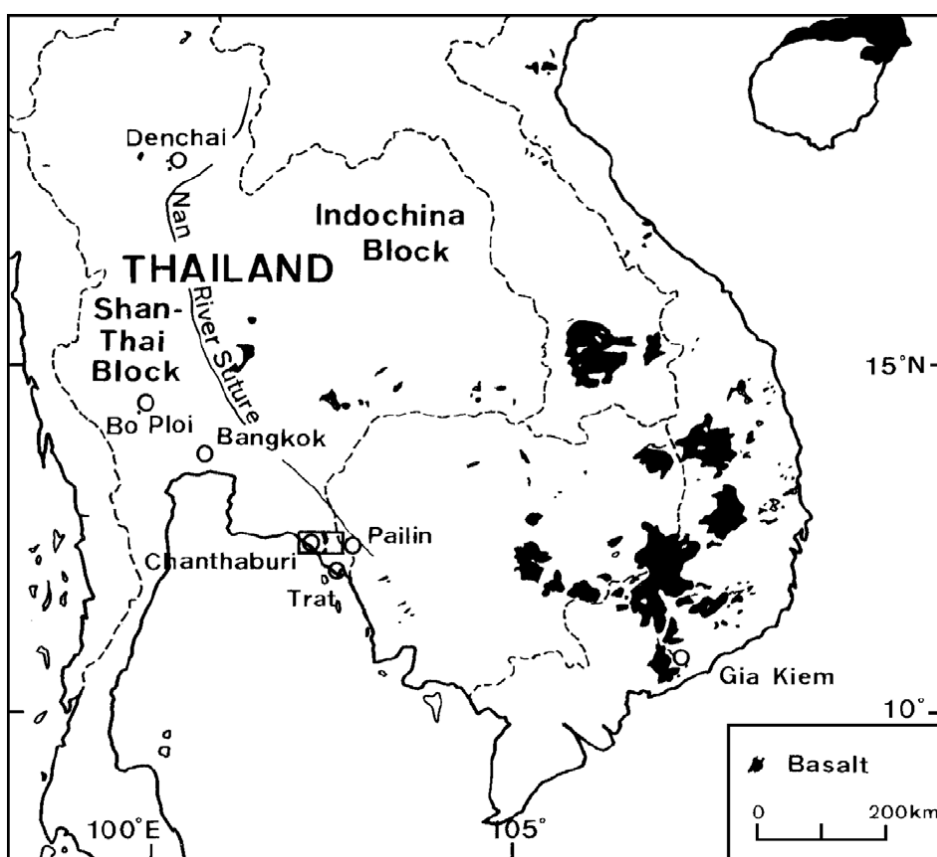
มีสีคล้ายสีดินสอเทียน (Pastel) คือ สีน้ำเงินอ่อนๆ น้ำเงินม่วง แดงม่วง เหลืองอ่อน ส้มอ่อน เทา และส้มอมน้ำตาลมืด บางชนิดอาจเปลี่ยนสีคล้ายอเล็กซานดรา คือ จากสีน้ำเงินเทา-ในแสงแดดเป็นสีเขียวหรือม่วงในแสงไฟ

- แซปไฟร์สีน้ำเงินมอนทานา

แซปไฟร์จากเหมืองโยโกเกาซ์ (Yogo Gluch) เมืองมอนทานา ประเทศสหรัฐอเมริกา ส่วนมากจะมีสีอ่อน มักจะเรียกกันว่าสีน้ำเงินไฟฟ้าหรือน้ำเงินแบบเหล็ก (Steel Blue) มีความวาวแบบโลหะ คุณภาพไม่ได้จัดอยู่ในระดับดี เพราะพลอยดิบส่วนมากที่ขุดได้จะมีลักษณะชิ้นเล็กๆ เป็นรูปหกเหลี่ยมของผลึกเฮกแซโกนัล (Hexagonal)

(ข) แหล่งพลอยคอร์นดัมในประเทศไทย

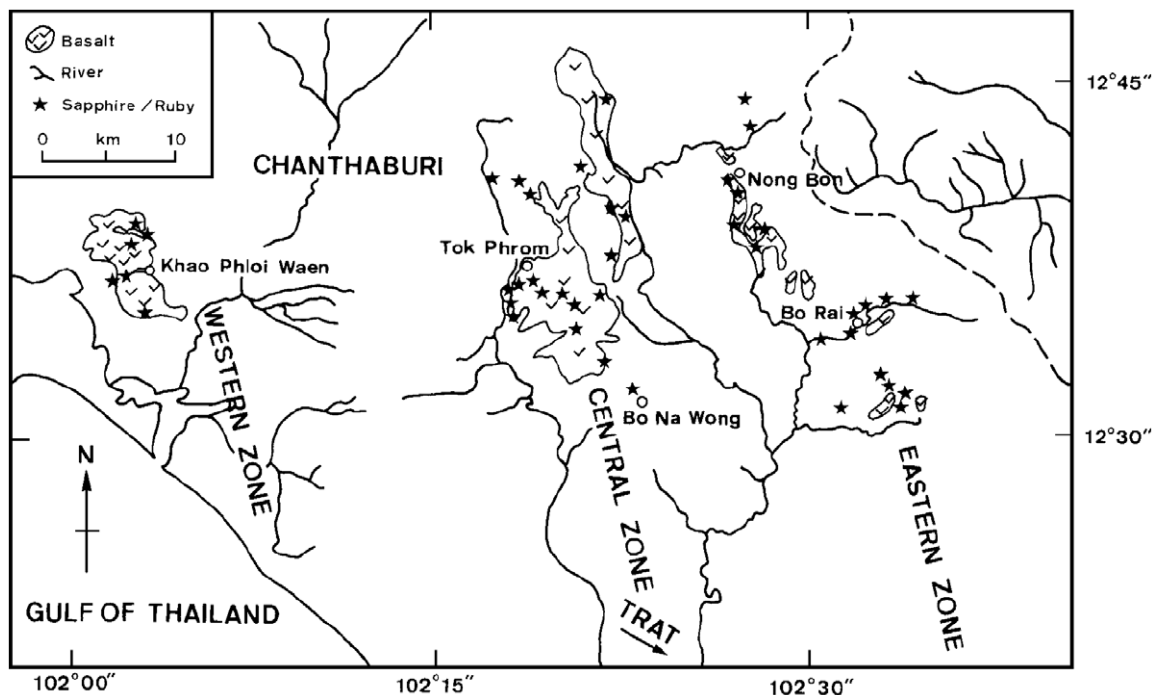
จากการศึกษาทางธรณีวิทยา พบว่า การเกิดคอร์นดัมในประเทศไทยมักเกิดร่วมกับหินบะซอลต์ (Basalt) รูปที่ 2-13 ได้แสดงบริเวณที่พบหินบะซอลต์ ยุค Cenozoic ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมักจะพบพลอยคอร์นดัมในบริเวณเดียวกันด้วย ในแผนที่ได้แสดงให้เห็นถึงการแบ่งภูมิภาคนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น Shan-Thai Block และ Indochina Block ซึ่งมีความแตกต่างในเรื่องของการกำเนิดของบริเวณทั้ง 2 นี้ ทำให้คุณลักษณะของหินบะซอลต์ของทั้ง 2 บริเวณนี้แตกต่างกัน องค์ประกอบของพลอยคอร์นดัมทั้ง 2 บริเวณนี้จึงแตกต่างกัน [8] ลักษณะเด่นของพลอยคอร์นดัมที่อยู่ในส่วน Shan-Thai Block คือ มีปริมาณของเหล็กเป็นธาตุร่องรอยสูง ส่งผลให้พลอยสีน้ำเงินมีสีค่อนข้างเข้มทึบ ส่วนพลอยสีแดงมีสีแดงออกม่วง รูปที่ 2-14 แสดงบริเวณแหล่งพลอยที่พบในเขตจันทบุรี-ตราด



รูปที่ 2-13 แผนที่แสดงบริเวณที่พบ basalts ยุค Cenozoic ในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมักจะพบพลอยคอร์นดัมในบริเวณเดียวกันด้วย [8]

แซปไฟร์สีน้ำเงินของไทยมีสีค่อนข้างสวย โดยเฉพาะตรงบริเวณใกล้เขตแดนไทย-กัมพูชา พบพลอยน้ำเงินที่มีคุณภาพคล้ายแซปไฟร์สีน้ำเงินแคชเมียร์ เรียกว่า "ไพลิน" (Pailin) ส่วนพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มาจาก อำเภอบ่อพลอย จังหวัดกาญจนบุรี จะเป็นแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มีคุณภาพดี มีสีค่อนข้างสวย ลักษณะโดยทั่วไปคล้ายแซปไฟร์สีน้ำเงินศรีลังกา โดยเฉพาะมีโซนสีหรือแถบสีที่เด่นชัด ส่วนใหญ่จะมีสีน้ำเงินเข้ม และมีความขุ่นขาวเป็นตำหนิปนอยู่ตามโซนสี ทำให้พลอยดูมีประกายวาวมากขึ้น แต่ถ้าลักษณะความขุ่นขาวมีมากตลอดทั่วทั้งเม็ดพลอย จะทำ

ให้พลอยนั้นดูไร้ประกายหรือด้านมัว แต่ปัจจุบันได้มีการสำรวจเพิ่มเติมพบแหล่งแซปไฟร์สีน้ำเงินเข้ม ที่แหล่งอำเภอด่นชัย จังหวัดแพร่ มีพลอยจำนวนมาก แหล่งแซปไฟร์แต่ละแหล่งมีลักษณะเด่นดังนี้



รูปที่ 2-14 แผนที่แสดงบริเวณแหล่งพลอยคอร์นดัมในบริเวณจันทบุรี-ตราด [8]

- แหล่งพลอยคอร์นดัม จากจังหวัดจันทบุรี

จังหวัดจันทบุรีเป็นจังหวัดที่มีชื่อเสียง ในด้านการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์นดัม ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยมีพลอยกระจายตัวอยู่ในหลายแหล่ง เช่น เขาพลอยแหวน เขาหัว บางกะจะ บ่อเวฬุ ที่เขาพลอยแหวน เขาหัว บางกะจะ จะพบพลอยหลายชนิด เช่น แซปไฟร์ ทับทิม บุษราคัม และสตาร์ เกิดร่วมกับเพื่อนแร่อื่นๆ เช่น การ์เน็ต เซอร์คอน สปิเนลสีดำ ไพรอกซีน เป็นต้น [9] โดยเฉพาะบุษราคัมซึ่งมีชื่อเสียงอย่างมาก เนื่องจากมีสีเหลืองที่มีลักษณะเหมือนสีสุราเมโขง มักเรียกกันติดปากว่า "บุษบางกะจะ" พลอยที่พบในพื้นที่ตำบลบางกะจะนั้น ส่วนใหญ่เป็นพลอยในตระกูลคอร์นดัม เช่น ทับทิม ไพลิน บุษราคัม เขี้ยวส่อง ไพลิน และสตาร์ โดยเกิดร่วมกับเพื่อนแรกในกลุ่มไพรอกซีน คอร์นดัมในบริเวณนี้มีคุณภาพดีและมีขนาดตั้งแต่ 1 มิลลิเมตร ถึง 5 เซนติเมตร ลักษณะเด่นของแซปไฟร์จากแหล่งบางกะจะ มักจะเป็นสีเข้มของสีเขียว เหลือง หรือน้ำเงิน หรืออาจมีหลายสีในเม็ดเดียวกัน นอกจากนั้นอาจมีรอยแตกตาม Basal Plan เนื้อพลอยมีลักษณะเป็นแถบสี มีมลทินหลายชนิด เช่น มลทินเส้นเข็ม ซึ่งมีทั้งสีขาวและสีน้ำตาล มลทินผลิกแร่ มลทินรอยนิ้วมือ เป็นต้น

- แหล่งพลอยคอร์นดัม จังหวัดกาญจนบุรี

จังหวัดกาญจนบุรีเป็นอีกจังหวัดหนึ่งในแถบภาคตะวันตกของประเทศไทย ที่มีชื่อเสียงทางด้านพลอย สถานที่ที่เป็นแหล่งสำคัญของพลอยกาญจนบุรี คือ อำเภอบ่อพลอย มีการทำเหมืองฝายพลอยให้เห็นอยู่มากมาย ภูมิประเทศของอำเภอบ่อพลอย จะอยู่ห่างจากตัวเมืองกาญจนบุรีราวๆ 48 กม. ระหว่างทางจะพบเหมืองพลอย

ตามข้างทางอยู่ทั่วไป โดยมากจะเป็นพลอยเมืองกาญจน์ชนิด พลอยไพลิน บุษราคัม และนิล จึงมีการทำเหมือง พลอยขนาดใหญ่เป็นบริเวณกว้าง [10] เนื่องจากการสะสมตัวของพลอยจะเป็นแบบทุติยภูมิ สะสมตัวในลักษณะ ลานแร่ (placer) โดยจะทำเหมืองในบริเวณที่เป็นชั้นกะสะซึ่งมีลักษณะเป็นชั้นกรวดน้ำพัดพา พลอยที่พบจะปะปน อยู่ในชั้นกรวดดังกล่าวปริมาณมาก ธรณีวิทยาของอำเภอบ่อพลอยเป็นหินบะซอลต์ประเภทแอลคาไลบะซอลต์ มีสี ดำ ลักษณะเนื้อแน่นละเอียด พบนิลฝังตัวอยู่ในหินบะซอลต์โดยรอบ อายุหินบะซอลต์ประมาณ 3.14 ± 0.17 ล้าน ปี [11] และ 4.17 ± 0.11 ล้านปี [12] พลอยที่พบในแถบอำเภอบ่อพลอย เช่น ไพลินและบุษราคัม โดยจะพบ ทั้พบน้อยมาก ในส่วนของเพื่อนแร่ที่พบจะเป็นแร่สปิเนลและไพรอกซีน ซึ่งจะเรียกรวมว่า "นิล" โดยจะพบ ปริมาณมากในบริเวณนี้ ลักษณะเด่นของพลอยไพลินจากแหล่งกาญจนบุรี ส่วนที่พบค่อนข้างมีสีน้ำเงินหลากหลาย ตั้งแต่สีอ่อนจนถึงสีเข้ม หรือสีน้ำเงินจนถึงสีเทา และมักแสดงแถบสี (color zoning) มีผลึกที่มีขนาดไม่ใหญ่นัก มี เส้นสีที่ชัดเจน เนื้อพลอยมีมลทินค่อนข้างมาก ส่วนใหญ่เป็นมลทินเส้นเข็มซึ่งมักมีสีน้ำตาลเข้ม ขนาดของพลอยที่ พบมีตั้งแต่เล็กกว่า 1 มิลลิเมตรจนถึง 2 เซนติเมตร

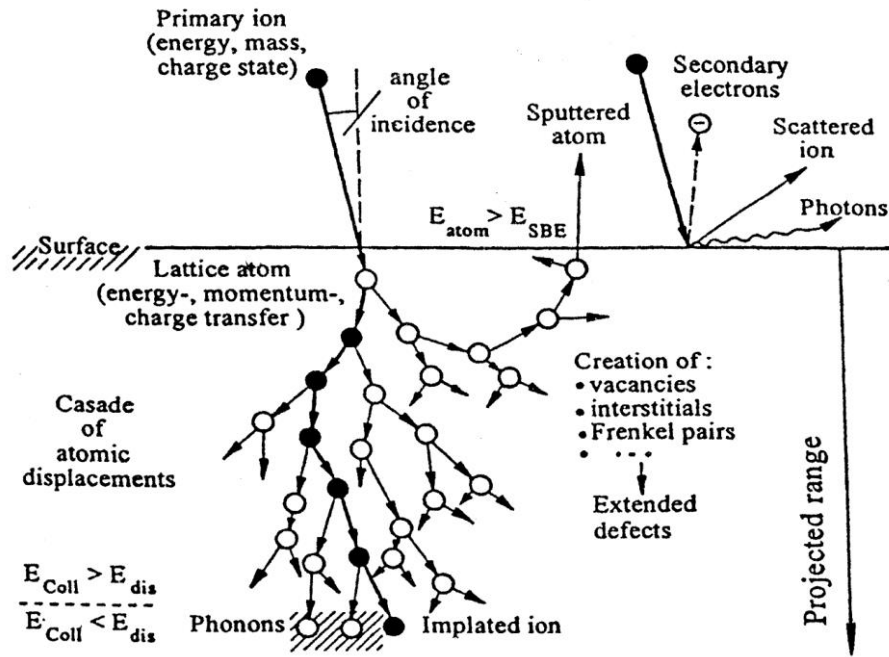
- แหล่งพลอยแซปไฟร์ จังหวัดแพร่

แหล่งคาร์บอนิฟิอัสที่จังหวัดแพร่ตั้งอยู่บริเวณอำเภอเด่นชัย ลักษณะทางธรณีของพื้นที่บริเวณนี้เป็น หินยุค Carboniferous- Permian rocks ที่ถูกทับถมด้วยหินบะซอลต์ [10] แหล่งคาร์บอนิฟิอัสที่พบในจังหวัดแพร่ทั้งหมดจะ พบในตะกอนธารน้ำเช่นพื้นที่ห้วยสีเสียด ห้วยแม่สูง คาร์บอนิฟิอัสที่พบกว่า 90% เป็นไพลินที่มีสีน้ำเงินเข้มมาก อาจ พบบุษราคัม หรือแซปไฟร์สีเขียวหรือพลอยสาหร่ายบ้าง แต่ยังพบทั้พบน้อยมาก ไพลินที่พบส่วนใหญ่ มีสีช่วงตั้งแต่สีอ่อนจนถึงน้ำเงินเข้มมาก ขนาดตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรจนถึง 1 เซนติเมตร บางครั้งพบขนาดใหญ่ 5-10 เซนติเมตร และมักพบมีสาหร่ายหรือสตร้าตาตาย (Trapiche) ลักษณะมลทินที่พบมักมีรอยแตกและมีมลทินขาว ขุ่น แร่ที่พบร่วมกันในบริเวณนี้ได้แก่ นิล ไพรอกซีน อิลเมนไนท์ โอลิวีน เซอร์คอน และอาจพบแร่ไพไรท์ร่วมด้วย [12]

2.2 เทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชันกับการปรับปรุงคุณภาพพลอยคาร์บอนิฟิอัส

2.2.1 เทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชัน

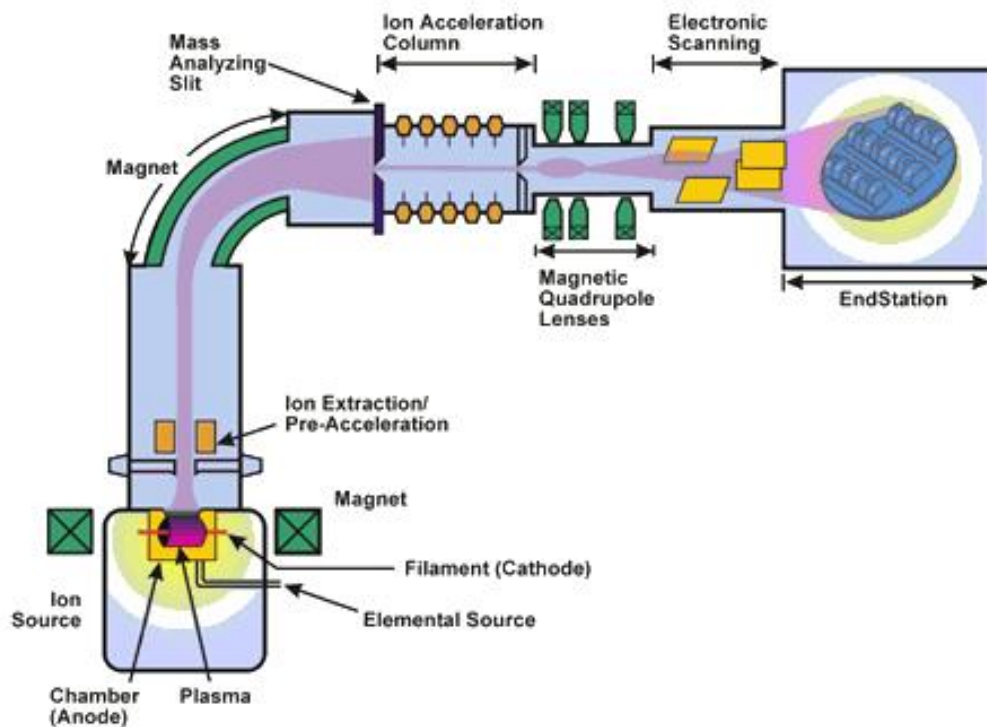
Townsend และคณะ [13] นิยามการฝังไอออน (ion implantation) ว่าเป็นการเร่งไอออนให้มีพลังงาน สูงแล้วไปชนกับเป้าที่ต้องการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ โดยไอออนจะเข้าไปทำอันตรกิริยาต่างๆกับอะตอมของเป้า ทำให้คุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์เดิมของเป้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ทำให้ผิวของวัสดุแข็งขึ้น ลดการกัด กร่อน ลดแรงเสียดทาน และเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการฝัง ไอออนนี้ จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ไม่สามารถ ย้อนกลับมาสภาพเดิมได้อีก ทั้งนี้ไอออนที่มีพลังงานสูงนี้ เมื่อถูกฝังเข้าไปในวัสดุ จะถ่ายเทพลังงานและ โมเมนตัมให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุ ทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ตำแหน่ง นั้นจึงเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมดังกล่าวอาจจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) จนเกิด เป็น defect ในบางตำแหน่ง แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะค่อยๆสูญเสียพลังงาน และจะหยุดที่ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แล้วอาจเกิดการรวมตัวกับโครงสร้างเดิม กลายเป็นโมเลกุลใหม่ ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ ตามทฤษฎีแล้ว ไอออนสามารถสร้างได้จากแทบทุกธาตุในตารางธาตุ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างวัสดุใหม่ๆ ที่ ไม่เคยมีในธรรมชาติได้ รูปที่ 2-15 แสดงกลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน



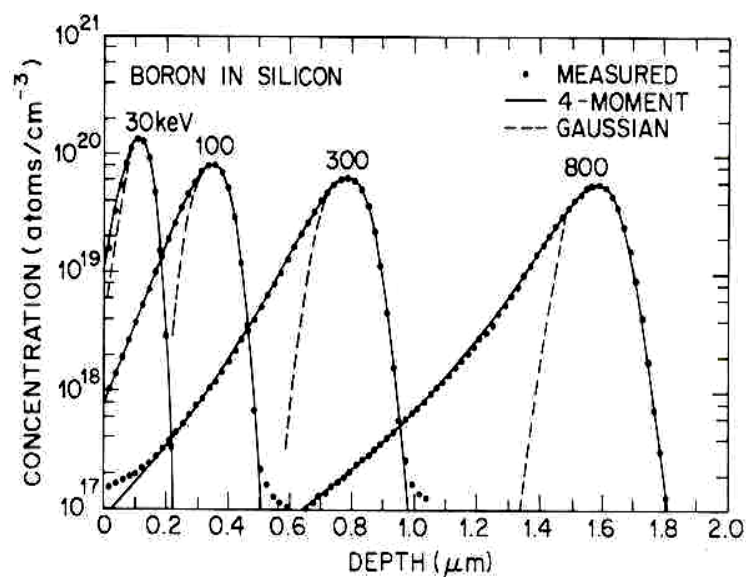
รูปที่ 2-15 กลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน [13]

เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออน ที่ซึ่งไอออนของธาตุที่ต้องการได้ถูกสร้างขึ้น ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำป้อน โดยทั่วไปถัดจากนี้ มักจะมีส่วนกรองไอออน ที่ซึ่งลำป้อนจะถูกคัดเลือกด้วยสนามแม่เหล็ก ให้เหลือเฉพาะไอออนชนิดที่ต้องการผ่านไปต่อไปได้ หลังจากนั้นจึงถึงส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น และส่วนห้องเป้า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ในกรณีที่ลำป้อนมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ที่ต้องการฝังไอออน จำเป็นต้องมีส่วนกวาดลำป้อน ที่ซึ่งลำป้อนถูกบังคับให้กระจายอย่างสม่ำเสมอไปบนเนื้อวัสดุ ท้ายที่สุด จะมีส่วนฟาราเดย์คัพ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุ เมื่อได้ปริมาณที่ต้องการก็จะหยุดการทำงาน จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นต่อเวลา เรียกว่า “กระแสไอออน” และปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุ จะเรียกว่า “โดส” ซึ่งก็คือ ผลคูณระหว่างกระแสไอออนกับเวลาต่อพื้นที่ของการฝังไอออน เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์โดยทั่วไปมักสร้างไอออนได้ในปริมาณที่น้อย (ในหน่วยไมโครแอมแปร์) ดังนั้น การฝังไอออนจึงทำได้ในปริมาณโดสต่ำๆ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ในปริมาณน้อยๆ เท่านั้น เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์โดยทั่วไปแสดงดังในรูปที่ 2-16

พลังงานของไอออนที่สร้างได้จากเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ทั่วไป อยู่ระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานต่ำกว่านั้น มักไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้าง แต่จะเหมาะสำหรับการใช้สร้างฟิล์ม พลังงานที่สูงกว่านั้น มักไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากก่อให้เกิดการชำรุดของโครงสร้างผลึกของวัสดุ เฉพาะจุด แต่โครงสร้างโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลง ไอออนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง จะกระจายเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุที่ความลึกค่าต่างๆ ความลึกเฉลี่ยจะเรียกว่า “พิสัย” โดยที่จะขึ้นกับชนิดและพลังงานของไอออน และองค์ประกอบเชิงเคมีของวัสดุเอง โดยทั่วไปแล้วไอออนที่มีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีพิสัยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ในงานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงเชิงผิวของวัสดุ ตัวอย่างการคำนวณค่าพิสัยของการฝังไอออนแสดงดังในรูปที่ 2-17

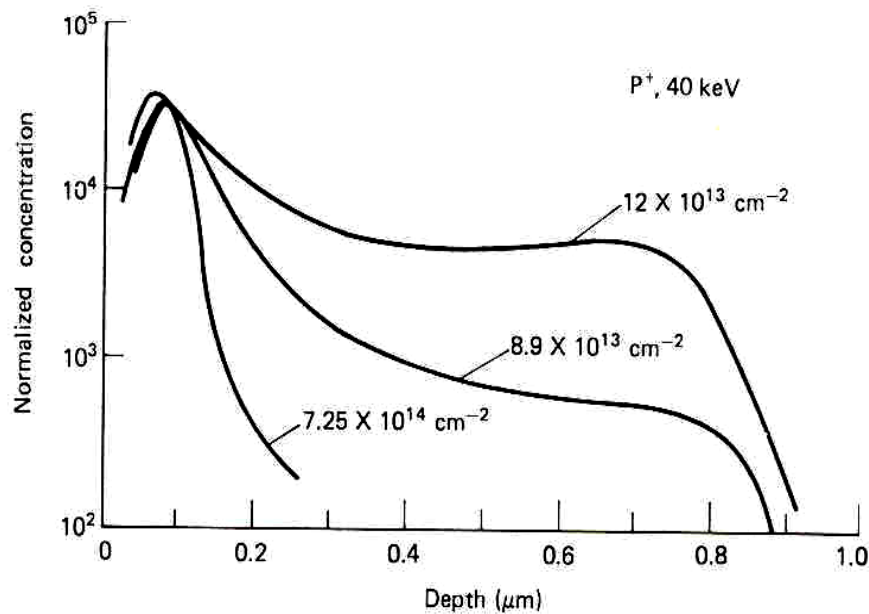


รูปที่ 2-16 ลักษณะองค์ประกอบทั่วไปของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ [14]



รูปที่ 2-17 ความลึกของการฝังไอออนโบรอนในเนื้อซิลิคอนที่ไอออนพลังงานค่าต่างๆ [13]

สิ่งที่น่าสนใจ คือ ถ้าวัสดุเป็นผลึกที่สมบูรณ์ ไอออนที่พุ่งเข้าไปในวัสดุในทิศทางที่แตกต่างกัน ย่อมมีโอกาสที่จะชนกับอะตอมของวัสดุแตกต่างกัน ในบางทิศทาง เช่น ขนานกับแนวแกนผลึก ไอออนสามารถวิ่งเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่าปกติ เรียกว่าการเกิดขานลิ่ง โดยที่ความลึกของการเดินทางของไอออนในแนวนี้ ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น การควบคุมจึงทำได้ยากกว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 ความลึกของการฝังไอออนฟอสฟอรัสพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในซิลิกอน ในแนวแกนตั้ง ซึ่งจะไม่แน่นอน แต่จะขึ้นกับจำนวนโดสด้วย [13]

ทั้งนี้เมื่อไอออนพุ่งเข้าชนผลึกของเป้า (crystal structure) อาจทำให้ระบบผลึกชำรุดได้ ตัวอย่างเช่น ไอออนพุ่งเข้าชนอะตอมในผลึกด้วยพลังงานที่มากพอ จะทำให้อะตอมหลุดออกจากผลึก ตำแหน่งนั้นจึงเกิดเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมที่หลุดออกมา มักมีพลังงานมากพอที่จะพุ่งเข้าชน และถ่ายเทพลังงานให้อะตอมอื่นๆ ต่อไปได้เรื่อยๆ จนกว่าพลังงานจะหมด เกิดเป็นช่องว่างเพิ่มเติมได้มากมาย ท้ายที่สุดแล้วอะตอมที่หลุดออกมานี้ อาจรวมตัวกันที่ตำแหน่งไม่ปกติ (interstitial) กลายเป็นก้อนใหญ่ๆ ในเนื้อวัสดุได้ ในบางกรณี ความเสียหายของระบบผลึกสามารถซ่อมแซมให้กลับคืนมาได้ด้วยการอบที่อุณหภูมิต่ำ หรือ อบอุ่น (anneal) ซึ่งเมื่ออะตอมที่หลุดออกจากผลึก ได้รับอุณหภูมิค่าหนึ่ง จะเกิดการเคลื่อนไหว และอาจจะกลับเข้าสู่ตำแหน่งปกติได้ เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันจึงมักทำควบคู่ไปกับการอบอุ่น นอกจากนั้น ไอออนอิมพลานเตชันสามารถทำให้อะตอมที่อยู่ใกล้ผิวของวัสดุหลุดออกมาได้ ซึ่งเรียกว่าการเกิดสปัตเตอริง ไอออนอิมพลานเตชันที่โดสสูงๆ จึงมักทำให้ผิวหน้าของวัสดุค่อยๆ หลุดออกไป อย่างไรก็ตาม อาจจะดีในแง่ที่ช่วยกำจัดคราบสกปรกออกไปจากผิววัสดุได้ด้วย

ในระยะแรก การพัฒนาเทคโนโลยีไอออนอิมพลานเตชัน มีจุดประสงค์เพื่อการเจือ (dope) สารกึ่งตัวนำในปริมาณเล็กน้อย โดยต้องการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงไฟฟ้า [15] เช่น สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) โดยพบว่าไอออนอิมพลานเตชันสามารถควบคุมปริมาณ และการกระจายตัว (profile) ของสารเจือ (impurity) ได้ดีกว่าการทำ diffusion doping นอกจากนั้นยังสามารถฝังสารเจือต่างชนิดกันลงบน substrate เดียวกันโดยที่ไม่มีการรบกวนการกระจายตัวของกันและกันได้อีกด้วย การศึกษาวิจัยต่อมายังพบว่า สมบัติเชิงกลยังสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยกระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน ตัวอย่างเช่น การสึกหรอ (wear) ความฝืด (friction) ความแข็ง (hardness) การสึกกร่อน (abrasion) และการเป็นสนิม (corrosion) โดยมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ในวัสดุที่เป็นโลหะ โดยทั่วไปพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผ่านการไอออนอิมพลานเตชันจะดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งต่างกับสมบัติเชิงเคมีได้แก่ความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) และ passivation ที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปในทางลบได้ [16]

ไอออนอิมพลานเตชันสามารถเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสง (optical absorption) ดัชนีหักเห (refractive index) และสีของวัสดุได้ด้วย Saito และคณะ [17] ได้ย้อมฝังไอออน Co^+ ด้วยโดส $5 \times 10^{16} - 5 \times 10^{17}$ ไอออน/ซม² ที่พลังงาน 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ลงบนแซปไฟร์สังเคราะห์ (synthetic sapphire) ซึ่งไม่มีสี หลังจากนำไป anneal ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แซปไฟร์จะเปลี่ยนเป็นสีเขียว และถ้า anneal ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้แซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อน

ข้อดีของเทคนิคนี้ จึงอยู่ที่สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณเฉพาะที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้าง จึงกลมกลืนกับเนื้อวัสดุเดิมมาก นอกจากนั้น เทคนิคนี้ยังไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย โดยเฉพาะการปรับเปลี่ยนสีให้เป็นที่ต้องการของตลาด และการกำจัดอินคลูชันขนาดเล็กเพื่อให้พลอยดูใสขึ้น เช่น ของแข็งจากธาตุชนิดอื่นของเหลว แก๊ส อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคอรัันดัม *Intarasiri และคณะ* [18] ได้รายงานเป็นครั้งแรกว่า มีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอยคอรัันดัมได้

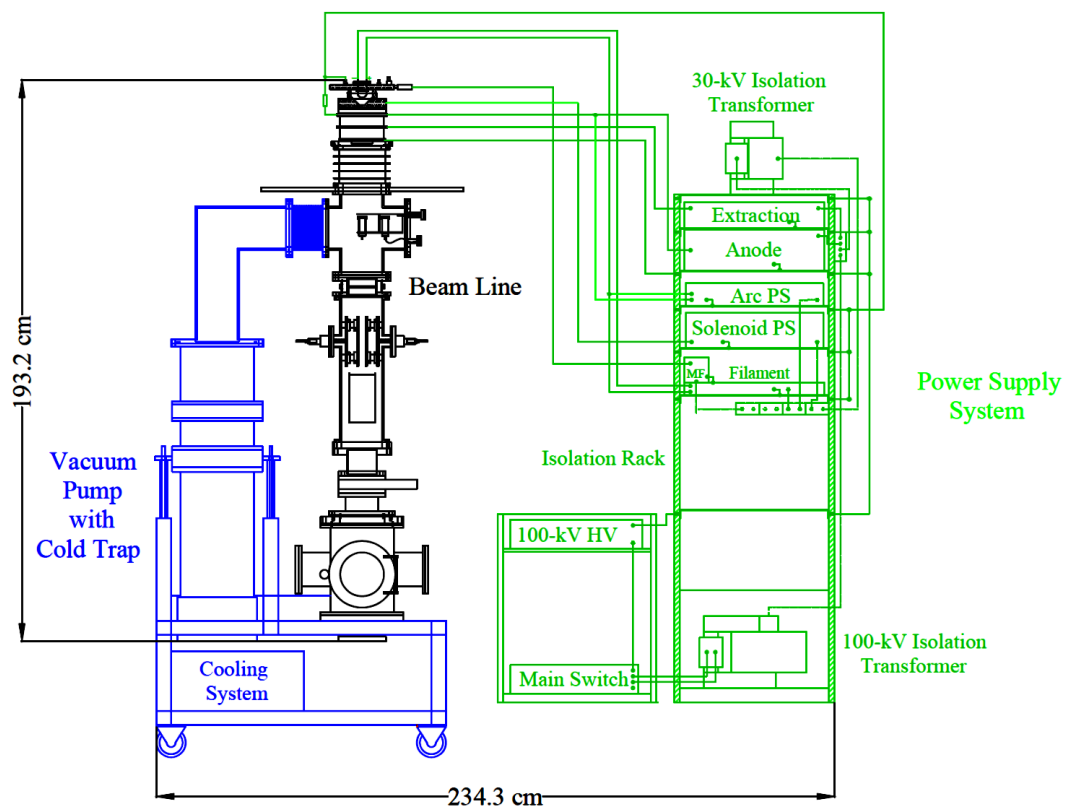
2.2.2 การพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ในประเทศไทย

ศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง (ชื่อเดิม) ได้สร้างเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์จากก๊าซเครื่องแรก โดยความช่วยเหลือจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) เมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในงานวิจัยพื้นฐานทางด้านอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัสดุแข็ง [19] หลังจากนั้นจึงสร้างเครื่องเร่งลำไอออนสำหรับงานอุตสาหกรรม [20] เพื่อใช้ทดลองยิงฝังไอออนในโตรเจน ลงบนผิวของชิ้นส่วนอุตสาหกรรม อาทิ ดอกกัตเกลียว ตัวตอก เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีเครื่องเร่งลำไอออนของบริษัท Varian โมเดล DF-4/5 ซึ่งเคยใช้ในอุตสาหกรรมการเจาะสารกึ่งตัวนำ ที่ได้รับการบริจาคจาก IAEA โดยคณาจารย์และนักวิจัยของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้นำมาดัดแปลงเพื่อใช้ในงานวิจัยที่สอดคล้องกับความต้องการของประเทศ งานวิจัยที่ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน มีหลากหลาย อาทิ การปรับปรุงพื้นผิวโลหะ (surface modification) โดยการเคลือบฝังไอออนลงบนผิวของโลหะเพื่อเพิ่มความแข็ง (hardness) [21, 22] การชักนำการกลายพันธุ์ของพืชด้วยลำไอออน โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวหอมมะลิไทย [23, 24] และงานพลอย ดังกล่าวมาแล้ว

แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่นกัน คือ เครื่องเร่งลำไอออนพลังงานต่ำไม่เกิน 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ดังกล่าว ยังมีขนาดใหญ่ประมาณ 5-15 เมตร และที่สำคัญ คือ มีราคาแพง อยู่ในเรือน 100 ล้านบาท นอกจากนั้นยังมีความซับซ้อนในการใช้งานสำหรับนักวิจัยทั่วไปที่ไม่ใช่นักฟิสิกส์ สิ่งเหล่านี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการตัดสินใจหาเครื่องเร่งลำไอออน มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของหน่วยงานต่างๆ ของประเทศ ดังนั้นเมื่อ 2-3 ปีที่ผ่านมา ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค (ชื่อใหม่) ได้ออกแบบและสร้างเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ศักย์ไฟฟ้าเร่งไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ราคาไม่แพงมาก โดยการลดทอนอุปกรณ์ส่วนที่ไม่จำเป็นออก เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของประเทศที่มีต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการควบคุมการทำงาน และสะดวกในการซ่อมบำรุง โดยวางแผนพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับจัดสร้างเครื่องอื่นๆ ให้แก่งานที่ต้องการต่อไป ลักษณะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต ถูกออกแบบและสร้างให้อยู่ในแนวตั้ง

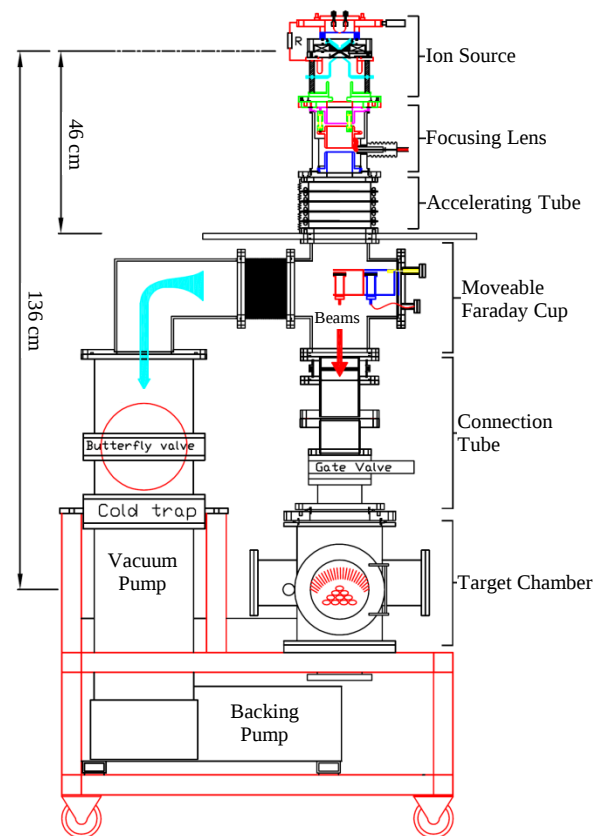
มีขนาดความยาว หรือ ความสูงไม่เกิน 2 เมตร ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron อิเล็กโทรดโพกัส อิเล็กโทรดดึงลำไอออน ท่อเร่งลำไอออน สถานีทดสอบลำไอออน เครื่องกวาดลำไอออน สนามไฟฟ้า และห้องยิงฝึกลำไอออน ทั้งนี้ ได้ออกแบบให้มีระบบปั๊มสุญญากาศเพียงชุดเดียวเท่านั้น โดยมีรูเปิดขนาด 0.3 มม. ที่ anode เป็นช่องขนาดเล็ก สำหรับรักษาระดับความแตกต่างของสุญญากาศในห้อง discharge และตัวเครื่องให้สัมพันธ์กัน เพื่อช่วยในการควบคุมการผลิตลำไอออน โดยมี bypass สำหรับกักแก๊สเพื่อจุดพลาสมาและสำหรับระบายแก๊สในห้อง discharge ไปยังท่อนำลำไอออน เพื่อปรับระดับสุญญากาศให้พร้อมสำหรับการจุดพลาสมาครั้งต่อไป นอกจากนั้น ยังมี gate valve สำหรับปิด-เปิด เพื่อแยกส่วนห้องยิงฝึกลำไอออนออกจากตัวเครื่อง ทำให้ไม่ต้องหยุดการทำงานของระบบสุญญากาศในขั้นตอนการเปลี่ยนงานวางตัวอย่าง ไตอะแกรมของเครื่องและรายละเอียดทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2-19

ทีมงานผู้สร้างได้วางรูปแบบการทำงานของเครื่องเร่งนี้ไว้ดังนี้ เมื่อลำไอออนถูกสร้างจากแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron จะถูกดึงให้วิ่งออกมาด้วยพลังงานประมาณ 15-20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แล้วถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าคงที่ของท่อเร่งพลังงานที่ปรับค่าได้สูงสุด ประมาณ 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นลำไอออนจะถูกกวาดในแนวแกน x และ y ซึ่งเป็นแกนตั้งฉากกับบนระนาบที่ตั้งฉากกับลำไอออน หรือหมุนงานใส่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เพื่อให้ลำไอออนยิงฝึบบนงานใส่ชิ้นงานจนเต็มพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ในห้องยิงฝึกลำไอออน การจัดวางเครื่องเร่งในลักษณะนี้ ทำให้ลำไอออนวิ่งจากบนลงล่าง จึงสะดวกในการจัดวางชิ้นงาน ที่มีทั้งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันหลากหลายรูปแบบ [25]



รูปที่ 2-19 ไตอะแกรมอย่างง่าย และ รายละเอียดทางไฟฟ้าของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ศักย์ไฟฟ้าเร่งไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [25]

อย่างไรก็ตาม ต่อมาได้มีการปรับแต่งให้เครื่องเร่งลำไอออนเครื่องนี้ นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์นดัม [26] เครื่องเร่งจึงผลิตเฉพาะไอออนที่จำเป็นสำหรับงานนี้เท่านั้น ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน นอกจากนั้น ระบบการกวาดลำไอออนยังไม่จำเป็นสำหรับการใช้งาน ส่วนใหญ่จึงมักไม่ได้ใช้ จึงได้นำออกจากตัวเครื่อง ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดไอออนและห้องเป้าจึงลดลง เป็นการช่วยลดการสูญเสียไอออนในระหว่างทางไปได้อีก ลักษณะของเครื่องเร่งที่ประกอบแล้วเสร็จ และนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์นดัม แสดงดังรูปที่ 2-20 และรายละเอียดทางเทคนิคแสดงดังในตารางที่ 2-2



รูปที่ 2-20 ภาพถ่าย และ ไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด สำหรับใช้ในงานพลอยคอร์นดัม ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [26]

ในการทำงานจริง พลอยจะถูกวางอยู่ในภาคว่างพลอยขนาด 10 X 10 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2-21 หลังจากนั้น จึงนำภาวดังกล่าวไปใส่ในห้องยิงฝึกลำไอออน ซึ่งมีฟาราเดย์คัพแบบเคลื่อนที่ได้สำหรับวัดค่ากระแสไอออน โดยที่ภายในห้องดังกล่าว ยังจัดวาง heater แบบขดลวดนำไฟฟ้า สำหรับอุ่นขึ้นงานขณะยิงฝึกลำไอออนไว้ด้วย ซึ่งสามารถปรับอุณหภูมิได้สูงสุดถึงประมาณ 300 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้ถือว่าไม่สูงนักสำหรับพลอยคอร์นดัม ที่ปกติมักจะเผาที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป พลอยจึงยังไม่สูญเสียสภาพเนื่องจากความร้อน แต่จะช่วยให้อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพลอยเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น นอกจากนั้น หลังจากยิงไอออนที่อุณหภูมิได้พลอยตัวอย่างจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในไนโตรเจนเหลว เพื่อช่วยคงสภาพการเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่าง

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รายละเอียดทางเทคนิค	คุณลักษณะเฉพาะ
การประกอบเครื่อง	จัดวางในแนวตั้ง (vertically alignment)
ชนิดของไอออนที่สร้างได้	Gaseous ion species (N^+ , O^+ , Ar^+)
ศักย์ไฟฟ้าสูงสุด	ประมาณ 100 กิโลโวลต์
ขนาดลำไอออน	ครอบคลุมพื้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 ซม.
กระแสไอออน	ประมาณ 200 – 500 ไมโครแอมแปร์ ขึ้นกับชนิดของไอออน
ระบบปั๊มสุญญากาศ	Rotary และ Diffusion 1 ชุด ทำงานร่วมกัน ใช้เวลาทำสุญญากาศประมาณ 6 ชั่วโมง ได้ความดันที่แหล่งกำเนิดไอออน $1-2 \times 10^{-2}$ ทอร์ และภายในท่อนำลำไอออน $5-7 \times 10^{-6}$ ทอร์
ห้องยิงฝังไอออน	มี heater สำหรับอุ่นชิ้นงานขณะยิงฝังไอออน ที่อุณหภูมิสูงสุด $300\text{ }^{\circ}\text{C}$
Housing สำหรับติดตั้งเครื่องเร่ง	ประมาณ $3 \times 4 \times 3$ ลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 2-21 ถาดวางพลอยสำหรับยิงไอออน ในเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด ศักย์ไฟฟ้าเร่งไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [26]

2.2.3 การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์ด้วยลำไอออน

การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความสะอาด (clarity) ยังมีข้อจำกัด บางครั้งจะเกิดการแตกร้าวภายในพลอยทำให้มูลค่าลดลง ซึ่งรอยร้าวที่ปรากฏบนผิวหรือในเนื้อพลอย อาจเกิดเนื่องจากพลอยได้รับความเค้นที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของหินที่หุ้มพลอย หรืออาจเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของกระบวนการขยายตัวของผลึกพลอย ในสภาวะความร้อนสูง การแก้ไขอาจทำได้โดยนำพลอยมาผ่านกระบวนการทางความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้ความเครียดในเนื้อพลอยลดลง หรือเกิดการปรับกระบวนการขยายตัวของผลึก ทำให้ลดรอยแตกที่ไม่พึงประสงค์ แต่ยังมีข้อจำกัดอื่นๆ เช่น พลอยที่มีราคาถูก คุณภาพต่ำ ทึบแสง มีมลทินมากแต่ขนาดใหญ่ หรือพลอยที่มีสีรองทำให้สีไม่สดและไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถใช้กลไกทางความร้อนแก้ปัญหาได้ทั้งหมด ทั้งนี้การปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแร่มลทิน โครงสร้างผลึกของพลอย แหล่งกำเนิดที่มีแร่มลทินหลัก ปริมาณธาตุเจือที่มีในโครงสร้างผลึกพลอย ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการและเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือ เพื่อลดข้อจำกัดของการปรับปรุงคุณภาพแบบเดิม

เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน เป็นเทคนิคในการฝังไอออนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในวัสดุ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุ ทั้งนี้ไอออนที่มีพลังงานสูง เมื่อถูกฝังเข้าไปในตัวอย่าง จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกับอะตอมหรือโมเลกุลของตัวอย่าง ทำให้อาจเกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมไปแทรกอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) เกิดเป็นช่องว่าง (vacancy) และอาจเกิด defect ในบางตำแหน่ง แต่ท้ายที่สุดแล้วไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะไปรวมตัวกับโครงสร้างเดิม เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมีการใช้ในอุตสาหกรรมมานานแล้ว โดยเป็นเทคนิคหลักในการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ แต่เป็นการโด๊ปในปริมาณน้อยๆเท่านั้น ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วย

คณะผู้วิจัยได้ทดลองนำเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมาใช้กับพลอยคอร์ันดัมหลายชนิด [18, 26] ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษามีทั้งพลอยสด และพลอยเผาที่ผ่านการเจียรไนแล้ว ขนาดมีตั้งแต่ 0.5–3 เซนติเมตร ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพลอย โดยการตรวจสอบสีด้วยชุดเปรียบเทียบสีคอร์ันดัมมาตรฐานของ GIA (Gemological Institute of America) หลังจากนั้น จึงตรวจสอบลักษณะภายในด้วยกล้องไมโครสโคป เช่น ตำหนิภายในหรือมลทินจากแร่เหล็กสีดำคล้ำเส้นไหมสีขาว หย่อมสี (color zoning) แล้วจึงศึกษาพลอยด้วยเทคนิค Particle Induce X-ray Emission (PIXE) เพื่อเก็บข้อมูลของแหล่งกำเนิด ความแตกต่างของธาตุมลทินแบบต่างๆ ที่มีผลต่อสีดำคล้ำและการขุ่นมัวในเนื้อพลอยที่มาจากออกไซด์ของโลหะต่างๆ เช่น จุดสีดำ (Fe_2O_3) สีขาว (TiO_2) และปริมาณธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเกิดสีภายในโครงสร้างผลึกพลอย คือ Fe, Cr, Ti, Al, V ใช้เทคนิค Ionoluminescence (IL) เพื่อวิเคราะห์การเปล่งแสงของพลอย และทำไอออนอิมพลานเตชัน โดยใช้ไอออนหลายชนิด เช่น ไอออนของอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน

คณะผู้วิจัย พบว่า เมื่อทดลองไอออนอิมพลานเตชันแซปไฟร์สีอ่อน-ขุ่น-ทึบแสง ด้วยลำไอออนอาร์กอน พลอยมีลักษณะโปร่งใสขึ้น โดยที่ยังโดสสูงขึ้นเนื้อพลอยจะยิ่งโปร่งใสขึ้น นั่นคือ พลังงานที่สูงมากของไอออนนั้น เมื่อถ่ายเทเข้าสู่พลอยตัวอย่าง จะส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวของผลึกของพลอยขึ้นใหม่เป็นระเบียบมากขึ้น อินคลูชันเล็กๆ ที่เป็นพวกของเหลว ของแข็ง น่าจะถูกทำลาย เนื้อพลอยจึงดูโปร่งใสขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-22 นอกจากนั้น เมื่อทดลองกับไพโรสเฟสที่เป็นไพโรสเฟสสีน้ำเงินเข้มหลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจน พบว่า ผลจากพลังงานของไอออนทำให้มีการสลายของมลทินที่เป็นเส้นเข็มสีขาวทั่วทั้งก้อนผลึก ได้พลอยที่มีสีสม่ำเสมอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-23

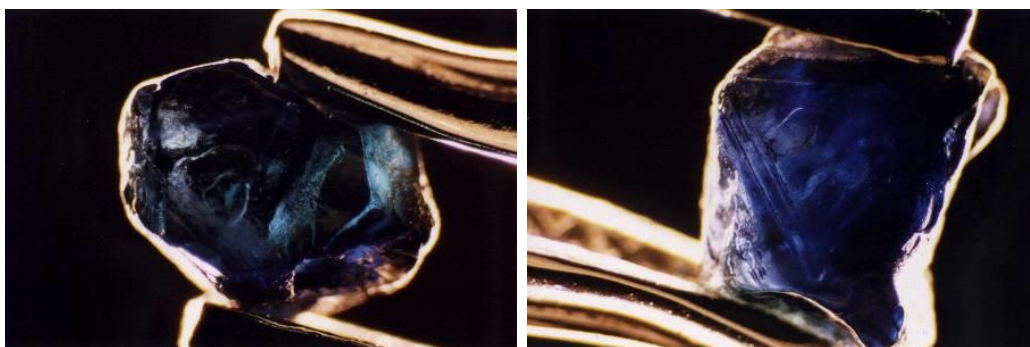


รูปที่ 2.22 แชนป์ไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันที่โดสค่าต่าง ๆ จะมีความโปร่งใสเพิ่มมากขึ้นตามค่าโดสที่เพิ่มขึ้น (จากขวาไปซ้าย) เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ไอออนอิมพลานเตชัน (เม็ดขวาสุด)



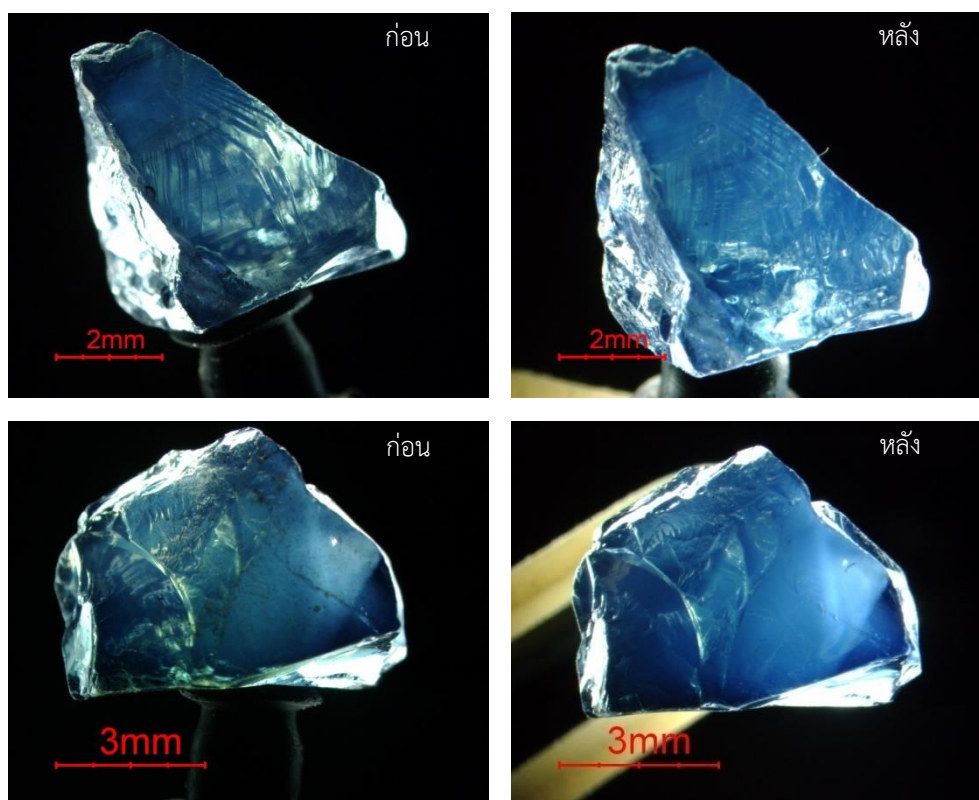
รูปที่ 2-23 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนที่มีแถบสีน้ำเงินเข้ม ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นการกระจายสีมากขึ้น

ที่น่าสนใจ คือ ไอออนอิมพลานเตชันสามารถปรับเปลี่ยนสีพลอยคอรันดัมได้ด้วย ผลของไอออนที่มีต่อการเปลี่ยนสีของคอรันดัมนั้นมีหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของมลทิน (impurity) ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่ให้สี การแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) การเกิด color center และการเกิด defect ในเนื้อพลอย [13] เป็นต้น ตัวอย่างที่น่าสนใจ คือ พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน หรือ ไพลิน (blue sapphire) ที่มีสีน้ำเงินอมเขียวจากเฟอร์ริก (Fe^{3+}) หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจน พบว่า สีน้ำเงินเข้มขึ้น สีเขียวเจือจางลงเกือบหายไป ประกอบกับผลจากสารประกอบรูไทล์ (TiO_2) เมื่อได้รับการกระตุ้นจะสลายตัวเข้าไปในโครงสร้างของพลอย และทำให้ Ti^{4+} เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ intervalence charge transfer [5,27] ทำให้สีน้ำเงินเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด reduction ในพลอย ทำให้สามารถลดสีรองที่เป็นสีเขียว ทำให้พลอยเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มสดและโปร่งแสงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-24 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นว่าสีเขียวหายไปกลายเป็นสีน้ำเงินสด [18]

นอกจากนั้น ในงานวิจัยใหม่ๆ ของคณะผู้วิจัย ยังพบว่า ให้ผลดีกับพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนจากอาฟริกา โดยทำให้พลอยมีสีน้ำเงินที่เข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 2-25 [26] การเปลี่ยนแปลงของพลอยหลังยิงด้วยลำไอออนดังกล่าวนี้ ทำให้พลอยคอร์ันดัมมีมูลค่าที่สูงขึ้น



รูปที่ 2-25 เปรียบเทียบพลอยจากแหล่งดิวโก้ ประเทศมาดากัสการ์ 2 ตัวอย่าง ระหว่าง ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงไอออน จะเห็นว่าสีเขียวลดลงและความใสมีการเปลี่ยนแปลง โดยที่การบันทึกภาพทำหลังจากทำความสะอาดผิวด้วยพลาสมา ถ่ายโดยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายต่ำ (10x) [26]

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองในโครงการเป็นพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวจากหลายแหล่ง ประกอบด้วยพลอยจากแหล่งในประเทศไทย ทั้งสิ้น 4 แหล่ง จาก 3 จังหวัด ได้แก่ แพร่ กาญจนบุรี และ จันทบุรี และมีแหล่งจากต่างประเทศเพื่อนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ออสเตรเลีย และ มาดากัสการ์ โดยใช้จำนวนตัวอย่างจำนวนมากต่อแหล่งเพื่อดูความเป็นไปได้ในเชิงสถิติ นอกจากนี้ ยังจะทำการทดลองเปรียบเทียบกับเทคนิคการเผาแบบที่ทำกันในปัจจุบัน เพื่อดูความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจอีกด้วย ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะทำการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆดังนี้ (1) วัดสีเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานโดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (2) ศึกษาการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Visible spectroscopy (3) ใช้เครื่อง EDXRF เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมลทินออกไซด์ของโลหะต่างๆเช่น Al_2O_3 FeO และ TiO_2 (4) การทดลองให้ความร้อนในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างๆ และ (5) การทดลองใช้กระบวนการทางลำไอออนในสภาวะต่างๆ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว โดยหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลทินต่อโครงสร้างพลอยและปริมาณของธาตุร่องรอย เพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดพลอย เช่น ความสดของสี ความใส-สะอาด มลทินน้อย มีประกายหรือมีการเรืองแสงภายใต้แสงชนิดต่างๆ (6) ทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของแหล่งพลอยต่างๆ เพื่อพัฒนาพลอยให้มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มมูลค่าของพลอยคุณภาพต่ำได้ เป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศ

3.2 อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ นอกจากเครื่องมือหลักได้แก่ เครื่องเร่งลำไอออนและเครื่องพลาสมาแรงดันต่ำ ที่ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่แล้ว ยังได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานอื่นๆ ให้สามารถใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์เพิ่มเติม ได้แก่ สาขาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และคณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา นอกจากนี้ สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติอีกด้วย ยังได้อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ระดับสูงอีกด้วย รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย พอสรุปได้ดังนี้

3.2.1 เครื่องมือตรวจวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและสมบัติพื้นฐานทางอัญมณีวิทยา

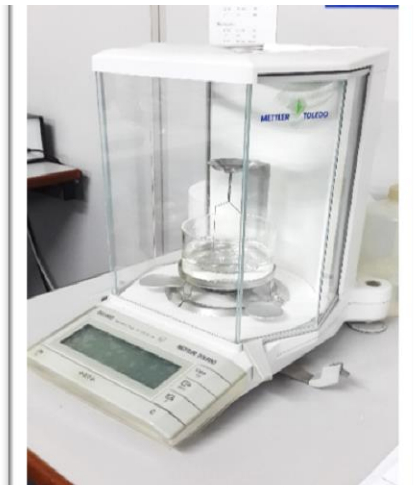
(ก) ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific gravity)

โดยใช้เครื่องชั่งละเอียด Mettler Toledo CG1003 (รูปที่ 3-1) ของสาขาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ค่าความถ่วงจำเพาะของพลอยหาได้ดังนี้

$$\text{ค่าความถ่วงจำเพาะ} = \frac{\text{น้ำหนักของพลอยเมื่อชั่งในอากาศ}}{\text{น.น.พลอยชั่งในอากาศ} - \text{น.น.พลอยชั่งในน้ำ}}$$

หรือ

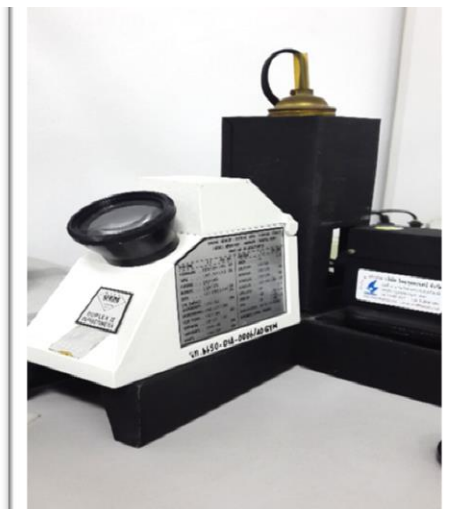
$$= \frac{\text{น้ำหนักพลอยเมื่อชั่งในอากาศ}}{\text{น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าพลอย}}$$



รูปที่ 3-1 เครื่องชั่งละเอียด Mettler Toledo CG1003

(ข) ค่าดัชนีหักเห (Refractive index : R.I.)

โดยใช้เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ Duplex II (รูปที่ 3-2) ของสาขาอัญมณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 3-2 เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ Duplex II

(ค) การจัดลำดับสี

โดยเปรียบเทียบกับชุดเทียบสีของ GIA (รูปที่ 3-3) โดยนำมาเทียบกับ colour master ภายใต้แสงไฟจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ (daylight – equivalent light fluorescence)



รูปที่ 3-3 ชุดเทียบสี (Colour master) ของ GIA

(ง) ความโปร่งแสง (Transparency)

โดยใช้โต๊ะกระจกที่มีหลอดฟลูออเรสเซนต์ (daylight – equivalent light fluorescence) ติดตั้งอยู่ภายใน (รูปที่ 3-4) โดยแบ่งได้ดังนี้

Transparent (Tp)	โปร่งใส
Semitransparent (Stp)	กึ่งโปร่งใส
Translucent (Trl)	โปร่งแสง
Semitranslucent (Strl)	กึ่งโปร่งแสง
Opaque (Op)	ทึบแสง



รูปที่ 3-4 โต๊ะแสงที่ใช้ในการทดสอบความโปร่งแสง

3.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมี

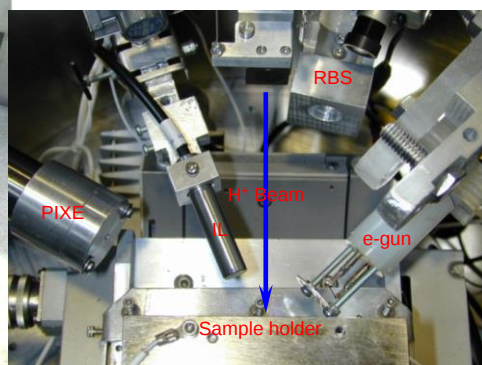
ในโครงการนี้ได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางเคมีหลายชนิด ตัวอย่าง เช่น

(ก) เทคนิค PIXE

เทคนิค Particle Induced X-rays Emission (PIXE) เป็นการวัดรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากตัวอย่างเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอออนโปรตอนพลังงานสูง [28] โดยที่เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในของแต่ละอะตอมถูกชนด้วยโปรตอนพลังงานสูงจนหลุดออกไป อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดไปจะเคลื่อนย้ายลงมาแทน พร้อมกับปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา เทคนิคนี้จึงสามารถตรวจวัดธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างได้ แม้มีปริมาณเล็กน้อยก็ตาม [28] เทคนิคนี้ได้พัฒนาขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศไทยที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 1.7 ล้านโวลต์เป็นฐานผลิตอนุภาคกระสุน (รูปที่ 3-5) และมีหัววัดแบบ Si(Li) สำหรับตรวจวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ โดยอาศัยการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ GUPIXWIN จะสามารถคำนวณปริมาณธาตุเจือในระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) ได้ ตัวอย่างสเปกตรัม PIXE แสดงดังรูปที่ 3-6

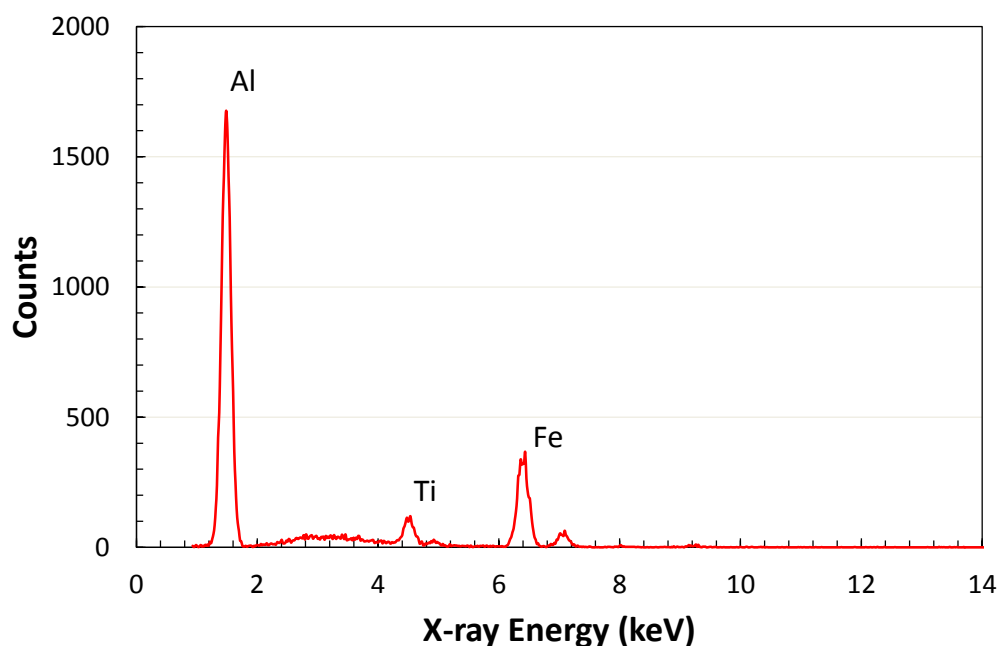


(ก)



(ข)

รูปที่ 3-5 (ก) เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 1.7 ล้านโวลต์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ (ข) อุวิเคราะห์ (analysis chamber)



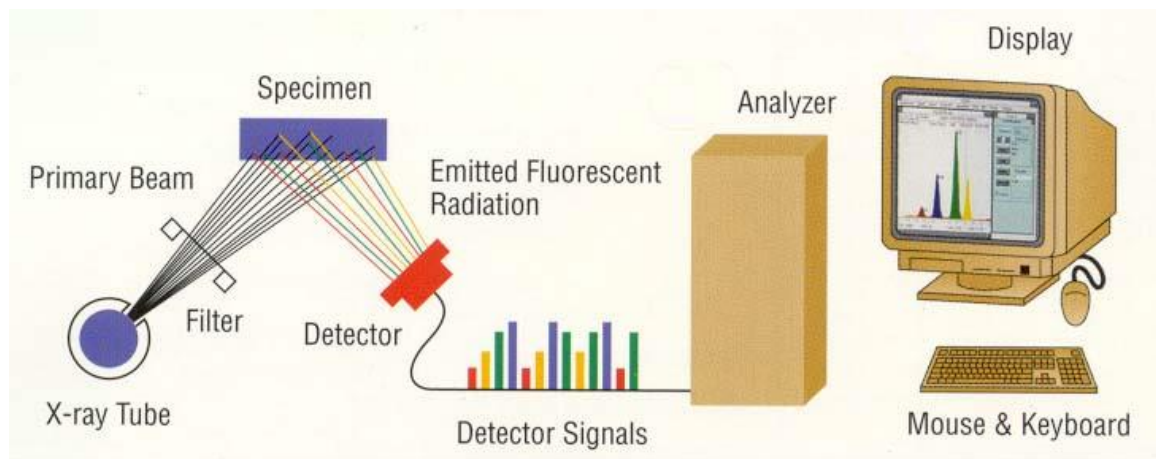
รูปที่ 3-6 สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03

จากสเปกตรัม PIXE เมื่อนำมาคำนวณด้วยโปรแกรม GUPIXWIN พบว่าตัวอย่าง P03 ประกอบด้วย Al_2O_3 (97.59%) SiO_2 (1.67 %) P_2O_5 (0.26%) TiO_2 (0.09 %) FeO (0.35 %) Ga_2O_3 (0.02%) และธาตุปริมาณน้อยกว่า 0.01 % อีกหลายธาตุ

(ข) เทคนิค EDXRF

Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียม ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์จะทำให้ไอเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป ไอเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของตัวธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพและความเข้มข้นของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้น จะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

โดยทั่วไป X-ray Spectrometer ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray tube หรือใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี) และเครื่องตรวจจับ รังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray tube เร่งไอเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะ แล้วให้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจจับแบบสถานะของแข็ง (solid-state) เหมาะสำหรับการตรวจจับรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว ไดอะแกรมของเครื่อง EDXRF แสดงดังในรูปที่ 3-7 และ รูปที่ 3-8 แสดงตัวเครื่อง EDXRF



รูปที่ 3-7 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบ X-ray spectrometer (DX 95, บริษัทฟิลิปส์)



รูปที่ 3-8 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)

(ค) เทคนิค EPMA

เครื่อง EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่อาศัยหลักการยิงลำอิเล็กตรอนไปยังชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ ทั้งด้านสภาพพื้นผิว (Topography) และการวิเคราะห์ (Bulk analysis) ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative) ไดอะแกรมของเครื่องแสดงดังรูปที่ 3-9 การติดตั้งเครื่องแสดงดังรูปที่ 3-10 EPMA คล้ายกับเครื่องมือวิเคราะห์ SEM (Scanning Electron Microscope) ที่ต่อร่วมกับหัววัด EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) หรือหัววัด WDS (Wavelength Dispersive Spectroscopy) แต่จะมีจุดแตกต่าง ดังนี้

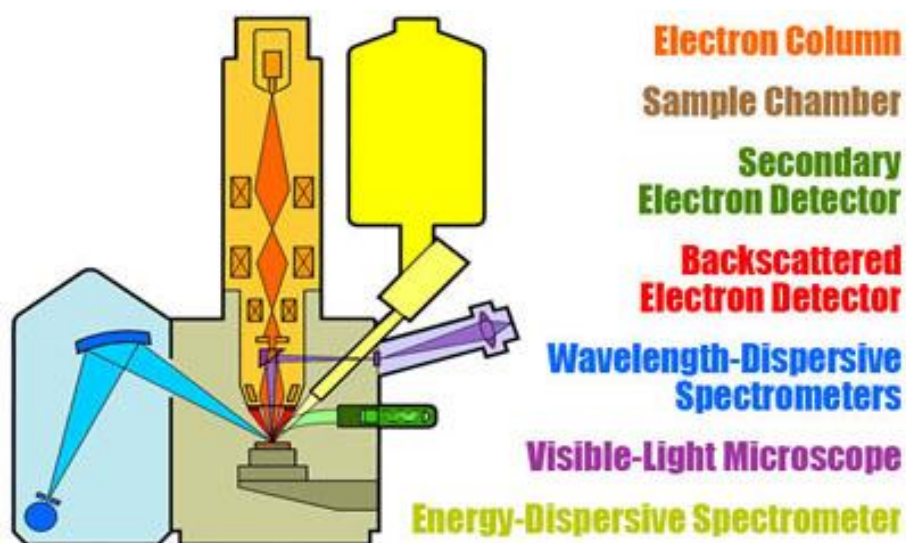
- เครื่อง EPMA เป็นเครื่องมือที่เน้นการวิเคราะห์เป็นหลัก โดยการตรวจสอบสภาพพื้นผิวเป็นเหมือนผลพลอยได้ เนื่องจากการวิเคราะห์ต้องอาศัยลำอิเล็กตรอนในการทะลุทะลวงลงไปในงาน ทำให้เครื่องได้รับสัญญาณทั้ง SE (Secondary Electron), BSE (Back Scatter Electron) และรังสีเอกซ์ ซึ่งจะแตกต่างจากเครื่อง SEM ที่เน้นการตรวจสอบสภาพพื้นผิวเป็นหลัก หากต้องการวิเคราะห์ ต้องติดตั้งหัววัดรังสีเอกซ์เพิ่ม

- เครื่อง EPMA จะใช้แหล่งกำเนิดชนิด CeB6 ซึ่งมีจุดเด่นเรื่องการจ่ายกระแสที่มีความเสถียรสูงมาก (High Stability) ในระดับที่สูงมาก (1,000 นาโนแอมป์) ซึ่งจะแตกต่างจากเครื่อง SEM ที่ใช้แหล่งกำเนิดชนิด FE (Field Emission) หรือ LaB6 ซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดเพียง 100 นาโนแอมป์ หรือ 200 นาโนแอมป์ และอาจไม่เสถียร เนื่องจากการตรวจสอบสภาพพื้นผิวไม่จำเป็นต้องใช้กระแสสูงมาก แต่ในการวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้กระแสที่สูงและเสถียร เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่คงที่ (Fluctuation) และคุณสมบัติของการใช้ธาตุ Ce แทน La ทำให้สารประกอบ CeB6 มีค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่ต่ำกว่า LaB6 ส่งผลให้สามารถจ่ายกระแสได้มากกว่า และเกิดความร้อนขณะทำงานต่ำกว่า LaB6 ส่งผลให้มี CeB6 มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า LaB6 2-3 เท่าตัวโดยประมาณ

-เครื่อง EPMA จะมีมุมเงยของการวิเคราะห์ (Take off) 52.5 องศา ซึ่งสูงกว่าเครื่อง SEM ที่มีมุมเงยของการวิเคราะห์ (Take off) อยู่ที่ 30-35 องศา ซึ่งตามทฤษฎีการวิเคราะห์รังสีเอกซ์จากธาตุเบา เปล่งออกมาที่มุมสูง 40 องศาขึ้นไป ทำให้เครื่อง EPMA สามารถวิเคราะห์ธาตุเบาได้ดีกว่าเครื่อง SEM โดยปริมาณกระแสที่จ่ายให้กับแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่ยิ่งสูงขึ้นงาน จะทำให้ได้ปริมาณรังสีที่มากตามไปด้วย

-เครื่อง EPMA จะมาพร้อมกับหัววัดรังสี WDS อย่างน้อย 2 Channels ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์ที่ดีกว่าหัววัดแบบ EDS ทั้งในด้าน Resolution ที่ต่ำลงมาก และ Signal to Noise ratio ที่สูงมาก และไม่เกิดปัญหา Saturated (เฉพาะหัววัด EDS จะแสดงในรูป Dead time ที่สูงมาก) เมื่อทำการวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีความเข้มข้นสูง

-เครื่อง EPMA จะมีวงการวิเคราะห์ (Rawland Circle) ที่เล็กกว่าเครื่อง SEM พร้อมทั้ง Crystal ที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นชนิด Johanson ซึ่งทำให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่มี Resolution และ Sensitivity ที่สูงทั้งคู่



รูปที่ 3-9 ไดอะแกรมการติดตั้ง Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)



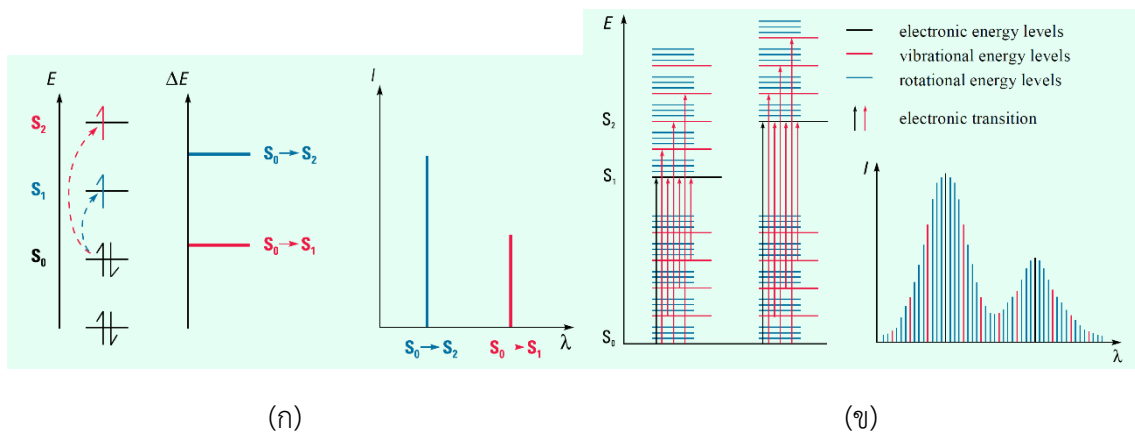
รูปที่ 3-10 EPMA ประกอบด้วย (จากซ้ายไปขวา) electron gun อุโมงค์พร้อมหัววัด control console และ monitors [29]

3.2.3 เครื่องมือวิเคราะห์ทางแสง

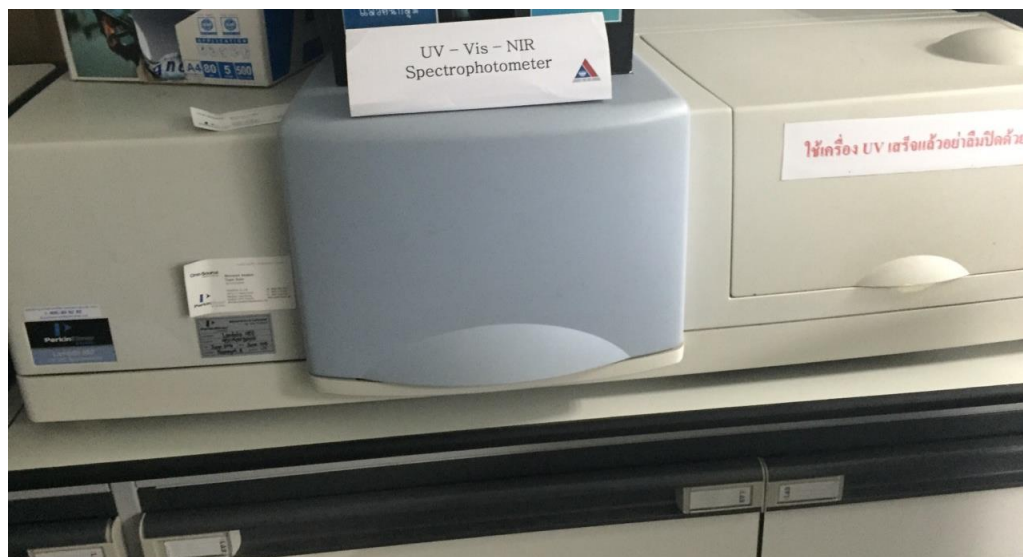
(ก) เทคนิค UV-VIS-NIR

เป็นการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวี ช่วงแสงขาว จนถึงช่วงใกล้อินฟราเรด ที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืน จะสัมพันธ์กับพลังงานที่ต้องใช้ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน จากชั้นที่มีระดับพลังงานต่ำสู่ชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นความยาวคลื่นแสงจะอยู่ในช่วงแคบๆ ที่สัมพันธ์กับความแตกต่างของระดับชั้นพลังงานดังกล่าว (รูปที่ 3-11 (ก)) แต่เมื่อพิจารณาในกรณีของโมเลกุลแล้ว พลังงานจากแสงยังทำให้เกิดการ vibration และ rotation ร่วมกับการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนด้วย ทำให้ความยาวคลื่นแสงกว้างกว่าที่ควรจะเป็น (รูปที่ 3-11 (ข)) โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง [30] ดังนั้น จึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

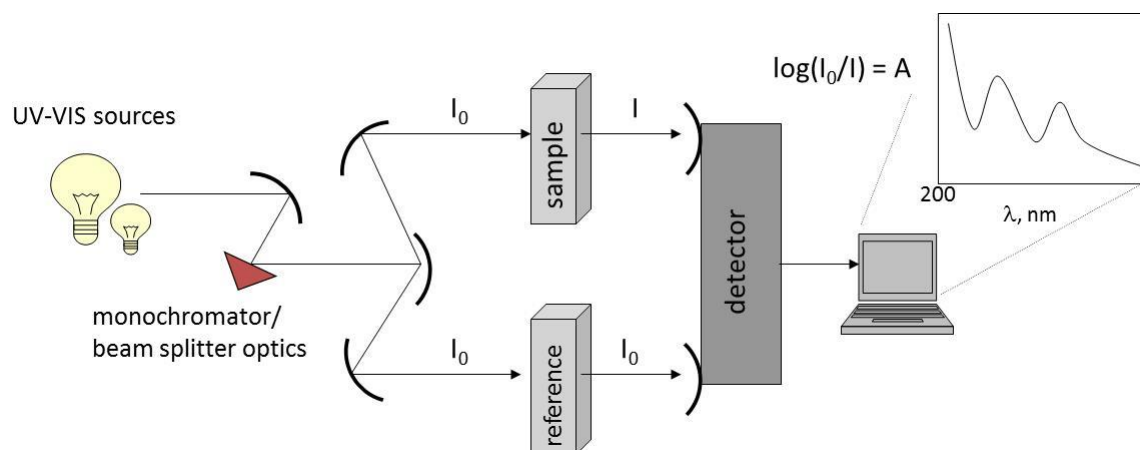
ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi (Model U4001) ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (รูปที่ 3-12) หลักการทำงานคือเป็นเครื่องมือลำแสงคู่ (Double-beam Instrument) โดยที่ลำแสงหนึ่งผ่านตัวอย่างอ้างอิง อีกลำแสงหนึ่งผ่านตัวอย่างพลอยที่ต้องการวิเคราะห์ (รูปที่ 3-13) เป็นการวัดอัตราส่วนของความเข้มแสง จากนั้นจะเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงทั้งสอง ที่ได้จากตัวอย่างอ้างอิงกับตัวอย่างพลอย ที่วัดพร้อมกันในเวลาใกล้เคียงกันมาก ทำให้ไม่มีผลต่อการวัดการดูดกลืนแสง



รูปที่ 3-11 Electronic transitions และ UV-visible spectra ใน (ก) อะตอม และ (ข) โมเลกุล [30]



รูปที่ 3-12 UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U4001 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูปที่ 3-13 ไดอะแกรมการทำงานของเครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer

นอกจากนั้น ยังได้ใช้เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-4100 ของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ 3-14) ช่วงความยาวคลื่นที่วัดสเปกตรัมของตัวอย่างพลอยอยู่ในช่วง 250 ถึง 1500 นาโนเมตร กำหนดให้มีความละเอียดคงที่ที่ 2 นาโนเมตร (มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 2 นาโนเมตร) อัตราเร็วการวัดความเข้มแสง (scan speed) ที่ 300 นาโนเมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาลักษณะการดูดกลืนแสงของธาตुर่องรอยที่มีผลต่อการเกิดสีในตัวอย่างพลอย



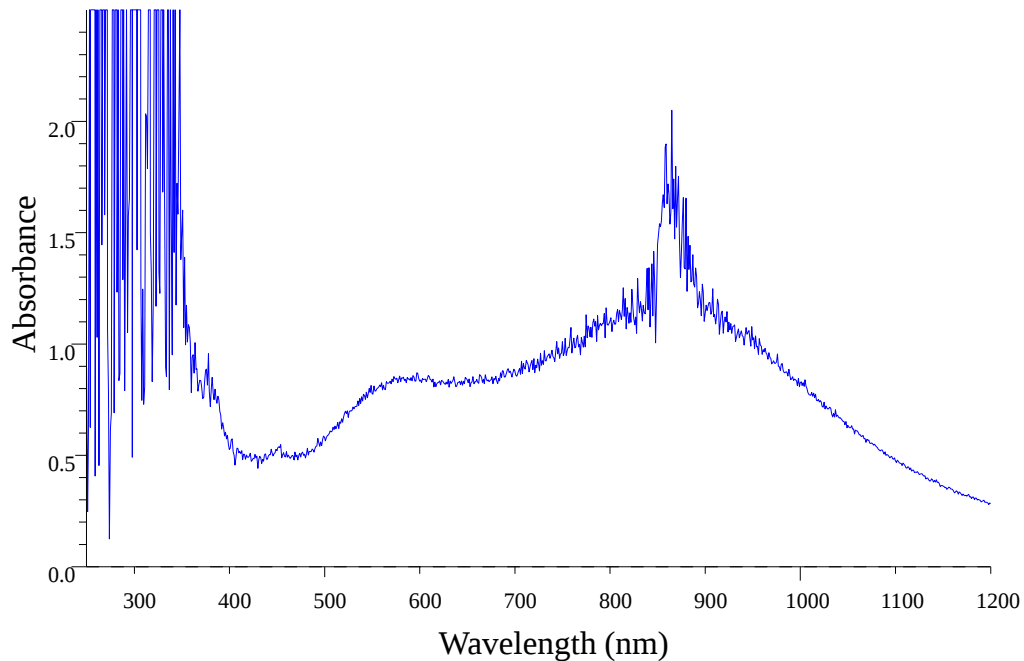
รูปที่ 3-14 UV-VIS-NIR spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-4100 ของภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer มีส่วนประกอบพื้นฐานดังนี้

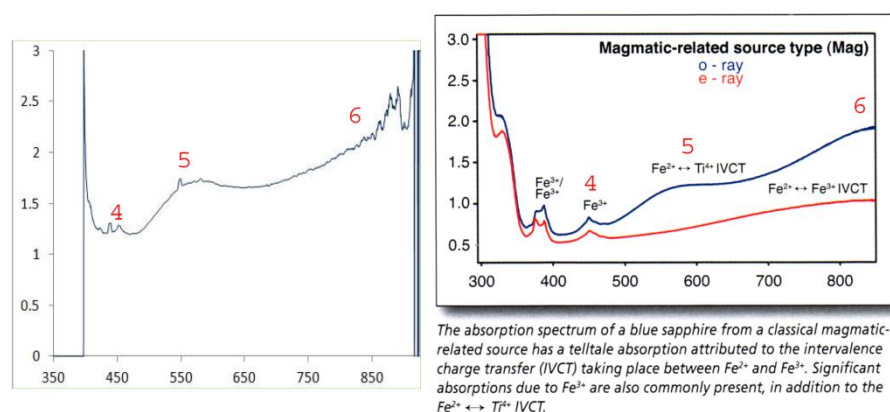
- แหล่งกำเนิดแสง ในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์แหล่งกำเนิดแสง จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ แหล่งกำเนิดแสงช่วง UV ใช้หลอดดิวทีเรียม (Deuterium lamp) ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm ส่วนช่วง visible ใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm
- Monochromator ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่งเป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงคลื่นเดี่ยว (monochromatic) ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดี่ยว โดยใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติง (grating)
- อุปกรณ์จับยึดตัวอย่าง
- เครื่องวัด (Detector) ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของความเข้มของคลื่นแสงช่วง UV-VIS และ NIR โดยรังสีที่ถูกดูดกลืน จากการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีความไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)

- ชุดประมวลผลและบันทึก

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03 แสดงดังในรูปที่ 3-15 จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า สมบัติการดูดกลืนแสงของพลอยสามารถแบ่งชี้คุณลักษณะของพลอยได้หลายประการ อาทิ สีของพลอย ชนิดของธาตุให้สี และยังบ่งบอกถึงชนิดการกำเนิดของพลอยได้ด้วย จากงานวิจัย พบว่า พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่ กำเนิดจาก magmatic segregation ดังแสดงในรูปที่ 3-16



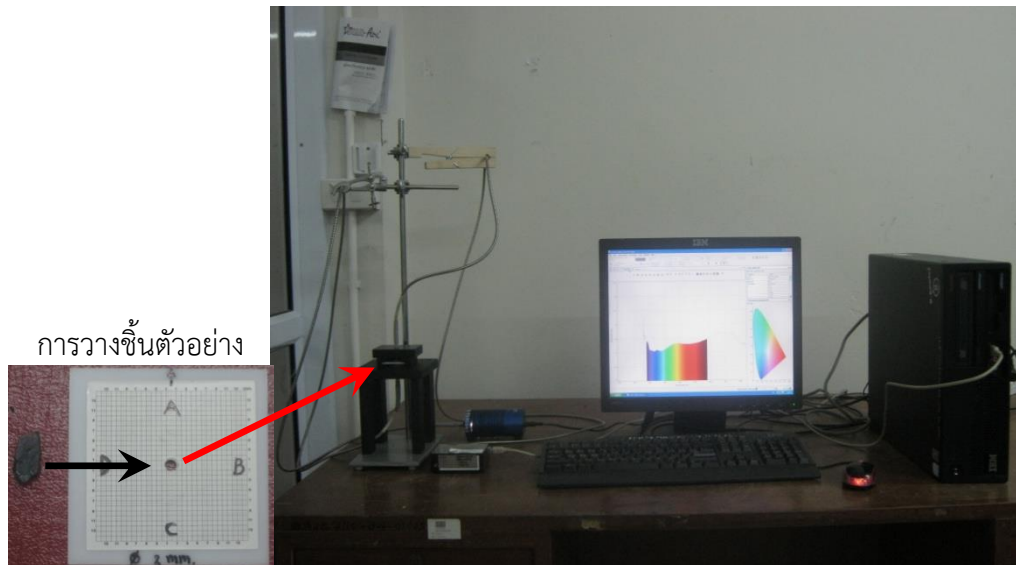
รูปที่ 3-15 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03 บันทึกจากเครื่อง UV-Vis-NIR spectroscopy



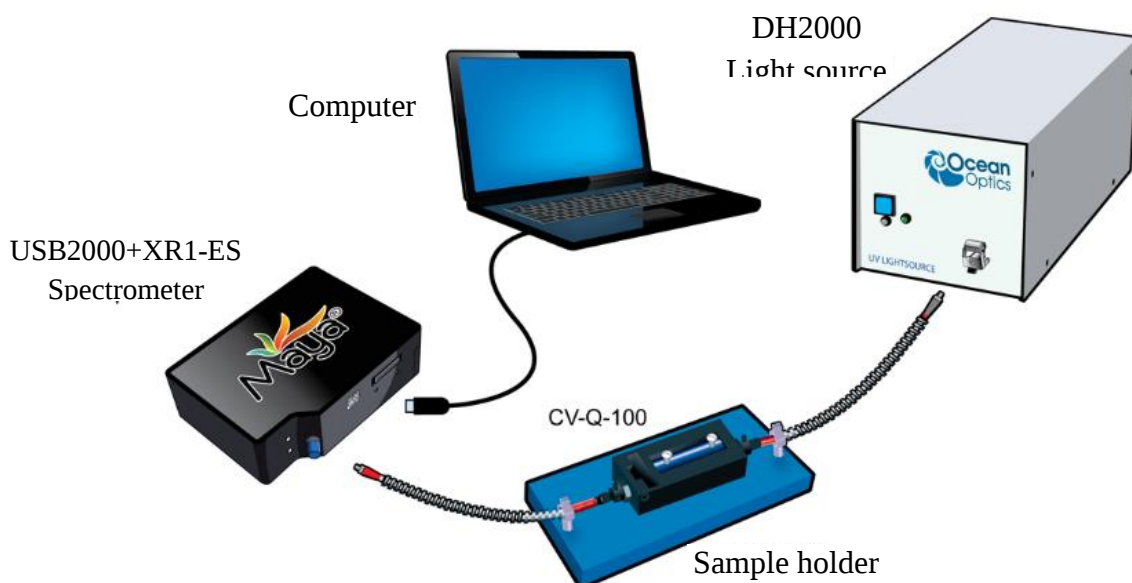
รูปที่ 3-16 เปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่ (ซ้าย) และจากเอกสารอ้างอิง (ขวา) แสดงให้เห็นว่าพลอยชนิดนี้กำเนิดจาก magmatic segregation [31]

(ข) เทคนิควัดสีพลอยด้วยเครื่องมือเชิงแสง

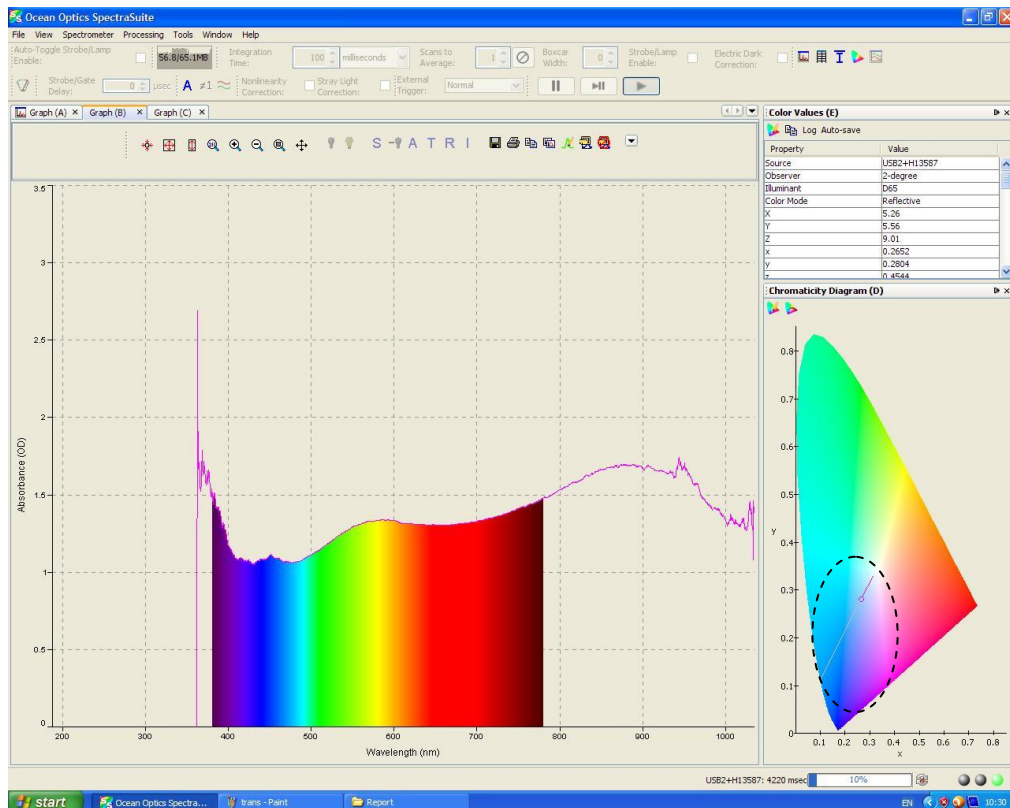
โดยที่เงื่อนไขของความสำเร็จของโครงการนี้ คือ การปรับปรุงคุณภาพสีของพลอยคอร์ันดัม หนึ่งในกระบวนการที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์หาสีมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด การวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานของ GIA ร่วมกับการวัดสีโดยตรงโดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น คณะทำงาน ได้ติดตั้งเครื่อง Optical spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics โดยใช้งบประมาณของภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ 3-17) เพื่อนำมาดัดแปลงใช้วัดสีพลอย ผลการใช้งานเป็นไปอย่างน่าพอใจ สามารถวัดได้ทั้งแบบ absorption, transmission และ reflection ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3-18 ผลการวัดสอดคล้องกับเทคนิค UV-Vis-NIR (รูปที่ 3-19)



รูปที่ 3-17 Optical Spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics นำมาดัดแปลงเพื่อใช้วัดสี (colorimeter) ของพลอยโดยตรง



รูปที่ 3-18 การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)



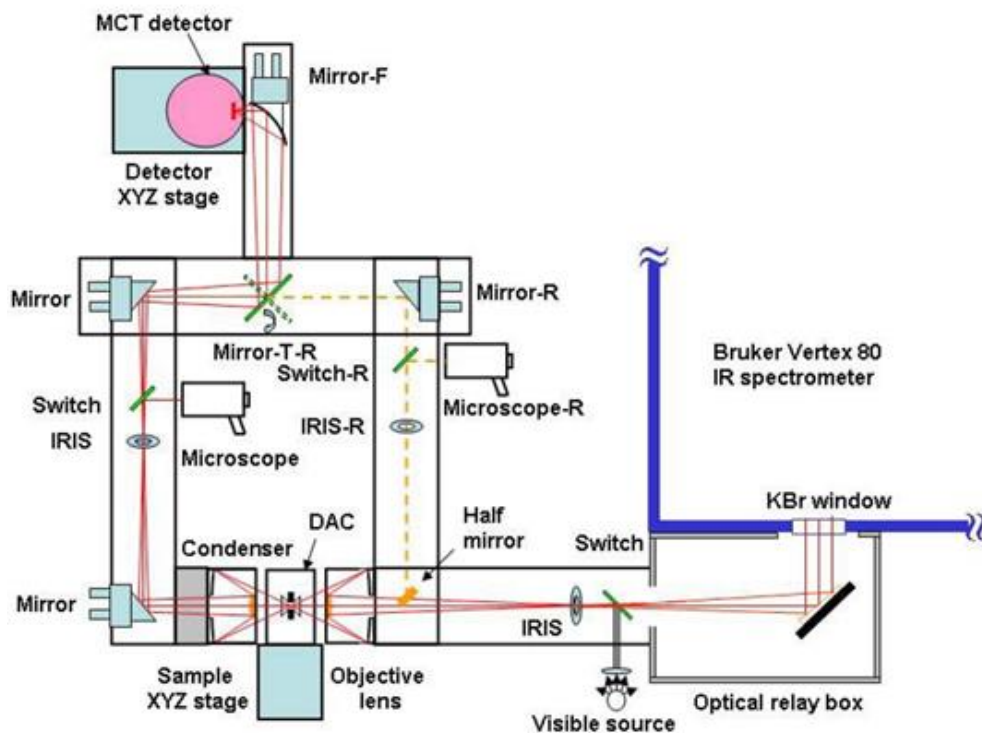
รูปที่ 3-19 กราฟ Absorbance และ Chromaticity diagram ของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่

(ค) เทคนิค FTIR

FT-IR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ โครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่นประมาณ $12800 - 10 \text{ cm}^{-1}$ สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ หลักการวิเคราะห์คือ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near Infrared ($12800-4000 \text{ cm}^{-1}$) Middle Infrared ($4000-200 \text{ cm}^{-1}$) Far Infrared ($200-10 \text{ cm}^{-1}$) ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไป จะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับค่าความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum

รูปที่ 3-20 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง FT-IR Spectroscopy คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโมมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ที่ beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อ

ลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างจะไปยังตัววัดสัญญาณที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก อัตราการสแกนวัดสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้ จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He-Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้ จะอยู่ในรูปอินเทอร์โฟแกรมถูกเก็บไว้ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง FTIR ยี่ห้อ Nicolet รุ่น 6700 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (รูปที่ 3-21)



รูปที่ 3-20 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy



รูปที่ 3-21 เครื่อง FTIR ยี่ห้อ Nicolet รุ่น 6700 ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

3.2.4 เครื่องมือตรวจสอบมลทินภายในพลอย

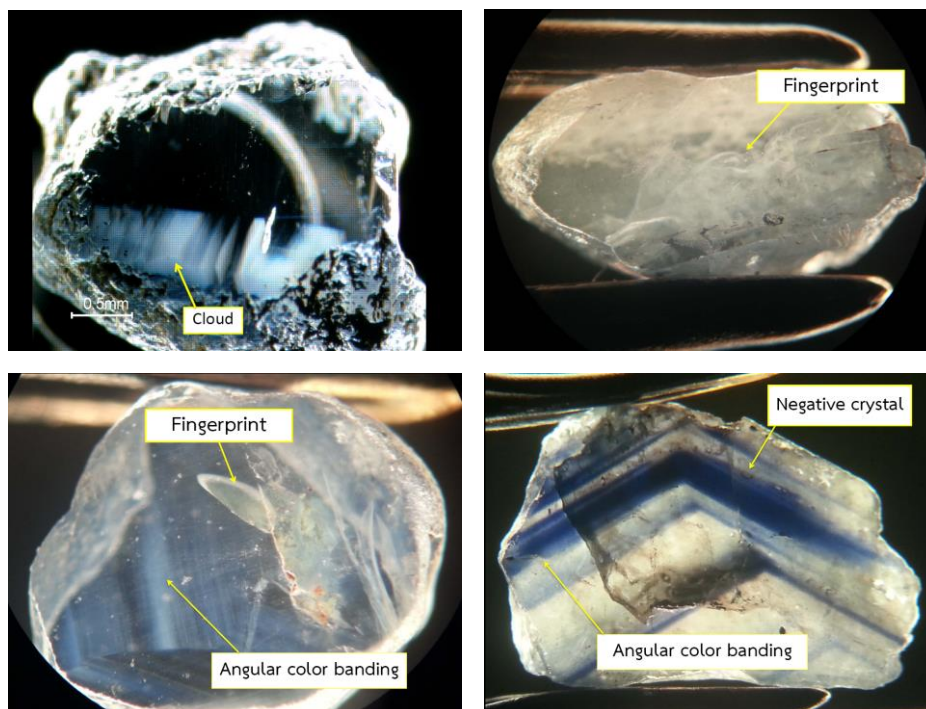
เป็นขั้นตอนที่สำคัญ และอาจบ่งชี้ถึงความสำเร็จของการพัฒนาเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพพลอยก็ได้

(ก) กล้องไมโครสโคปกำลังขยายสูงสำหรับศึกษาลักษณะมลทินด้วย

ตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อณูมณีพร้อมอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3-22 เมื่อตรวจสอบพลอยตัวอย่างพบว่า ในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินมีมลทินภายในที่สำคัญ เช่น มลทินกลุ่มหมอก (Cloud) มลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) และมลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) ดังแสดงในรูปที่ 3-23 ซึ่งมลทินเหล่านี้เป็นเครื่องบ่งชี้ว่า ตัวอย่างที่นำมาศึกษา เป็นแซปไฟร์ธรรมชาติที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 3-22 กล้องจุลทรรศน์อณูมณีพร้อมอุปกรณ์ถ่ายภาพ

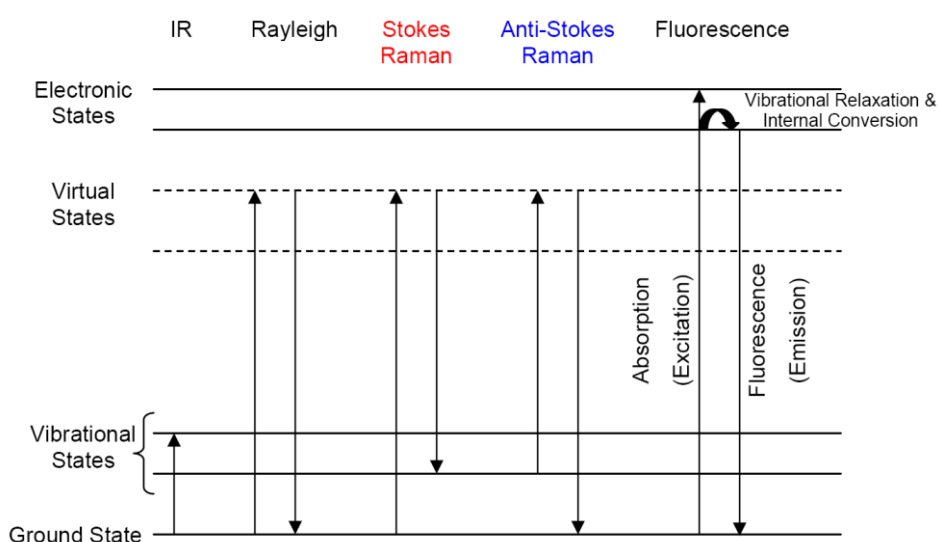


รูปที่ 3-23 มลทินชนิดต่างๆที่พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่ บันทึกภาพโดยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายต่ำ (10x)

(ข) ตรวจสอบอินคลูชันด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

รามานเป็นปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสงรูปแบบหนึ่ง ที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะเร้า นั่นคือ การที่พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลถูกชักนำให้มีสภาพขั้วหรือ polarizability เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สถานะปกติ ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า และไม่มี dipole moment ในพันธะเคมี ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (scattered light) ออกมา [32] ซึ่งการกระเจิงแสงดังกล่าว จะมีทั้งกระบวนการกระเจิงแสงแบบ elastic process ที่พลังงานแสงคงที่ และกระบวนการกระเจิงแสงแบบ inelastic process ที่แสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ ส่วนใหญ่แล้วแสงที่ตกกระทบจะเกิดการกระเจิงแสงแบบ Rayleigh scattering ซึ่งเป็นกระบวนการแบบ elastic process ในขณะที่เพียง 1 ใน 10^6 ของแสงที่ตกกระทบจะเป็นแบบรามาน หรือเป็นกระบวนการแบบ inelastic process โดยที่พลังงานแสงเปลี่ยนแปลงไปนั้น อาจจะเป็นได้ทั้งแบบเพิ่มขึ้น (anti-stoke scatter) หรือลดลง (stoke scatter) (รูปที่ 3-24) แต่ส่วนใหญ่จะเกิดแบบ stoke scatter มากกว่า สิ่งที่น่าสนใจในส่วนของการกระเจิงแบบรามาน ก็คือการผลิตต่างของพลังงาน (หรือความถี่) ของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานแสงที่กระเจิง (เรียกว่า Raman shift) จะมีค่าตรงกันกับพลังงาน (หรือความถี่) ของพันธะในการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด [32]

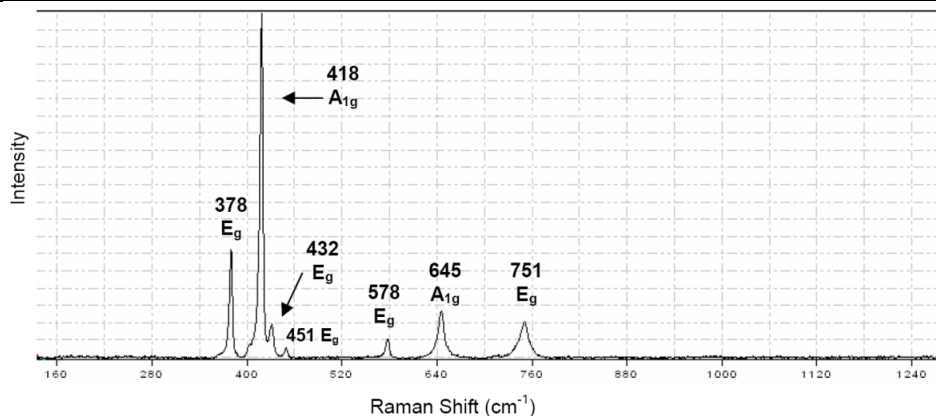
เมื่อลำแสงตกกระทบผลึก จะทำให้โมเลกุลในผลึกเกิดการสั่น ด้วยความถี่เดียวกับความถี่ของลำแสงตกกระทบ เมื่ออะตอมเกิดการสั่น อิเล็กตรอนจะถูกดึงให้ไปอยู่ในทิศทางต่างๆ มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน ส่งผลให้นิวเคลียสเกิดการแยกประจุที่เรียกว่าเกิดไดโพล นั่นคืออะตอมเกิดการโพลาไรซ์ การเปลี่ยนแปลงของการโพลาไรซ์ของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันทำให้เกิดแสง แต่การพิจารณาว่าการสั่นของโมเลกุลใดที่จะให้แสงแบบรามาน (Raman active) ขึ้นกับ polarization ของการสั่นของอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกันอยู่ [33] โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างผลึกจะเป็นตัวกำหนดชนิดของการสั่นของโมเลกุล สำหรับคอร์ันดัม ซึ่งเป็นสารประกอบอลูมิเนียมออกไซด์ (สูตรเคมี Al_2O_3) มีรูปแบบผลึกเป็นรูปผลึกแบบหกเหลี่ยม โครงสร้างผลึกแบบไตรโกนาล โดยตำแหน่งของอะตอมแสดงดังในตารางที่ 3-1 [34] จะมีโหมดที่ active สำหรับรามานจำนวน 7 โหมด คือ A_{1g} จำนวน 2 โหมด และ E_g จำนวน 5 โหมด ดังแสดงในตารางที่ 3-1 [35] ที่ตำแหน่งเรียงตามลำดับในสเปกตรัม ดังนี้ 378 (E_g), 418 (A_{1g}), 432 (E_g), 451 (E_g), 578 (E_g), 645 (A_{1g}), 751 (E_g) cm^{-1} [36] ดังแสดงในรูปที่ 3-25



รูปที่ 3-24 ไดอะแกรมแสดงระดับชั้นพลังงานของการให้แสงแบบต่างๆ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ [32]

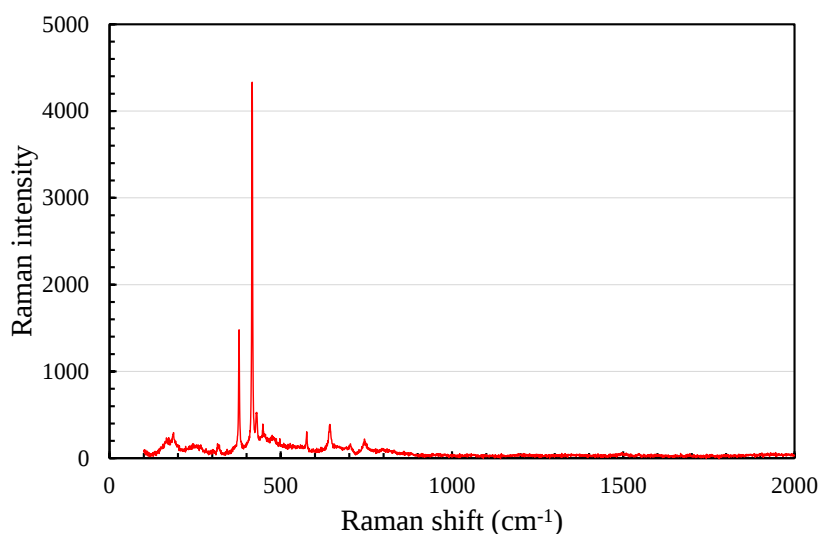
ตารางที่ 3-1 ตำแหน่งของอะตอมในผลึกคอร์รันดัม [34] และ Raman active modes ของคอร์รันดัม [35]

Atom	Atomic coordinates			Wyckoff position	Raman active modes		
	X	Y	z		Point symmetry	A_{1g}	E_g
Al	0	0	0.35216	12c	3	1	2
O	0.30624	0	0.25	18e	2	1	3

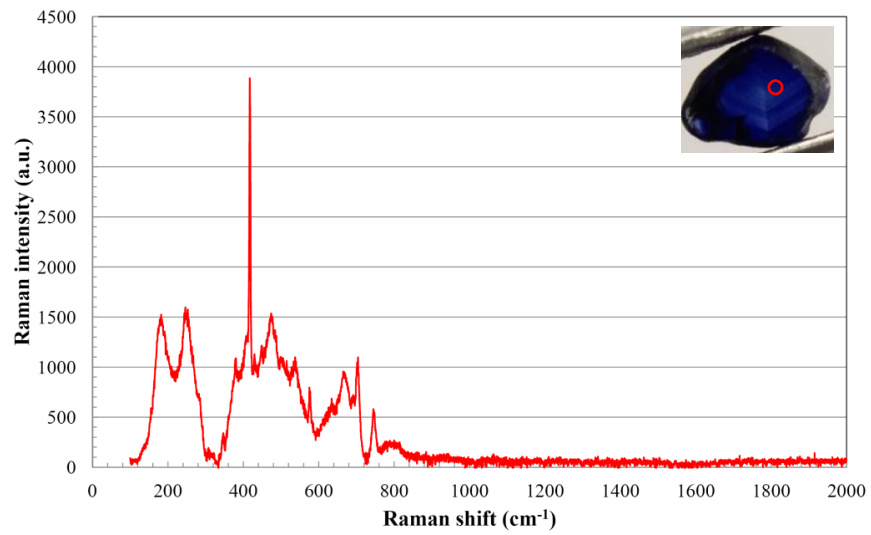


รูปที่ 3-25 สเปกตรัมรามานของคอร์รันดัมสังเคราะห์ชนิดแซปไฟร์สีเหลืองหมายเลขตัวอย่าง X080003 กระตุ้นโดยเลเซอร์ความยาวคลื่น 780 nm ในแนวสุ่ม (unoriented) พร้อมโหมดที่นิยมโดย Porto และคณะ [36]

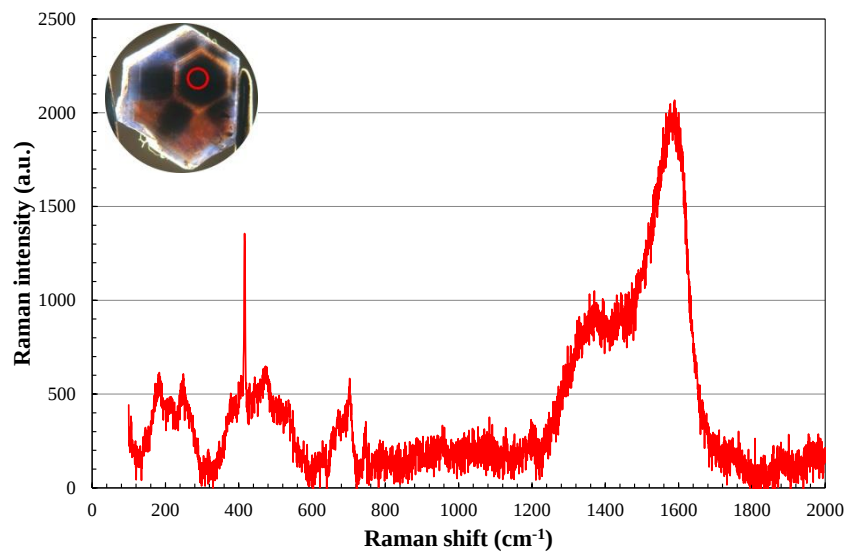
ในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องรามาน Jobin Yvon รุ่น Horiba ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นแบบ triple monochromator หรือ triple spectrometer โดยใช้ grating 3 ตัวในการกระจายแสง ซึ่ง grating มีขนาด 1800 เส้นต่อมิลลิเมตร (gr/mm) ใช้เลเซอร์สีเขียวความยาวคลื่น 532 nm เป็นตัวกระตุ้น นอกจากนั้น ยังใช้ double spectrometer เป็นตัวตัดแสง ใช้เลนส์ 50x เวลาบันทึกข้อมูล 60 วินาที/ช่วง จำนวน 2 รอบ 4 ช่วง ในการวัด รวม 8 นาที/ตัวอย่าง ใน subtractive mode เครื่องนี้มี resolution เป็น $0.5\text{-}1\text{ cm}^{-1}$ ตัวอย่างสเปกตรัมรามานแสดงดังในรูปที่ 3-26 ซึ่งเป็นตัวอย่างจากแหล่งแพร่ หมายเลข P03 มีตำแหน่งพิกัดตรงกับรายงานอ้างอิงข้างต้น สรุปได้ว่าตัวอย่างเป็นคอร์รันดัม และเมื่อนำเทคนิคนี้มาใช้ตรวจสอบแบบโฟกัสเฉพาะจุด สามารถตรวจพบอินคลูชันหลายชนิด เช่น Feldspar (รูปที่ 3-27) และ Graphite (รูปที่ 3-28) เป็นต้น



รูปที่ 3-26 สเปกตรัมรามานของแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข P03



รูปที่ 3-27 สเปกตรัมรามานของอินคลูชันชนิด Feldspar พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่

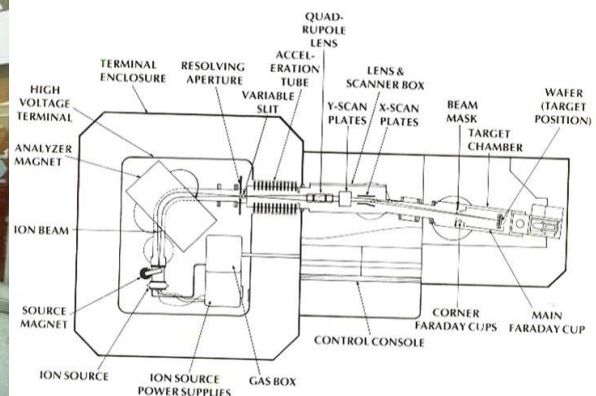


รูปที่ 3-28 สเปกตรัมรามานของมลทินชนิด Graphite พบในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่

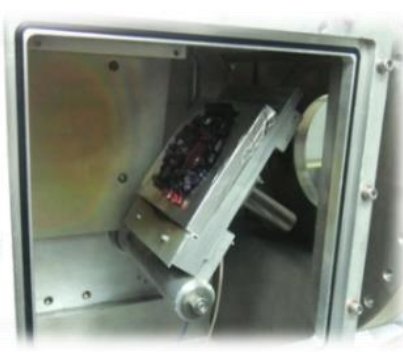
3.2.5 เครื่องมือสำหรับปรับปรุงคุณภาพพลอย

(ก) เครื่องแวนไอออนอิมพลานเตอร์

เครื่องแวนไอออนอิมพลานเตอร์แสดงดังรูปที่ 3-29 ผลิตโดยบริษัท Varian Semiconductor Equipment ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นเครื่องเร่งลำไอออนในแนวนอน โดยที่แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) สามารถผลิตไอออนได้หลายชนิด จากสารตั้งต้นทั้งที่เป็นก๊าซและวัตถุที่เป็นผง ลำไอออนที่ถูกผลิตออกมาจะถูกดึง (extract) ด้วยอิเล็กโทรดไฟฟ้าให้วิ่งผ่านแม่เหล็กคั่นกรอง (analyzer magnet) แล้ววิ่งต่อไปเข้าสู่ท่อเร่งอนุภาค (acceleration tube) ที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานของไอออนได้ด้วยศักย์ไฟฟ้าในช่วง 25-200 กิโลโวลต์ ต่อจากนั้นลำไอออนจะวิ่งผ่านระบบกวาดลำไอออน (x-scan และ y-scan) ทำให้พื้นที่ที่ถูกยิงด้วยไอออนตรงตำแหน่งเป้า (target position) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. และมีความเข้มไอออนกระสุนสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ เดิมไอออนอิมพลานเตอร์รุ่นนี้ ถูกออกแบบสำหรับใช้ในการได้ปสารกึ่งตัวนำ ซึ่งไม่ต้องการโดสสูงมากนัก ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้พัฒนาให้ใช้งานพลอยซึ่งต้องการโดสที่สูงกว่าได้ ขณะนี้ติดตั้งในห้องปรับอากาศขนาด กว้าง x ยาว x สูง = 4 x 6 x 2.5 เมตร



(ก)

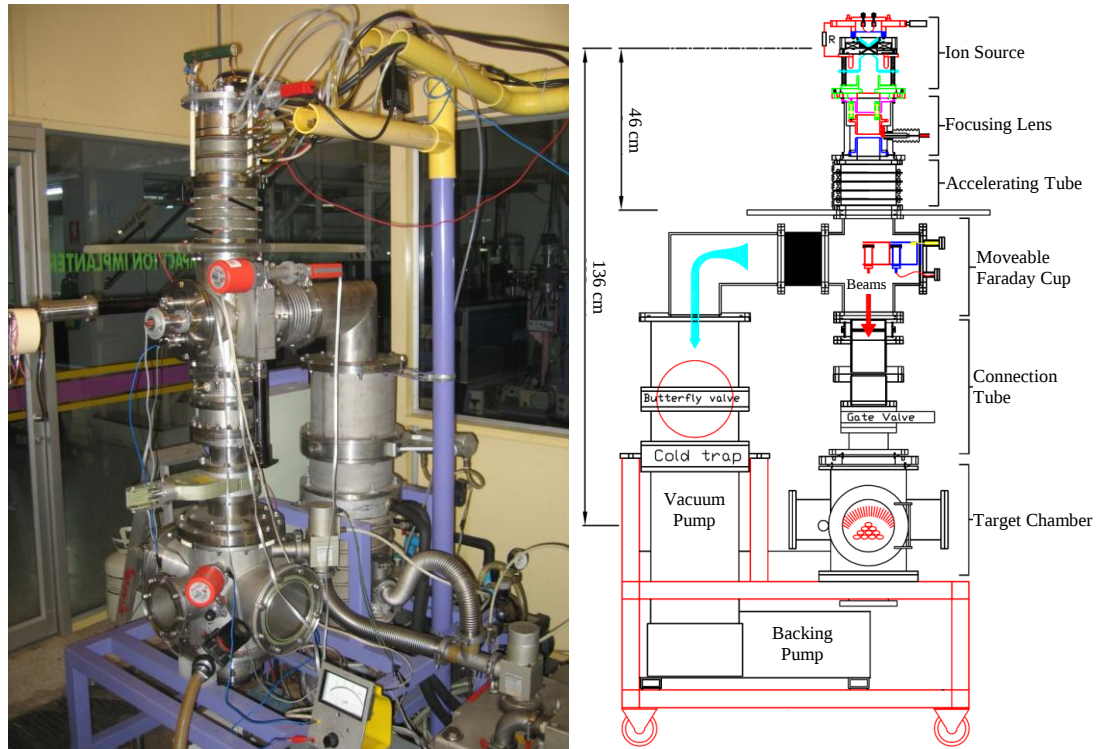


(ข)

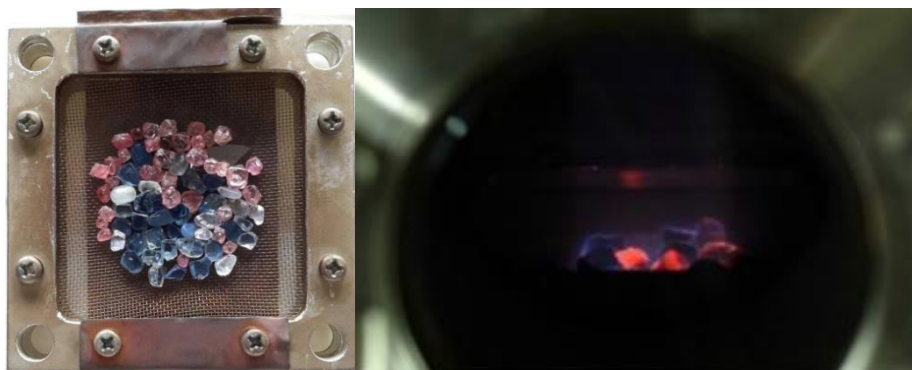
รูปที่ 3-29 (ก) ภาพถ่ายและแผนภาพของเครื่องแวนไอออนอิมพลานเตอร์ (ข) วิธีการจับยึดเม็ดพลอยต่อการยิงไอออน 1 ครั้ง และลักษณะการติดตั้งฐานรองบนแท่นเป้าหมายภายในห้องเป้า (target chamber) ที่ถูกปรับตั้งขึ้นเพื่อเตรียมยิงด้วยลำไอออน

(ข) เครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัด

เป็นเครื่องที่ออกแบบ-สร้างขึ้นใช้เองที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีศักย์ไฟฟ้าเร่งสูงสุด 100 กิโลโวลต์ สร้างไอออนไนโตรเจนได้ที่กระแสสูงสุดประมาณ 1 มิลลิแอมป์วัดที่ฐานวาวเป้า [25] เครื่องที่สร้างขึ้นนี้ จัดวางตัวในแนวตั้ง ความยาวทั้งระบบไม่ถึง 2 เมตร ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron ท่อเร่งอนุภาค สถานีทดสอบลำไอออน เครื่องกวาดลำไอออนสนามไฟฟ้า (ปัจจุบันไม่ได้ใช้) และห้องยิงลำไอออน ลำไอออนจะวิ่งจากบนลงล่าง เพื่อความสะดวกในการจัดวางชิ้นงาน ที่มีทั้งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันหลากหลายรูปแบบ มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 3-30



(ก)

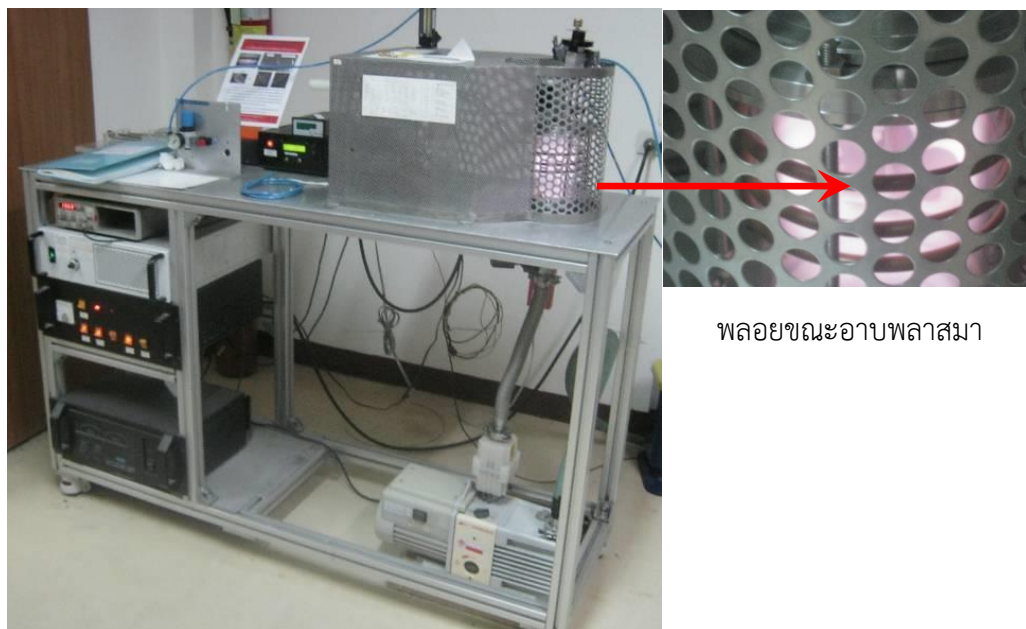


(ข)

รูปที่ 3-30 (ก) ภาพถ่ายและแผนภาพของเครื่องไอออนอิมпланเตอร์ต้นแบบ สำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยเชิงพาณิชย์ที่สร้างขึ้นใช้งานเอง (ข) ตะแกรงใส่พลอยขนาด 10 × 10 ซม. และภาพถ่ายเม็ดพลอยบนตะแกรงภายในห้องเป้า ขณะถูกระดมยิงด้วยไอออนที่วิ่งเป็นลำลงมาจากด้านบน ในภาพจะเห็นลักษณะการเรืองแสงที่แตกต่างกันของพลอยแต่ละชนิด

(ค) เครื่อง *plasma cleaning*

คณะผู้วิจัยได้ปรับปรุงเครื่อง Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ 3-31) ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลอยได้ โดยอาศัยเครื่องมือนี้สำหรับทำความสะอาดพลอย สามารถเลือกใช้พลาสมาของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ได้ เครื่องมือนี้เป็นระบบผลิตพลาสมาแบบความดันต่ำ (ประมาณ 1×10^{-2} 托ร์) ที่มีห้องประยุกต์พลาสมาขนาด 1 ลิตร เพื่องานวิจัยและงานประยุกต์พลาสมาแก๊วสดูทุกรูปแบบและจากก๊าซทุกประเภท สร้างพลาสมาด้วยคลื่นวิทยุ (13.57 MHz) สามารถปรับความเข้มข้นของพลาสมาได้ โดยที่เมื่อก๊าซถูกทำให้เป็นพลาสมาซึ่งจะกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุ ประจุของพลาสมาจะมีปฏิกิริยา (interaction) กับสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานนั้น เช่น non-visible oil และ อะตอมเล็กๆ อื่นๆ ที่ยึดเหนี่ยวอย่างไม่แข็งแรง (dangling bond) บนผิวตัวอย่าง ทำให้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้หลุดออก ผลพลอยได้คือประจุของพลาสมาทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่บริเวณผิวของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามชนิดของพลาสมานั้น



รูปที่ 3-31 Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร

3.3 ระเบียบวิธีวิจัย

3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

(ก) ขั้นตอนการตรวจสอบพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติน้ำเงินอมเขียวเบื้องต้น

i) การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นจากตัวอย่างพลอยดิบ แล้วแบ่งตัวอย่างพลอยเป็นสีกลุ่มต่างๆ จากแหล่งต่างๆ จาก 500 ตัวอย่าง

- หาค่าดัชนีหักเหและความถ่วงจำเพาะ
- ตรวจสอบสีจากชุดเทียบสีมาตรฐาน (GIA gemset) ของ GIA (Gemological Institute of America)
- ตรวจสอบลักษณะของพลอย ดำหนิภายใน และ ภายนอกต่างๆ ด้วยกล้องไมโครสโคป

ii) การตรวจสอบสมบัติทางแสง

- วัดสีเทียบกับตัวอย่างโดยเครื่องวัดสี (colorimeter spectrometer)
- ศึกษาการดูดกลืนแสงโดยเครื่องยูวีวิสิเบิลเนียร์อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (UV-visible spectrometer)
- วิเคราะห์ชนิดของแร่มลทิน และปริมาณธาตุร่องรอย (trace elements) ด้วยเครื่องเอนเนออีดีสเพอสิฟเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ (EDXRF)
- ศึกษาลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม และหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบสเปกตรัม

(ข) ขั้นตอนการตรวจสอบพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคระดับสูง (เฉพาะบางตัวอย่าง)

- ใช้เทคนิค Particle Induced X-ray Emission (PIXE) หาปริมาณธาตุให้สีต่างๆ
- วิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสงของพลอยด้วยเทคนิค Ionoluminescence (IL)

(ค) ขั้นตอนการเชื่อมโยงลักษณะภายนอกกับธาตุร่องรอยที่อยู่ภายใน

พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของมลทินกับการให้พลังงาน และชนิดของไอออนมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของมลทินต่างๆ ขั้นตอนนี้จึงจะมีการจัดทำฐานข้อมูลเชื่อมโยงระหว่างลักษณะภายนอกและธาตุร่องรอยที่มีอยู่ภายใน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการปรับปรุงคุณภาพต่อไป

(ง) ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์สถานะทางไอออนของธาตุเจือ

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ และ $\text{Ti}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$ ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

(จ) ขั้นตอนการแบ่งกลุ่มตัวอย่าง

แบ่งกลุ่มพลอยตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม สำหรับนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน และนำไปปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคลำไอออน

(ฉ) ขั้นตอนการทดลองด้วยความร้อน

โดยการเผาด้วยเตาไฟฟ้า เตาแก๊ส และเตาน้ำมัน ทั้งนี้จะตรวจสอบลักษณะการดุดกิ้นแสงที่เปลี่ยนไปของทุกช่วงอุณหภูมิ

(ช) ขั้นตอนการทดลองด้วยลำไอออน

ตามชนิดของไอออน โดยแบ่งเป็นออกซิเจนไอออนอิมพลานเตชัน และไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน

- ไอออนอิมพลานเตชันแบบบีมสแกนด้วยไอออนในเรอ์นิกิโวลีเล็กรอนโวลต์ โดยใช้เครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์
- ไอออนอิมพลานเตชันแบบบีมไม่สแกนด้วยไอออนในเรอ์นิกิโวลีเล็กรอนโวลต์ โดยใช้เครื่องคอมแพ็คไอออนอิมพลานเตอร์
- ตรวจสอบพร้อมบันทึกการเพิ่มและลดของสีและความแวววาวของพลอย

(ซ) ขั้นตอนการปรับปรุงด้วยการเพิ่มความประกายของพลอย (luster)

- ทดสอบการเพิ่มความโปร่งแสงด้วยการให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยไนโตรเจนเหลว

(ณ) ขั้นตอนการเปรียบเทียบการตรวจและวิเคราะห์พลอยหลังการปรับปรุงคุณภาพ

- วิเคราะห์ชนิดของแร่ลทิน และปริมาณธาตุร่องรอย (trace elements) ด้วยเครื่องเอนเนออีดีสเพอสิฟเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์(EDXRF)
- การวิเคราะห์ปริมาณธาตุร่องรอย (trace elements) เฉพาะจุดด้วยเทคนิคพาร์ติเคิลอินดิวเอ็กซ์เรย์อิมิสชัน Particle Induced X-ray Emission (PIXE)
- การวิเคราะห์รูปแบบการเปล่งแสงของพลอยด้วยเทคนิคไอโอโนลูมิเนสเซนส์ Ionoluminescence (IL)
- การตรวจวิเคราะห์ปริมาณ Fe^{2+}/Fe^{3+} และ Ti^{3+}/Ti^{4+} ด้วยเทคนิค X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)

(ญ) การปรับปรุงคุณภาพผิวของพลอยด้วยเทคนิคทางพลาสมา

การทดลองเบื้องต้นพบว่า การใช้เทคนิคพลาสมามีส่วนทำให้ผิวของพลอยมีความสะอาดมากขึ้น การทดลองในส่วนนี้จะทดลองกับพลอยที่เจียรไนแล้ว

- การศึกษาผลของพลาสมาชนิดต่างๆ ได้แก่ อาร์กอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ที่มีต่อคุณภาพผิวของพลอย
- การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างผลของชนิดไอออนอิมพลานเตชันกับเทคนิคทางพลาสมา ที่มีต่อความวาว และความเรียบที่เพิ่มขึ้นของผิวพลอย

(ฎ) ขั้นตอนการประเมินผลลำไอออนที่มีต่อแชปไฟร์

- เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้เทคนิคให้ความร้อนและการใช้ลำไอออน
- จัดทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของพลอย จากแหล่งต่างๆ
- จัดทำเป็นเครื่องประดับเพื่อดูความเป็นไปได้ทางธุรกิจ

- การทดลองในกลุ่มตัวอย่างที่มากขึ้นเพื่อหาข้อสรุปเชิงสถิติ
- (ฎ) ขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์ความแตกต่างของพลอยสดและพลอยผ่านกระบวนการลำไออน
- การตรวจสอบหลักฐานเชิงวิทยาศาสตร์พลอยที่ผ่านกระบวนการลำไออน จะใช้เทคนิคการวัดปริมาณไอออนที่เข้าไปฝังตัวภายในพลอย
- (จ) การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัย
- มูลค่าจากการใช้ประโยชน์ (use value) จากงานวิจัยโดยตรง (direct use value) โดยคิดแยกกลุ่มน้ำหนักรและแหล่งพลอย ใช้ต้นทุนราคาพลอย + ค่าเช่าเหมาใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์วันละ 8,500 บาท เทียบกับมูลค่าพลอยหลังทดลอง
 - มูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ (non-use value) เช่น มูลค่าจากการศึกษาพัฒนานักวิจัย การสร้างเทคโนโลยีใหม่ การสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - มูลค่าเผื่อที่จะใช้ประโยชน์ (option value) เป็นมูลค่าของการเป็นทางเลือกของผู้ประกอบการที่เป็นทางเลือก หากพลอยไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพแบบอื่นได้หรือจะเก็บไว้ใช้ในอนาคต
- (ซ) ขั้นตอนการสรุปและเผยแพร่่งานวิจัย
- เปรียบเทียบการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงด้วยความร้อนและด้วยลำไออน
 - สรุปความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน ในพลอยแซฟไฟร์น้ำเงินอมเขียว โดยแบ่งกลุ่มตามชนิดตำหนิภายใน-ภายนอก แร่ลทินและปริมาณของธาตุเจือ
 - สรุปการตรวจสอบด้วยหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ สำหรับพลอยที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงด้วยลำไออน
 - จดสิทธิบัตรทั้งในและต่างประเทศ
 - ประเมินผลงานภาพรวม
 - เผยแพร่ผลงานวิจัยในรูปของการตีพิมพ์ในวารสารระดับชาติ และระดับนานาชาติ
 - จัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการสำหรับผู้ประกอบการในภาคเอกชน
 - นำเสนอรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

3.3.2 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรมในระหว่างโครงการและผู้รับผิดชอบ แสดงดังในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 กิจกรรมในระหว่างโครงการและผู้รับผิดชอบ

กิจกรรม	ผู้ปฏิบัติ	เดือนที่มีกิจกรรมและภาระงาน (วันเต็มเวลา)												รวม
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. การตรวจและวิเคราะห์ฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว	ดวงแข		8	8	10									87
	เสวต		8	8										
	ปัญจวรรณ	10	5	5	5									
	บงกช	5	5	5	5									
2. การเชื่อมโยงสมบัติเชิงแสง และมลทินที่พบ	ดวงแข			10	10									40
	ปัญจวรรณ			5	5									
	บงกช			5	5									
3. การปรับปรุงคุณภาพฟลอยด้วยความร้อนแบบออกซิเดชันและรีดักชัน	ปัญจวรรณ				10	10	10	10						40
4. การปรับปรุงคุณภาพฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคลำไอออน	ดวงแข				10	10	10	10	10					100
	เสวต				10	10	10	10	10					
5. การปรับปรุงคุณภาพผิวของฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคทางพลาสมา	ดวงแข					10	10	10	10	10				100
	เสวต					10	10	10	10	10				
6. การตรวจและวิเคราะห์ฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวหลังการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 เทคนิค	ดวงแข						8	8	8	8	8			86
	เสวต									8	8			
	ปัญจวรรณ							5	5	5				
	บงกช							5	5	5				
7. การตรวจวิเคราะห์ความแตกต่างของฟลอยสดและฟลอยที่ผ่านกระบวนการลำไอออน	ดวงแข								5	5	5	5		60
	เสวต								10	10	10	10		
8. การขึ้นรูปฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวเพื่อให้เป็นเครื่องประดับ	ดวงแข									10	10	10	10	60
	เสวต											5	5	
	บงกช											5	5	
9. การวิเคราะห์ผลและการเขียนรายงาน	ดวงแข										5	5	5	60
	เสวต										5	5	5	
	ปัญจวรรณ										5	5	5	
	บงกช										5	5	5	

รวมภาระงาน	ดวงแข	261 วัน	เสวต	197 วัน
	ปัญจวรรณ	105 วัน	บงกช	70 วัน
รวมทั้งสิ้น		633 คน-วัน (เต็มเวลา)		

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการคัดเลือกและเตรียมตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน

4.1.1 การคัดเลือกตัวอย่างที่นำมาศึกษาและแหล่งที่นำมาศึกษา

ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นพลอยจากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย ทั้งสิ้น 4 แหล่ง จาก 3 จังหวัด ได้แก่ แพร่ กาญจนบุรี และ จันทบุรี และยังมีแหล่งจากต่างประเทศเพื่อนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ออสเตรเลีย และ มาดากัสการ์ รายละเอียดพอสรุปได้ดังนี้

(ก) พลอยจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่

พลอยจากแหล่งแพร่ มีรวมทั้งสิ้น 47 ตัวอย่าง ขนาดตั้งแต่ 0.12 ct ถึง 4.29 ct ดังแสดงในรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 พลอยจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่

(ข) พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี

รวมทั้งสิ้น 10 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-2 และ รูปที่ 4-3) ขนาดตั้งแต่ 2.57 ct ถึง 4.62 ct



รูปที่ 4-2 พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ชุดที่ 1



รูปที่ 4-3 พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ชุดที่ 2

(ค) พลอยจากแหล่งจันทบุรี แยกย่อยอีกเป็นสองแหล่งคือ

i) แหล่งตกพรหม

รวมทั้งสิ้น 57 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-4 และ รูปที่ 4-5) ขนาดตั้งแต่ 0.21 ct ถึง 3.52 ct



รูปที่ 4-4 พลอยจากแหล่งตกพรหม ชุดที่ 1



รูปที่ 4-5 พลอยจากแหล่งตกพรหม ชุดที่ 2

ii) แหล่งบางกะจะ

รวมทั้งสิ้น 84 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-6 และ รูปที่ 4-7) ขนาดตั้งแต่ 0.47 ct ถึง 15.27 ct



รูปที่ 4-6 พลอยจากแหล่งบางกะจะ ชุดที่ 1



รูปที่ 4-7 พลอยจากแหล่งบางกะจะ ชุดที่ 2

4.1.2 การเตรียมตัวอย่างพลอย

ตัวอย่างพลอยที่นำมาใช้ในโครงการฯ เป็นตัวอย่างที่จัดหามาจากแหล่งพลอยต่างๆ จากหลายแหล่งภายในประเทศไทย เพื่อต้องการเปรียบเทียบระหว่างการเพิ่มคุณภาพด้วยการเผา และการเพิ่มคุณภาพด้วยเทคโนโลยีไอออนบีม จึงต้องมีการแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่มที่เหมือนกัน ตัวอย่างที่นำมาทดลองส่วนใหญ่เป็นตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเผา พลอยบางแหล่งค่อนข้างสกปรกจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดพลอยเสียก่อน เพื่อขจัดสิ่งสกปรกและคราบต่างๆ ออกไป รวมถึงพลอยบางตัวอย่างค่อนข้างทึบแสง ไม่สามารถมองเห็นสีและลักษณะภายในพลอยได้ชัดเจน จึงต้องมีการขัดเปิดหน้าเรียบพลอยทุกเม็ดก่อนเพื่อศึกษาลักษณะต่างๆ ภายในของพลอยได้อย่างชัดเจน สามารถทำการจัดกลุ่มสี ในแต่ละกลุ่มสีทำการจับคู่พลอยที่มีสีใกล้เคียงกันเพื่อนำไปทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการเผาและวิธีการไอออนบีม เพื่อให้ตัวอย่างที่นำมาทดลองมีความใกล้เคียงกันมากที่สุด กรณีที่พลอยมีขนาดใหญ่ จะใช้วิธีตัดแบ่งครึ่งในแนวตั้งฉากกับแกน C ยกเว้นเม็ดที่มีลักษณะแบนจะแบ่งครึ่งในแนวนอนกับแกน C วิธีการเตรียมตัวอย่างพลอยพอสรุปได้ดังนี้

(ก) ขั้นตอนในการทำความสะอาดพลอย

การทำความสะอาดพลอยมีขั้นตอนดังนี้

- i) แช่พลอยในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดแร่ที่อยู่ในกลุ่มซิลิเกต ฟอสเฟต และคาร์บอเนต (เช่นแคลไซต์) หลังจากนั้นเทกรดออก แล้วล้างพลอยด้วยน้ำกลั่น
- ii) แช่พลอยอีกครั้งในกรดฟลูออริก (HF) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดแร่ที่อยู่ในกลุ่มซิลิเกต (เช่น เซอร์คอน) และคราบสนิมเหล็กที่ติดอยู่ที่ผิวพลอยออก หลังจากนั้นเทกรดออก แล้วล้างพลอยด้วยน้ำกลั่น
- iii) แช่พลอยในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำมาเช็ดให้แห้ง

(ข) การคัดเลือกตัวอย่างพลอย

หลังจากที่ทำความสะอาดตัวอย่างพลอยแล้ว คัดเลือกตัวอย่างที่สามารถนำมาใช้ในโครงการฯ

- i) โดยเลือกตัวอย่างที่มีสีเข้มและแสดงลักษณะเด่นต่างๆ เช่นมีแถบสีน้ำเงินเข้ม แกนกลางสีน้ำเงินเข้ม มีหย่อมสีน้ำเงิน หรือมีบริเวณที่เป็นสีน้ำตาล
- ii) นอกจากสีและลักษณะเด่นแล้ว การเลือกตัวอย่างได้เลือกตัวอย่างที่ไม่มีรอยแตกร้าวภายใน หรือมีรอยแตกละเอียดที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้พลอยแตกเมื่อนำไปเผา
- iii) นำตัวอย่างที่เลือกไว้ ขัดให้มีหน้าเรียบในแนวตั้งฉากกับแกน C หนึ่งหน้า เพื่อให้เห็นสีและลักษณะต่างๆ ภายในของพลอยได้ชัดเจน และทำให้สามารถแยกเป็นกลุ่มต่างๆ ได้ 7 กลุ่ม ตามสีดังนี้ (รูปที่ 4-8)

กลุ่มที่ 1 มีสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด	ใช้รหัส DkB	:	Dark Blue
กลุ่มที่ 2 มีแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม	ใช้รหัส DkC	:	Dark Core
กลุ่มที่ 3 มีแกนกลางสีขาวขุ่น	ใช้รหัส WtC	:	White core
กลุ่มที่ 4 แสดงแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด	ใช้รหัส Zn	:	Zoning
กลุ่มที่ 5 แสดงแถบสีน้ำเงิน แต่ไม่เด่นชัด	ใช้รหัส SLZn	:	Slightly Zoning
กลุ่มที่ 6 พลอยมีลักษณะทึบแสง	ใช้รหัส Op	:	Opaque
กลุ่มที่ 7 พลอยมีสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน	ใช้รหัส Pt	:	Patch



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Dark Blue (DkB)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Dark Core (DkC)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม White Core (WtC)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Zoning (Zn)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Slightly Zoning (SLZn)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Opaque (Op)



ตัวอย่างพลอยกลุ่ม Patch (Pt)

รูปที่ 4-8 ตัวอย่างพลอยในแต่ละกลุ่มสีทั้ง 7 กลุ่ม

(ค) การใส่รหัสตัวอย่างพลอย

i) อักษรย่อประจำแต่ละกลุ่มสี

มีการระบุแหล่งที่มาโดยใช้ตัวย่อดังนี้

Phr	:	Phrae	แพร่
Kc	:	Kanchanaburi	กาญจนบุรี
Tp	:	Tokprom	ตกรพรหม จันบุรี
Bk	:	Bangkacha	บางกะจะ จันทบุรี

ii) หมายเลขตัวอย่าง

ในแต่ละหมายเลขตัวอย่างจะมีการใส่ลำดับหมายเลข _1 และ _2 แสดงถึงตัวอย่างที่มีความคล้ายคลึงกัน หรือตัวอย่างเดียวกันที่มีการตัดแบ่งออกมา โดยที่หมายเลข _1 หมายถึงตัวอย่างที่นำมาทดลอง โดยการเผา ส่วน หมายเลข _2 หมายถึงตัวอย่างที่นำไปทดลองโดยวิธีไอออนบีม

iii) รหัสตัวอย่างพลอย

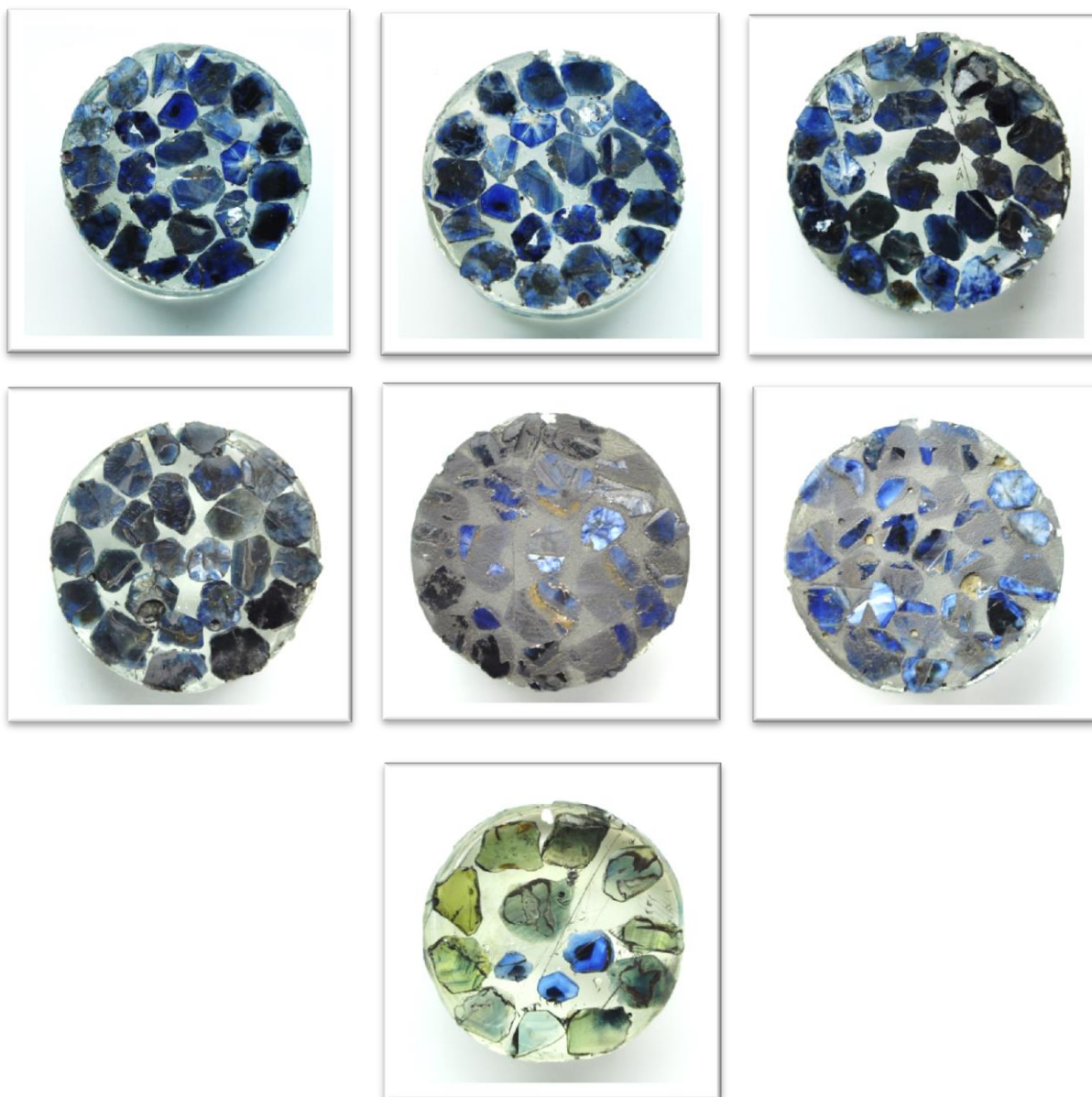
มีรูปแบบการเขียนเรียงลำดับดังนี้

ชื่อแหล่งที่มา ลักษณะเด่น หมายเลขตัวอย่าง

เช่น TpDkB 01_1 หมายถึง ตัวอย่างที่มาจากแหล่งตกรพรหม สีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด หมายเลข 01 เป็นตัวอย่างที่นำไปเผา

(ง) การขีดหน้าเรียบพลอย

การขีดหน้าเรียบพลอย เป็นการทำด้านหนึ่งของพลอยให้เรียบ และสามารถศึกษาและเปรียบเทียบลักษณะภายในของตัวอย่างพลอยได้ชัดเจนขึ้น โดยเลือกขีดตามแนวตั้งฉากแกน C หากตัวอย่างที่ต้องการขีดหน้าเรียบมีขนาดเล็ก จะใช้วิธีหล่อลงเบ้าเรซินเพื่อช่วยต่อการถือตัวอย่างในขณะที่ทำการขีดหน้าเรียบ (รูปที่ 4-9)



รูปที่ 4-9 การหล่อพลอยเข้าเบ้าเรซินเพื่อทำการขัดหน้าเรียบ

4.1.3 สรุปลอยตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัย

พลอยที่นำมาใช้ในงานวิจัยจากแหล่งต่างๆ มีลักษณะเด่น ดังนี้

(ก) แซปไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่

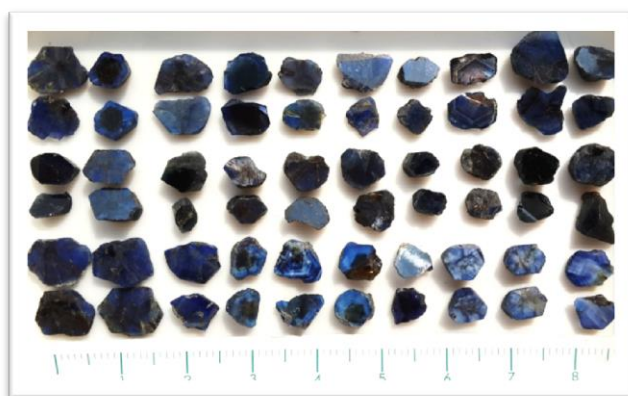
ตัวอย่างส่วนใหญ่ค่อนข้างสกปรก ทึบแสง จำนวน 47 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างขนาดเล็กที่ไม่สามารถผ่าครึ่งได้จำนวน 14 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-10) เป็นตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ที่สามารถตัดครึ่งตามแนวตั้งฉากแกน C ได้ 33 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-11) รวมตัวอย่างที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 80 ตัวอย่าง สามารถแบ่งตัวอย่างได้ 7 กลุ่มดังนี้

1. PhrDkB จำนวน 6 ตัวอย่าง รหัส PhrDkB 01_1 ถึง PhrDkB 03_2
2. PhrDkC จำนวน 44 ตัวอย่าง รหัส PhrDkC 01_1 ถึง PhrDkC 22_2
3. PhrZn จำนวน 4 ตัวอย่าง รหัส PhrZn 01_1 ถึง PhrZn 02_2

4. PhrSlZn จำนวน 2 ตัวอย่าง รหัส PhrSlZn 01_1 ถึง PhrSlZn 01_2
5. PhrWtC จำนวน 6 ตัวอย่าง รหัส PhrWtC 01_1 ถึง PhrWtC 03_2
6. PhrPt จำนวน 16 ตัวอย่าง รหัส PhrPt 01_1 ถึง PhrPt 08_2
7. PhrOp จำนวน 2 ตัวอย่าง รหัส PhrOp 01_1 ถึง PhrOp 01_2



รูปที่ 4-10 พลอยจากแหล่งอำเภอด่นชัย จังหวัดแพร่ที่ไม่ได้ตัดแบ่งครึ่ง



รูปที่ 4-11 พลอยจากแหล่งอำเภอด่นชัย จังหวัดแพร่จำนวน 33 ตัวอย่าง ที่นำมาตัดแบ่งครึ่งตามแนวตั้งฉากแกน C

(ข) แซปไฟร์จากแหล่งกาญจนบุรี

ตัวอย่างส่วนใหญ่ค่อนข้างใส มีสีน้ำเงินเป็นบางหย่อม จำนวน 10 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่และค่อนข้างแบน จึงต้องตัดแบ่งครึ่งตามแนวแกน C จำนวน 10 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 20 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-12) แบ่งตามกลุ่มตัวอย่างได้ 2 กลุ่มดังนี้

1. KcPt จำนวน 16 ตัวอย่าง รหัส KcPt 01_1 ถึง KcPt 08_2
2. KcOp จำนวน 4 ตัวอย่าง รหัส KcOp 01_1 ถึง KcOp 02_2



รูปที่ 4-12 พลอยจากแหล่งกาญจนบุรี ที่นำมาตัดแบ่งครึ่งตามแนวตั้งฉากแกน C

(ค) แซปไฟร์จากแหล่งจันทบุรี

แบ่งย่อยได้อีกเป็นสองแหล่งดังนี้

i) แหล่งตกรพรหม

ตัวอย่างส่วนใหญ่มีสีน้ำเงินเข้ม จำนวน 57 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-13 และรูปที่ 4-14) เป็นตัวอย่างที่มีรูปร่างยาวตามแนวแกน C จึงตัดแบ่งครึ่งในแนวตั้งฉากแกน C จำนวน 3 ตัวอย่าง รวมตัวอย่างที่ทำการศึกษาทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง แบ่งตามกลุ่มตัวอย่างได้เป็น 5 กลุ่มตัวอย่าง ดังนี้

1. TpDkB จำนวน 22 ตัวอย่าง รหัส TpDkB 01_1 ถึง TpDkB 11_2
2. TpDkC จำนวน 6 ตัวอย่าง รหัส TpDkC 01_1 ถึง TpDkC 03_2
3. TpZn จำนวน 12 ตัวอย่าง รหัส PhrZn 01_1 ถึง PhrZn 06_2
4. TpSLZn จำนวน 6 ตัวอย่าง รหัส TpSLZn 01_1 ถึง TpSLZn 03_2
5. TpPt จำนวน 14 ตัวอย่าง รหัส TpPt 01_1 ถึง TpPt 07_2



รูปที่ 4-13 พลอยจากแหล่งตกรพรหมกลุ่มน้ำเงิน นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ



รูปที่ 4-14 พลอยจากแหล่งตกรพรหมกลุ่มน้ำเงิน-เขียว นำมาคัดเลือกเข้าสู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ

ii) แหล่งบางกะจะ

ตัวอย่างส่วนใหญ่มีสีน้ำเงินอมเขียวและแสดงแถบสี จำนวน 84 ตัวอย่าง (รูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16) สามารถจับคู่พลอยที่มีสีใกล้เคียงกันได้ทั้งหมดจึงไม่ทำการตัดแบ่งตัวอย่าง แบ่งตามกลุ่มตัวอย่างได้เป็น 4 กลุ่มตัวอย่าง ดังนี้

1. BkDkB จำนวน 4 ตัวอย่าง รหัส BkDkB 01_1 ถึง BkDkB 02_2
2. BkZn จำนวน 56 ตัวอย่าง รหัส BkZn 01_1 ถึง BkZn 28_2
3. BkSLZn จำนวน 16 ตัวอย่าง รหัส BkSLZn 01_1 ถึง BkSLZn 08_2
4. BkPt จำนวน 8 ตัวอย่าง รหัส BkPt 01_1 ถึง BkPt 04_2



รูปที่ 4-15 พลอยจากแหล่งบางกะจะกลุ่มสีน้ำเงิน-เขียว นำมาคัดเลือกเข้าสู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ



รูปที่ 4-16 พลอยจากแหล่งบางกะจะกลุ่มสีน้ำเงินอ่อน นำมาคัดเลือกเข้าคู่สำหรับนำไปทดลองเปรียบเทียบ

4.1.4 การตรวจวัดคุณสมบัติของพลอย

ก. การศึกษาลักษณะทางอัญมณีวิทยา โดยใช้เครื่องมือพื้นฐาน

i) ค่าความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของพลอยทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษา มีค่าอยู่ระหว่าง 3.86 ถึง 4.20 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.97 ค่าความถ่วงจำเพาะของแต่ละกลุ่มตัวอย่างแสดงดังในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างพลอยในแต่ละกลุ่ม

กลุ่มตัวอย่าง	ค่าความถ่วงจำเพาะ	ค่า ถ.พ. เฉลี่ย
Dark Blue	3.67 – 4.20	3.93
Dark Core	3.82 – 4.00	3.94
Zoning	3.87 – 4.08	3.99
Slightly Zoning	3.92 – 4.06	3.99
White Core	3.94 – 3.97	3.96
Patch	3.86 – 4.16	3.98
Opaque	3.86 – 4.00	3.95

ii) ค่าดัชนีหักเห

ค่าดัชนีหักเหที่หาได้มีค่าดังนี้

$$n_e = 1.762 - 1.768$$

$$n_o = 1.770 - 1.775$$

iii) การจัดลำดับสี

ตัวอย่างจากแหล่งแพร่จำนวน 47 ตัวอย่าง สามารถจัดลำดับสีได้ดังนี้

yG 2/3	รหัส PhrPt 01_1 ถึง PhrPt 02_2
G 3/1	รหัส PhrPt 03_1 ถึง PhrPt 04_2
vstgB 2/3	รหัส PhrPt 05_1
vslgB 6/3	รหัส PhrPt 05_2
vstgB 3/2	รหัส PhrPt 06_1 ถึง PhrPt 06_2
B 3/4	รหัส PhrDkC 11_1 ถึง PhrDkC 11_2
B 4/6	รหัส PhrDkC 07_1 ถึง PhrDkC 07_2
B 5/3	รหัส PhrSLZn 01_1 ถึง PhrSLZn 01_2
B 6/2	รหัส PhrDkC 02_1 ถึง PhrDkC 02_2 และ PhrDkC 09_1 ถึง PhrDkC 09_2
B 7/4	รหัส PhrDkC 16_1 ถึง PhrDkC 16_2, รหัส PhrZn 02_1 ถึง PhrZn 02_2 และ PhrOp 01_1 ถึง PhrOp 01_2
B 8/3	รหัส PhrDkC 14_1 ถึง PhrDkC 15_2
bV 5/4	รหัส PhrDkC 01_1 ถึง PhrDkC 01_2 และ PhrPt 07_1 ถึง PhrPt 07_2
bV 5/5	รหัส PhrDkC 03_1 ถึง PhrDkC 04_2, PhrDkB 01_1 ถึง PhrDkB 01_2 และ PhrWtC 03_1 ถึง PhrWtC 03_2
bV 6/4	รหัส PhrDkC 05_1 ถึง PhrDkC 05_2 และ PhrDkC 10_1 ถึง PhrDkC 10_2
vB 4/3	รหัส PhrDkC 06_1 ถึง PhrDkC 06_2, PhrDkC 20_1 ถึง PhrDkC 22_2 และ PhrZn 01_1 ถึง PhrZn 1_2
vB 4/6	รหัส PhrDkC 19_1 ถึง PhrDkC 19_2
vB 5/3	รหัส PhrPt 08_1 ถึง PhrPt 08_2, PhrDkC 13_1 ถึง PhrDkC 13_2 และ PhrWtC 01_1 ถึง PhrWtC 02_2
V 8/1	รหัส PhrDkC 12_1 ถึง PhrDkC 12_2 และ รหัส PhrDkC 17_1 ถึง PhrDkC 17_2

ตัวอย่างจากแหล่งกาญจนบุรีจำนวน 20 ตัวอย่าง สามารถจัดลำดับสีได้ดังนี้

gB 2/2	รหัส KcPt 01_1 ถึง KcPt 05_2
B 3/3	รหัส KcPt 06_1 ถึง KcPt 06_2
B 8/3	รหัส KcOp 01_1 ถึง KcOp 01_2
vB 3/3	รหัส KcPt 07_1 ถึง KcPt 07_2
vslgB	รหัส KcPt 08_1 ถึง KcPt 08_2
bV 6/4	รหัส KcOp 02_1 ถึง KcOp 02_2

ตัวอย่างจากแหล่งจันทบุรี ตกพรหม จำนวน 60 ตัวอย่าง สามารถจัดลำดับสีได้ดังนี้

gB 7/4	รหัส TpDkC 01_1 ถึง TpDkC 01_2
B 3/2	รหัส TpPt 07_1 ถึง TpPt 07_2
B 5/4	รหัส TpDkC 02_1 ถึง TpDkC 02_2
B 6/5	รหัส TpPt 03_1 ถึง TpPt 0_2
B 6/2	รหัส TpDkB 03_1 ถึง TpDkB 03_2
B 6/6	รหัส TpZn 01_1 ถึง TpZn 01_2
B 8/3	รหัส TpDkB 06_1 ถึง TpDkB 06_2 และ TpDkB 10_1 ถึง TpDkB 10_2
G 3/3	รหัส TpPt 02_1 ถึง TpPt 02_2
yG 3/3	รหัส TpPt 04_1 ถึง TpPt 04_2
gB 3/3	รหัส TpZn 01_1 ถึง TpZn 02_2, TpSlZn 01_1 ถึง TpSlZn 01_2 และ TpDkB 05_1 ถึง TpDkB 05_2
gB 4/3	รหัส TpZn 03_1 ถึง TpZn 03_2 และ TpDkB 02_1 ถึง TpDkB 02_2
gB 7/4	รหัส TpPt 05_1 ถึง TpPt 05_2
vslgB 4/4	รหัส TpZn 04_1 ถึง TpZn 04_2
vslgB 5/4	รหัส TpDkC 03_1 ถึง TpDkC 03_2
vB 4/4	รหัส TpDkB 11_1 ถึง TpDkB 11_2
vB 6/4	รหัส TpZn 05_1 ถึง TpZn 05_2

vB 4/6	รหัส TpPt 06_1 ถึง TpPt 06_2
bV 2/3	รหัส TpSLZn 03_1 ถึง TpSLZn 03_2
bV 6/5	รหัส TpZn 06_1 ถึง TpZn 06_2, TpDkB 04_1 ถึง TpDkB 04_2 และ รหัส TpDkB 08_1 ถึง TpDkB 09_2
bV 8/3	รหัส TpDkB 01_1 ถึง TpDkB 01_2
vslgB 3/3	รหัส TpSLZn 02_1 ถึง TpSLZn 02_2 และ TpPt 01_1 ถึง TpPt 01_2
vslgB 5/4	รหัส TpDkB 07_1 ถึง TpDkB 07_2

ตัวอย่างจากแหล่งเงินทุนริ่ บางกะจะ จำนวน 84 ตัวอย่าง สามารถจัดลำดับสั้ได้ดังนี้

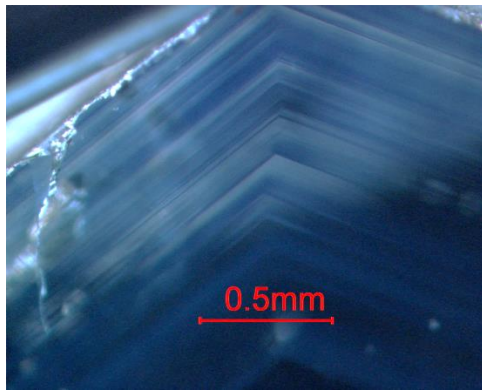
B 3/3	รหัส BkZn 02_1 ถึง BkZn 03_2 และ BkSLZn 01_1 ถึง BkSLZn 02_2
B 4/2	รหัส BkDkB 01_1 ถึง BkDkB 01_2 และ BkPt 02_1 ถึง BkPy 02_2
GB 3/1	รหัส BkZn 09_1 ถึง BkZn 09_2
GB 4/2	รหัส BkZn 01_1 ถึง BkZn 01_2
GB 6/1	รหัส BkZn 06_1 ถึง BkZn 06_2
gB 4/3	รหัส BkZn 18_1 ถึง BkZn 18_2, BkSLZn 07_1 ถึง BkSLZn 07_2 และ BkPt 04_1 ถึง BkPt 04_2
gB 5/3	รหัส BkZn 19_1 ถึง BkZn 19_2
gB 5/2	รหัส BkZn 11_1 ถึง BkZn 14_2, BkZn 20_1 ถึง BkZn 20_2 และ BkZn 25_1 ถึง BkZn 25_2
G 2/2	รหัส BkZn 07_1 ถึง BkZn 08_2 และ BkSLZn 03_1 ถึง BkSLZn 04_2
bG 2/3	รหัส BkZn 10_1 ถึง BkZn 10_2, BkSLZn 05_1 ถึง BkSLZn 05_2 และ BkPt 02_1 ถึง BkPt 03_2
bG 3/3	รหัส BkZn 05_1 ถึง BkZn 05_2
vstbG 2/3	รหัส BkZn 26_1 ถึง BkZn 26_2
vstgB 2/3	รหัส BkZn 15_1 ถึง BkZn 16_2, BkZn 21_1 ถึง BkZn 24_2 และ BkSLZn 06_1 ถึง BkSLZn 06_2

vstgB 3/3	รหัส BkDkB 02_1 ถึง BkDkB 02_2
vstgB 7/2	รหัส BkZn 28_1 ถึง BkZn 28_2
vB 6/5	รหัส BkZn 27_1 ถึง BkZn 27_2
bV 8/3	รหัส BkZn 17_1 ถึง BkZn 17_2
yG 3/3	รหัส BkSlZn 08_1 ถึง BkSlZn 08_2

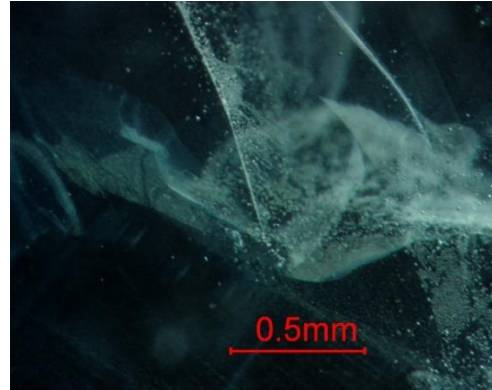
iv) มลทินภายใน

มลทินภายในที่ตรวจพบ ได้แก่ (รูปที่ 4-17)

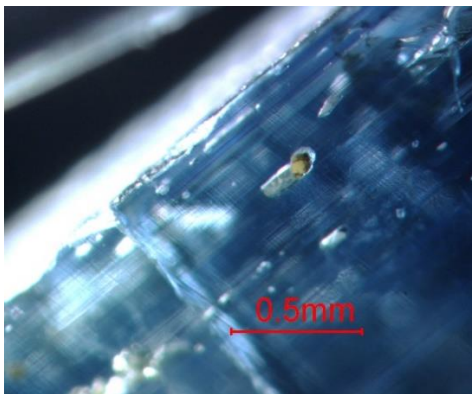
Zoning	Fingerprint
Negative Crystal	Rhombohedral Parting
Bubbles	Mineral inclusions



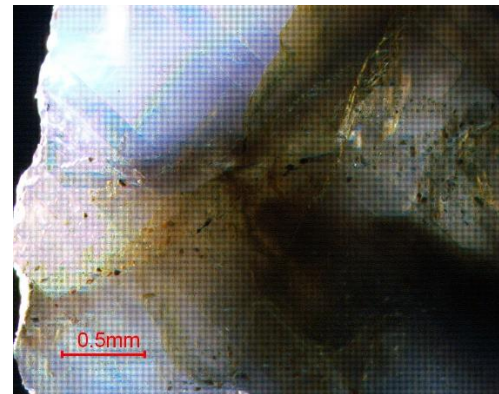
Zoning



Fingerprint



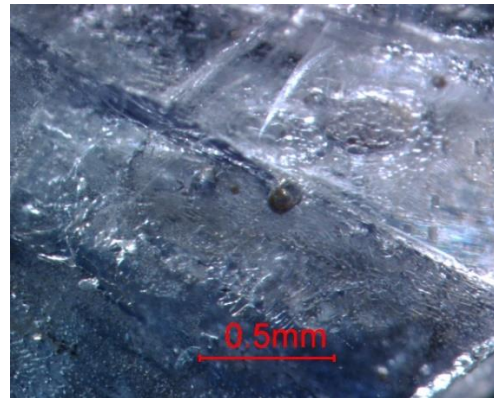
Negative crystal



Rhombohedral Parting



Bubbles



Mineral inclusions

รูปที่ 4-17 ตัวอย่างมลทินภายในที่พบในตัวอย่างก่อนทำการเพิ่มคุณภาพ

ผลการตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของพลอยตัวอย่าง แสดงในภาคผนวก

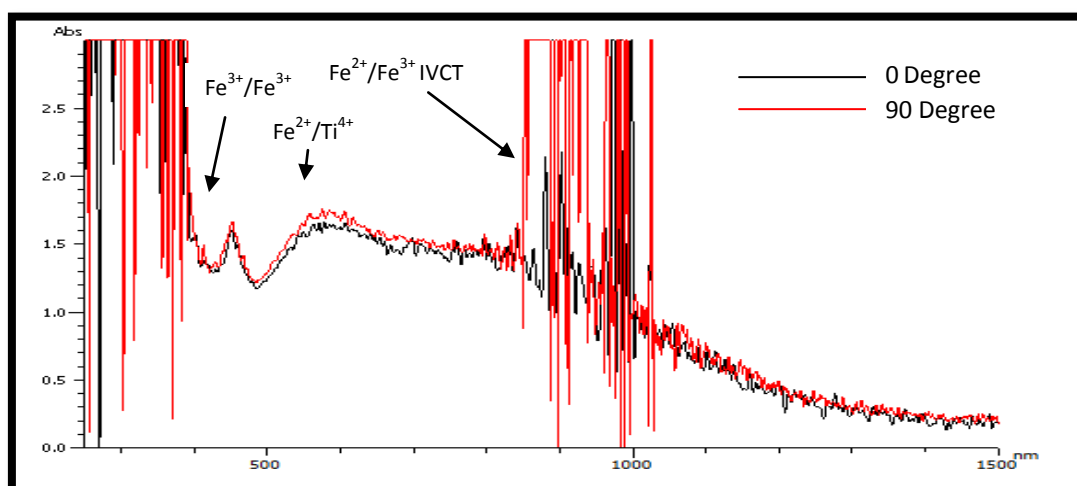
ข. การตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง

ศึกษาโดยใช้เครื่อง UV-VIS-NIR spectrophotometer เป็นเครื่อง Hitachi รุ่น U 4100 ช่วงความยาวคลื่นที่วัดสเปกตรัมของตัวอย่างพลอยอยู่ในช่วง 250 ถึง 1500 นาโนเมตร กำหนดให้มีความละเอียดคงที่ที่ 2 นาโนเมตร (มีการเก็บข้อมูลทุกๆ 2 นาโนเมตร) อัตราเร็วการวัดความเข้มแสง (scan speed) ที่ 300 นาโนเมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาลักษณะการดูดกลืนแสงของธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเกิดสีในตัวอย่างพลอย

ในการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสง ได้วัดสเปกตรัมในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนแสงของผลึกเนื่องจากเห็น absorption peak และ band ได้ชัดเจน โดยทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแยกเป็นกลุ่มจำนวน 7 กลุ่ม ซึ่งลักษณะการดูดกลืนแสงของตัวอย่างแซปไฟร์ทั้ง 7 กลุ่ม มีดังนี้

i) กลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (DkB)

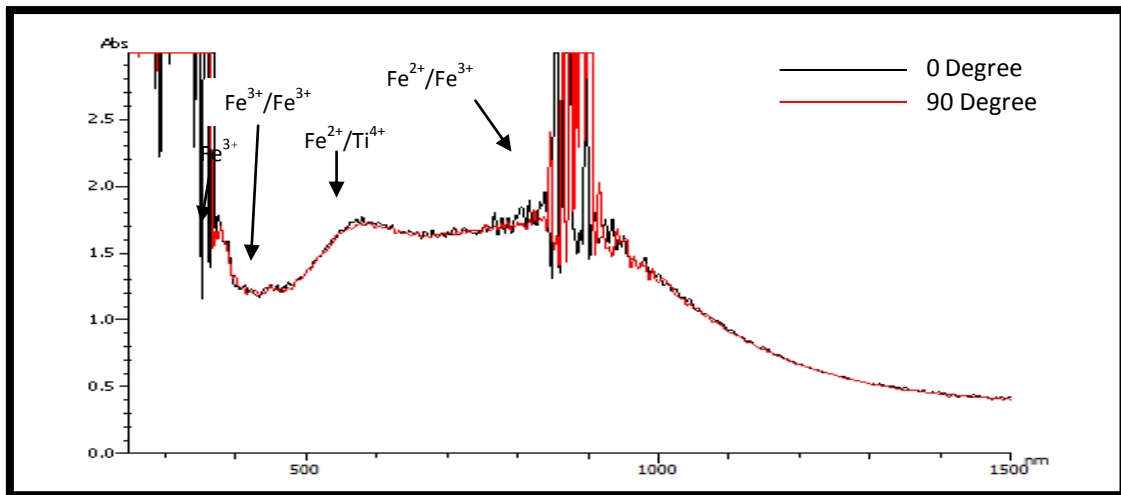
ตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-18)



รูปที่ 4-18 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkB 03 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศา และ 90 องศา

ii) กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (DkC)

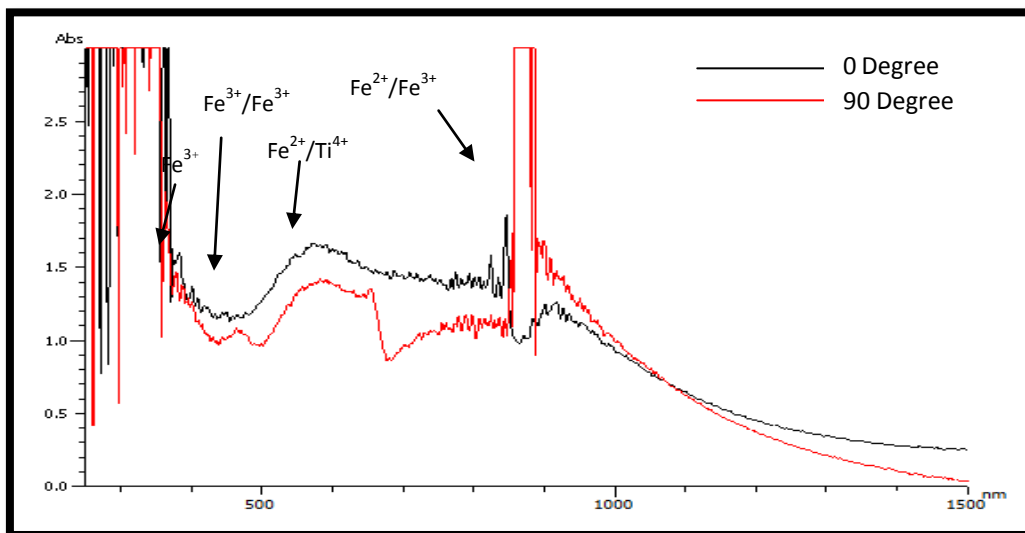
ตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-19)



รูปที่ 4-19 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

iii) กลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (WtC)

ตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-20)

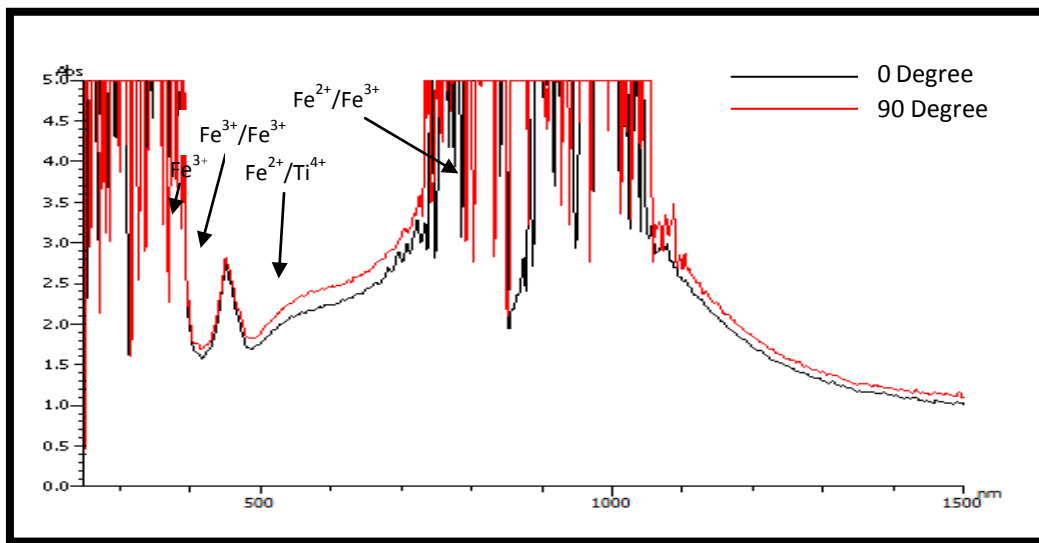


รูปที่ 4-20 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrWtC 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

iv) กลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (Zn)

ตัวอย่างในกลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง

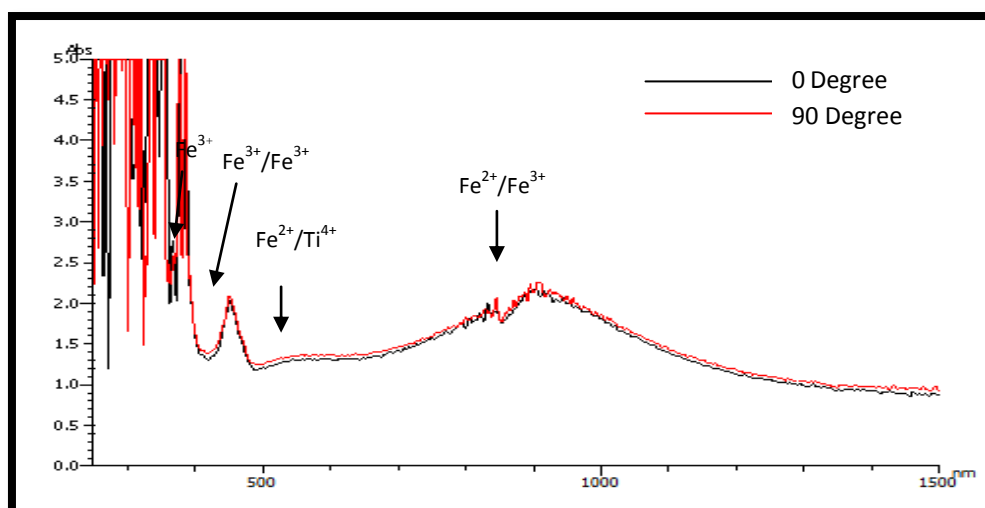
absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-21)



รูปที่ 4-21 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpZn 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

v) กลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงิน แต่ไม่เด่นชัด (SLZn)

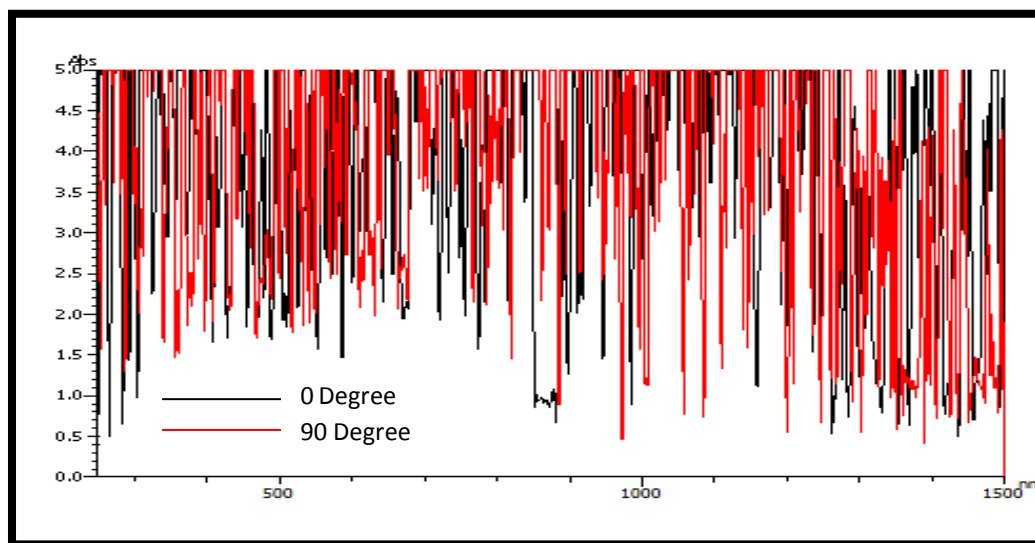
ตัวอย่างในกลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงินแต่ไม่เด่นชัด แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-22)



รูปที่ 4-22 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpSLZn 02 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

vi) กลุ่มพลอยลักษณะทึบแสง

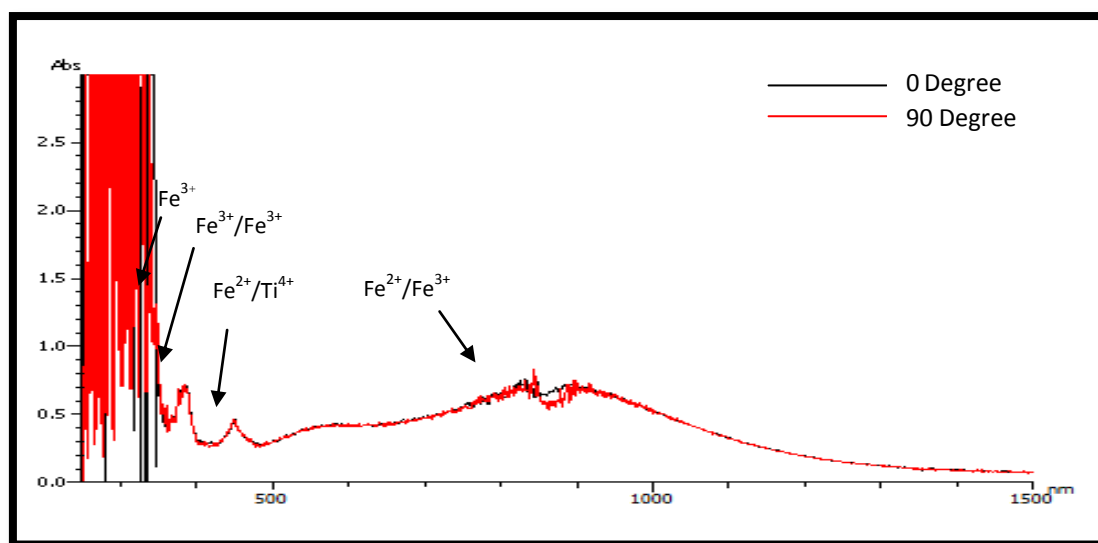
เนื่องจากพลอยมีลักษณะทึบแสง กลุ่มพลอยตัวอย่างในลักษณะนี้ จึงแสดง Absorption peak เป็นช่วงกว้าง (รูปที่ 4-23)



รูปที่ 4-23 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

vii) กลุ่มพลอยมีสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน (Pt)

ตัวอย่างในกลุ่มพลอยมีสีไม่สม่ำเสมอ/มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร แสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ ตำแหน่งประมาณ 565 นาโนเมตร และแสดง absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 890 นาโนเมตร (รูปที่ 4-24)



รูปที่ 4-24 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcPt 01 เปรียบเทียบการดูดกลืนแสงในแนว 0 องศาและ 90 องศา

ค. การตรวจวัดค่าองค์ประกอบทางเคมี

ได้คัดเลือกเฉพาะพลอยบางตัวที่น่าสนใจ ไปตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDXRF เพื่อดูความผันแปรของธาตุให้สีในพลอยแต่ละกลุ่ม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว ในหน่วยเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก (wt%) ด้วยเทคนิค EDXRF

ก. แหล่งแพร่

รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Total
PhrDkB 01	1.0862	97.3767	0.364	0.0375	0.0077	0.0039	1.1029	0.0209	100
PhrDkB 02	1.226	97.2692	0.9532	0.0609	0.0062	0.0043	0.4573	0.0229	100
PhrDkB 03	1.4597	95.5561	2.3044	0.1265	0.0169	0.0571	0.4534	0.0259	100
PhrDkC 01	1.3411	97.5606	0.4489	0.1499	0.008	0.0061	0.4495	0.036	100
PhrDkC 02	1.1856	97.1057	0.4803	0.1317	0.0111	0.3702	0.6912	0.0242	100
PhrDkC 03	1.329	97.9497	0.2329	0.0563	0.011	0.0031	0.3927	0.0252	100
PhrDkC 04	1.0583	97.8347	0.3698	0.0926	0	0	0.6079	0.0367	100
PhrDkC 05	1.3545	95.6984	2.1616	0.1941	0.0507	0.0027	0.5052	0.0329	100
PhrDkC 06	1.2354	97.2561	0.9459	0.0487	0.0088	0.1304	0.3502	0.0244	100
PhrDkC 07	1.4208	97.7337	0.2096	0.0782	0.0042	0.0044	0.5181	0.031	100
PhrDkC 08	1.1032	98.0844	0.2349	0.0517	0	0	0.4871	0.0387	100
PhrDkC 09	1.4977	93.2487	3.4255	0.1439	0.0071	0.0092	1.6411	0.0268	100
PhrDkC 10	1.2337	97.6978	0.2953	0.1196	0.0082	0.0022	0.6035	0.0396	100
PhrDkC 11	1.1398	97.4507	0.7571	0.1069	0.0037	0.0063	0.5061	0.0295	100
PhrDkC 12	1.9634	96.371	0.4977	0.0429	0	0.4901	0.6065	0.0285	100
PhrDkC 13	1.2784	97.3535	0.4566	0.1141	0.01	0.0038	0.7582	0.0254	100
PhrDkC 14	1.1663	97.4975	0.3339	0.071	0.0152	0.0051	0.8814	0.0296	100
PhrDkC 15	1.3524	92.397	5.348	0.1114	0.0195	0.0565	0.6867	0.0287	100
PhrDkC 16	1.2106	98.0009	0.2332	0.0974	0.0116	0.0047	0.4135	0.028	100
PhrDkC 17	1.3863	97.3348	0.6471	0.0996	0.008	0.0019	0.408	0.1142	100
PhrDkC 18	1.0823	97.5917	0.7922	0.0977	0.0209	0.0199	0.3733	0.022	100
PhrDkC 19	1.3653	96.9354	0.3933	0.1626	0.0043	0.0016	1.0975	0.04	100
PhrDkC 20	1.0792	97.2353	0.4718	0.1227	0.0072	0.0031	1.0448	0.0359	100
PhrDkC 21	0.979	98.1871	0.3058	0.1102	0.0032	0.0032	0.3937	0.0178	100
PhrDkC 22	1.2468	97.8352	0.353	0.2067	0.0141	0.0078	0.3132	0.0232	100
PhrOp 01	1.3606	97.7821	0.3072	0.0478	0.0046	0.0111	0.4385	0.0481	100
PhrPt 01	1.4542	96.5087	0.4052	0.2787	0	0.0037	1.328	0.0216	100

รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Total
PhrPt 02	1.2356	94.7627	2.6546	0.042	0.0135	0.0271	1.2418	0.0226	100
PhrPt 03	1.5598	97.2242	0.2448	0.0054	0	0.0016	0.9452	0.019	100
PhrPt 04	3.0433	90.3891	5.1657	0.0547	0.0089	0.0358	1.2916	0.0109	100
PhrPt 05	1.1937	96.5646	1.1675	0.0371	0.0059	0.0176	0.9809	0.0328	100
PhrPt 06	1.3547	96.4422	1.2993	0.0217	0.0107	0.0087	0.8319	0.0308	100
PhrPt 07	1.4408	97.5704	0.3888	0.0842	0.0042	0.0036	0.4789	0.0291	100
PhrPt 08	1.064	97.9932	0.3883	0.126	0.0801	0	0.3292	0.0192	100
PhrSlZn 01	1.179	95.7764	1.3707	0.0133	0.0051	0.0133	1.5064	0.1358	100
PhrWtc 01	2.0843	88.0729	7.9197	0.1599	0.0076	1.0162	0.69	0.0495	100
PhrWtc 02	1.0633	97.4173	1.154	0.0596	0.0038	0.0025	0.2751	0.0244	100
PhrWtc03	1.2987	97.9746	0.2753	0.1136	0.0046	0.0035	0.303	0.0267	100
PhrZn 01	1.1389	97.357	0.2247	0.0615	0.0115	0.0939	1.0918	0.0208	100
PhrZn 02	0.7643	97.8865	0.152	0.0258	0.0052	0.0024	1.1434	0.0204	100

ข. แหล่งกาญจนบุรี

รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ga ₂ O ₃	Total
KcOP 01	2.1717	97.1892	0.1124	0.0201	0	0	0.4784	0.0282	100
KcOP 02	1.8508	96.7933	0.805	0.0701	0.004	0.0063	0.4398	0.0306	100
KcPt 01	1.3777	97.5986	0.6504	0.0087	0.0064	0	0.3416	0.0165	100
KcPt 02	0.898	98.1505	0.396	0.0109	0	0.0465	0.4864	0.0116	100
KcPt 03	1.3423	94.5388	3.4679	0.0158	0	0.0109	0.6025	0.0217	100
KcPt 04	1.0026	97.396	0.7296	0.0117	0.005	0.004	0.7343	0.1169	100
KcPt 05	2.7402	95.8669	0.7422	0.0213	0.0101	0.007	0.5942	0.0182	100
KcPt 06	2.2667	97.0151	0.3496	0.0078	0	0.0068	0.3393	0.0147	100
KcPt 07	1.8885	97.4148	0.2639	0.0059	0.0044	0.0089	0.3927	0.0209	100
KcPt 08	2.1656	97.1164	0.3305	0.0055	0.0042	0.0035	0.354	0.0204	100

ค. แหล่งบางกะจะ จังหวัดจันทบุรี

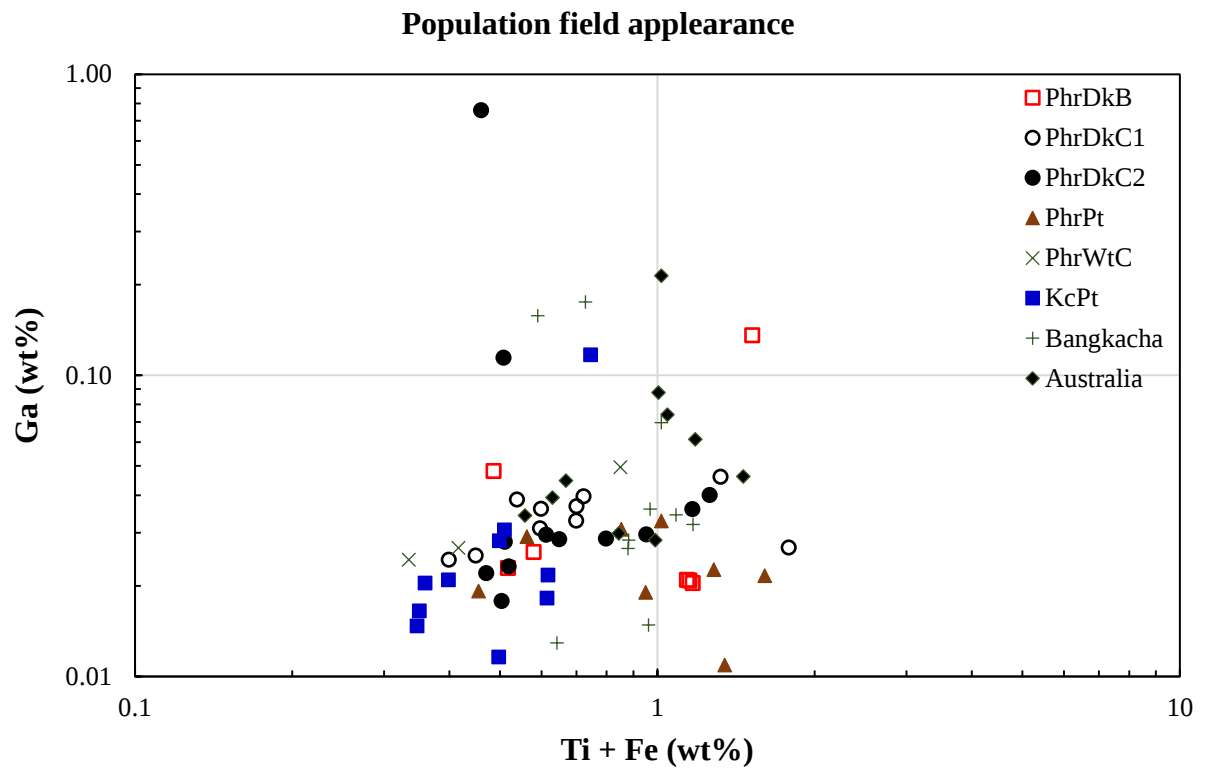
รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
C1	1.1643	97.0186	0.79	0.042	0.0081	0.0135	0.9276	0.0359	100
C2	1.221	96.3202	1.5404	0.0295	0.0075	0.0071	0.6994	0.1749	100
C3	1.0638	96.6167	1.1995	0.0133	0.0068	0.0254	1.0049	0.0696	100
C4	1.2026	96.5194	1.5088	0.0187	0.0084	0.0123	0.5723	0.1575	100
C5	1.3449	97.3131	0.2176	0.0066	0.0055	0.4631	0.6363	0.0129	100
C6	1.1021	96.2972	0.7179	0.0142	0.006	0.7553	1.073	0.0344	100
C7	0.9129	93.6378	1.2361	0.0553	3.0098	0	1.1163	0.0319	100

รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
C8	0.8177	92.3348	5.9206	0.0791	0.0107	0.0062	0.8025	0.0283	100
C9	0.9686	94.8607	3.2418	0.045	0.0178	0.0046	0.8349	0.0266	100
C10	1.6077	95.8497	1.5617	0.0215	0	0.0039	0.9408	0.0148	100

ง. แหล่งประเทศออสเตรเลีย

รหัส	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
A1	1.0038	96.913	0.9546	0.0344	0.0046	0.0047	1.0109	0.074	100
A2	1.0176	97.0336	0.685	0.0338	0.0117	0.0082	1.1488	0.0613	100
A3	1.1949	96.9216	0.8504	0.007	0.007	0.0067	0.984	0.0283	100
A4	0.7811	97.9778	0.5563	0.039	0.0088	0.0071	0.5909	0.0392	100
A5	1.1371	91.3605	6.4513	0.0099	0.3378	0	0.6588	0.0447	100
A6	1.3427	96.3726	0.7782	0.027	0	0	1.4334	0.0461	100
A7	0.8142	96.8304	1.2457	0.0234	0.0087	0.0077	0.9824	0.0875	100
A8	1.1163	97.064	0.5779	0.012	0.0041	0.0052	1.0066	0.214	100
A9	1.0536	96.6843	1.3757	0.0113	0.0049	0.0071	0.8334	0.0298	100
A10	1.2164	96.0948	2.0854	0.0096	0.0048	0.0064	0.5484	0.0342	100

จากตารางที่ 4-2 จะเห็นว่าสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ที่ตรวจวัดได้โดยเทคนิค EDXRF ค่อนข้างสูงถึงประมาณ 1 wt% ในขณะที่การตรวจวัดด้วยเทคนิค PIXE มีสัดส่วนของ MgO โดยเฉลี่ยต่ำกว่า 0.5 % [38] และการวัดด้วยเทคนิค EPMA สัดส่วนของ MgO ส่วนใหญ่ต่ำกว่า detection limit [39] เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะแมกนีเซียม (Mg) เป็นธาตุที่มีอะตอมขนาดเล็ก การตรวจวัดด้วยเทคนิคต่างๆทำได้ยาก สัดส่วนของธาตุหรือ สารประกอบออกไซด์ของธาตุนี้นี้ในเนื้อวัสดุ จึงมีความคลาดเคลื่อนตามแต่ละเทคนิคที่ใช้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัย ได้นำสัดส่วนของออกไซด์ที่ประกอบในเนื้อพอลอยแซปไฟร์ไปพล็อตกราฟ เพื่อหาคุณลักษณะที่แตกต่างกันของธาตุ เจือที่มีในพอลอยแต่ละกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4-25 ซึ่งไม่ได้เห็นความแตกต่างของ population field appearance ธาตุองค์ประกอบในพอลอยแต่ละกลุ่มอย่างเด่นชัดนัก



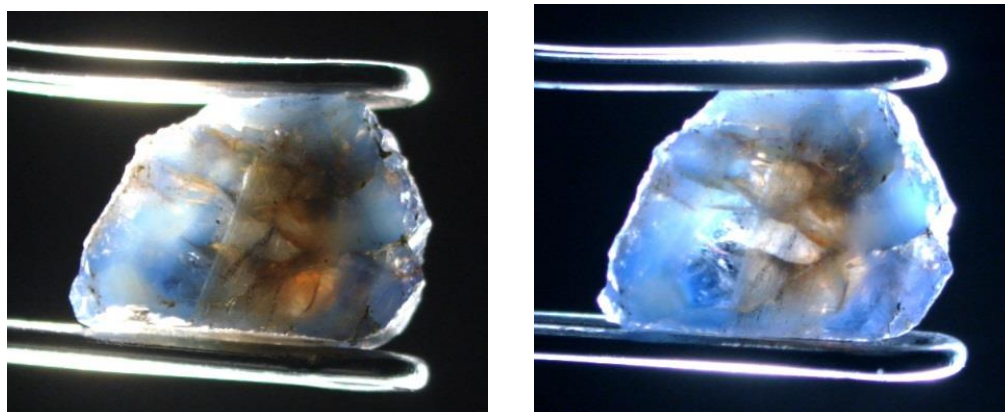
รูปที่ 4-25 Population field appearance ของ Ti + Fe และ Ga ของพลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4.2 แชนผลการยิงฟิวส์ไอออนพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองใช้ไอออน 2 ชนิด ได้แก่ ออกซิเจน และไนโตรเจน ซึ่งมีผลการทดลองที่น่าสนใจ พอสรุปได้ดังนี้

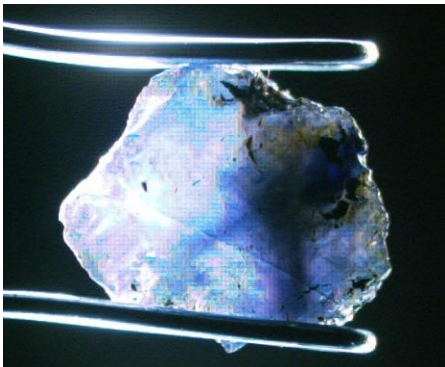
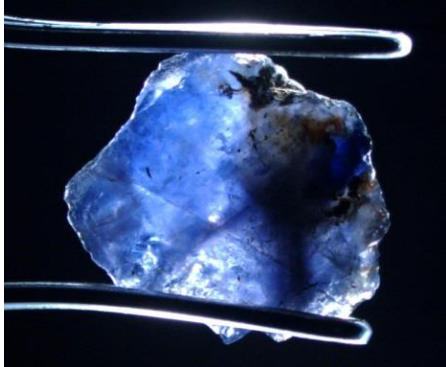
4.2.1 การยิงฟิวส์ด้วยไอออนออกซิเจน

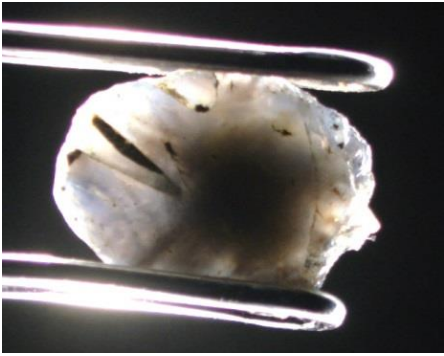
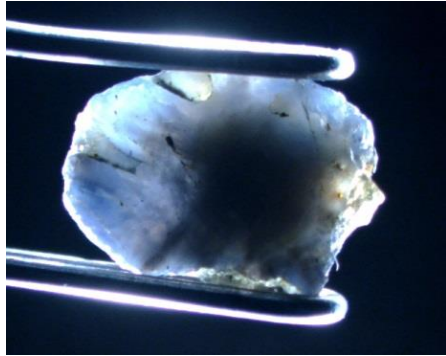
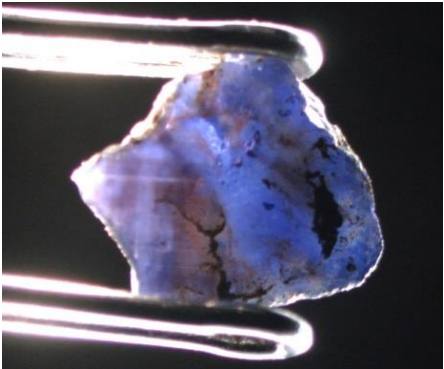
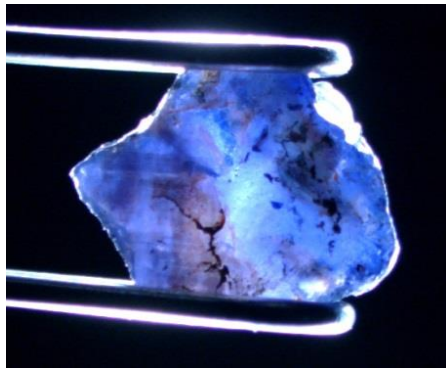
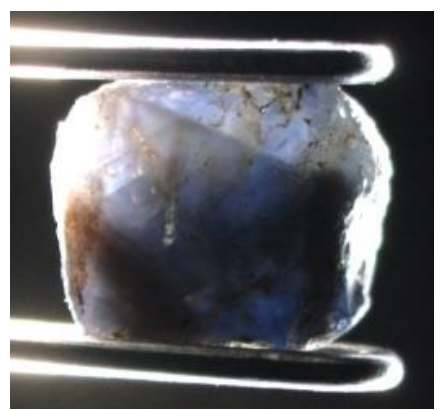
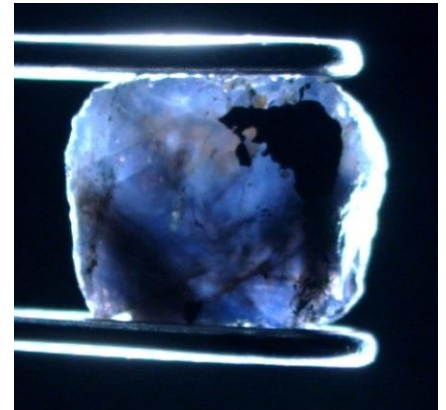
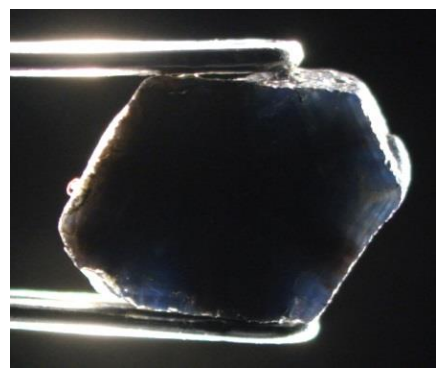
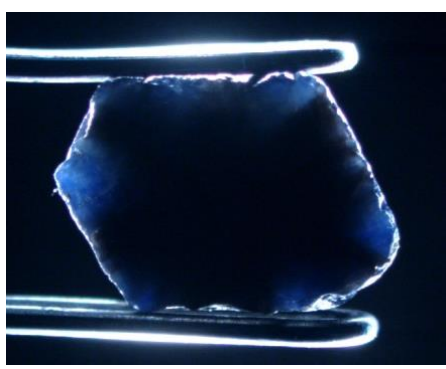
ในการทดลองนี้ เลือกตัวอย่างเป็นพลอยแซปไฟร์ในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (dark core) ซึ่งเนื้อค่อนข้างทึบเป็นหลัก เพื่อดูการกระจายของสี และการโปร่งแสงขึ้นของเนื้อพลอย ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4-26 ซึ่งจะเห็นว่าพลอยมีการโปร่งแสงขึ้น สีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น และสีสนิมลดลง ตัวอย่างของพลอยอื่นๆ ในกลุ่มเดียวกัน แสดงดังในตารางที่ 4-3 กราฟการดูดกลืนแสงก่อนและหลังการยิงฟิวส์ไอออน ของพลอยแซปไฟร์ในกลุ่มนี้ แสดงดังในรูปที่ 4-27 ถึง 4-35

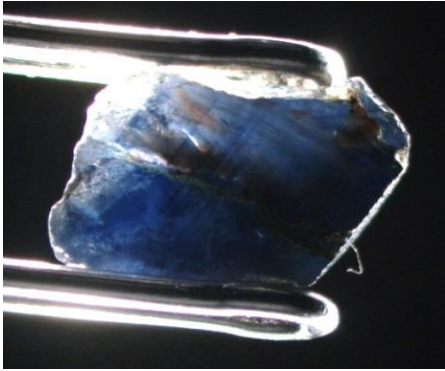
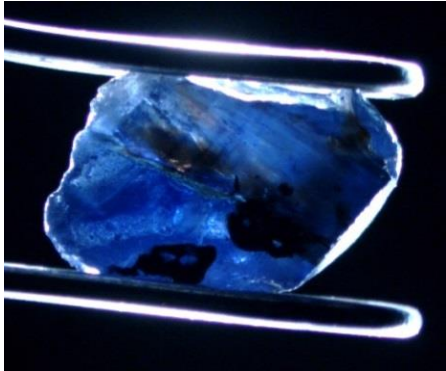
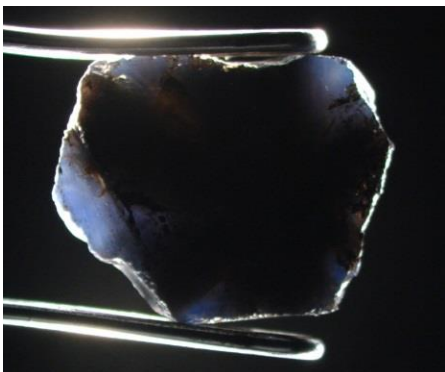
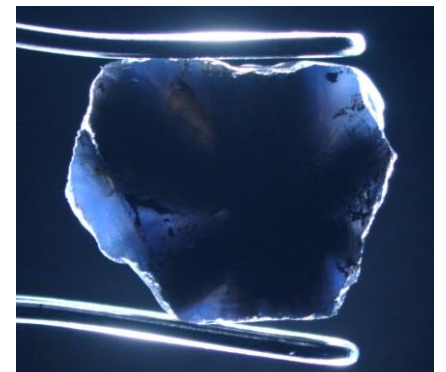
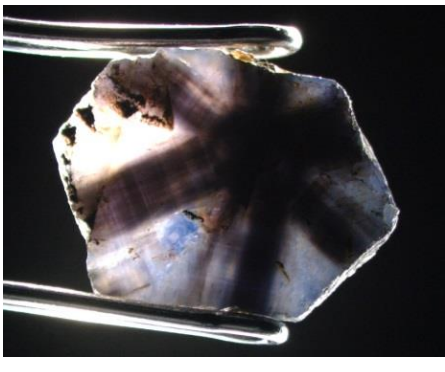
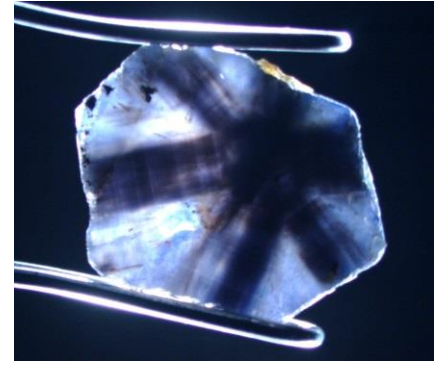
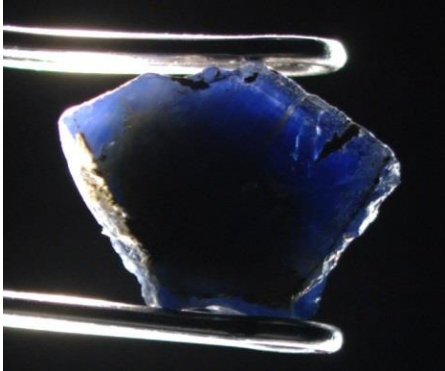
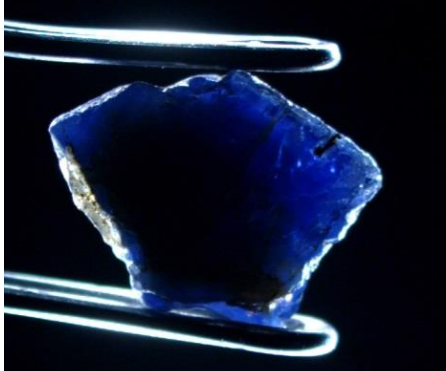


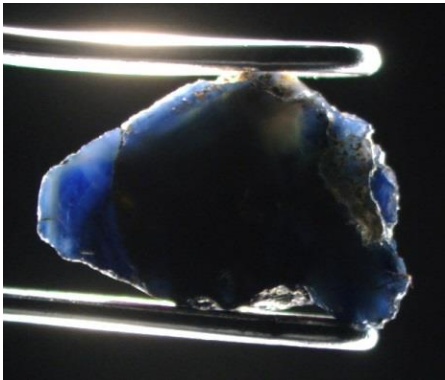
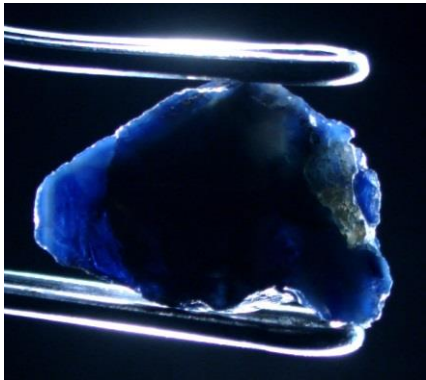
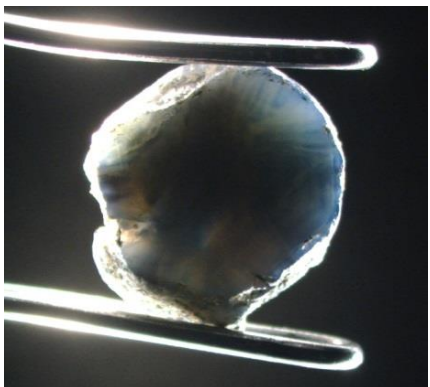
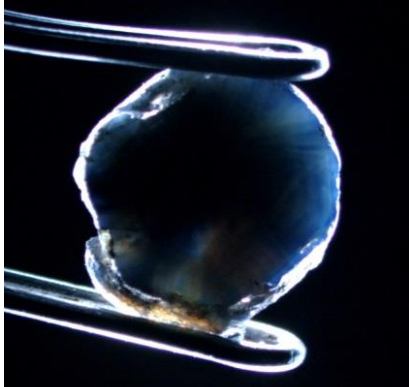
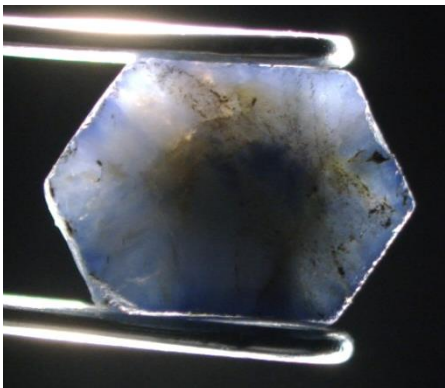
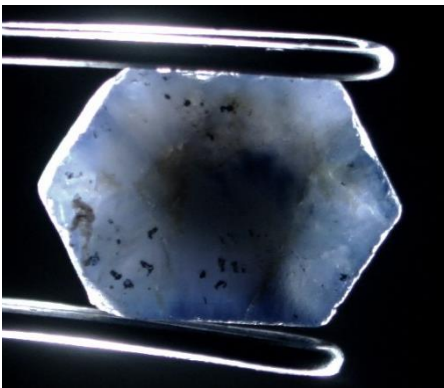
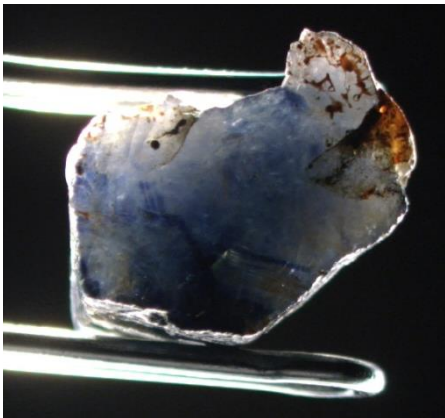
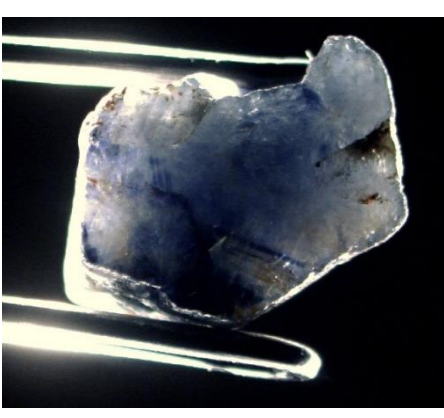
รูปที่ 4-26 ตัวอย่าง PhrDkC18_2 เปรียบเทียบก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออนออกซิเจน จะเห็นว่าพลอยโปร่งแสงขึ้น สีสนิมลดลง และสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น

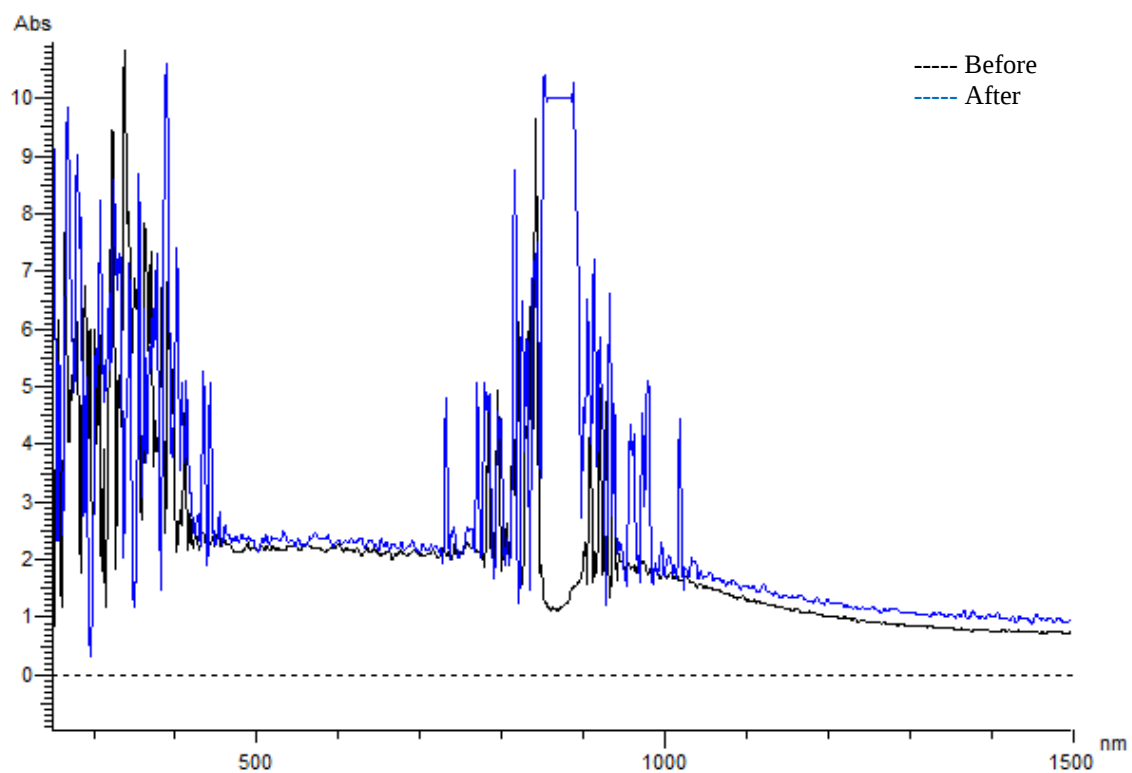
ตารางที่ 4-3 ผลของการยิงไอออนออกซิเจนต่อพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวจากแหล่งต่างๆ

ตัวอย่าง	ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน	หมายเหตุ
PhrDkC01_2			โปร่งแสงขึ้น

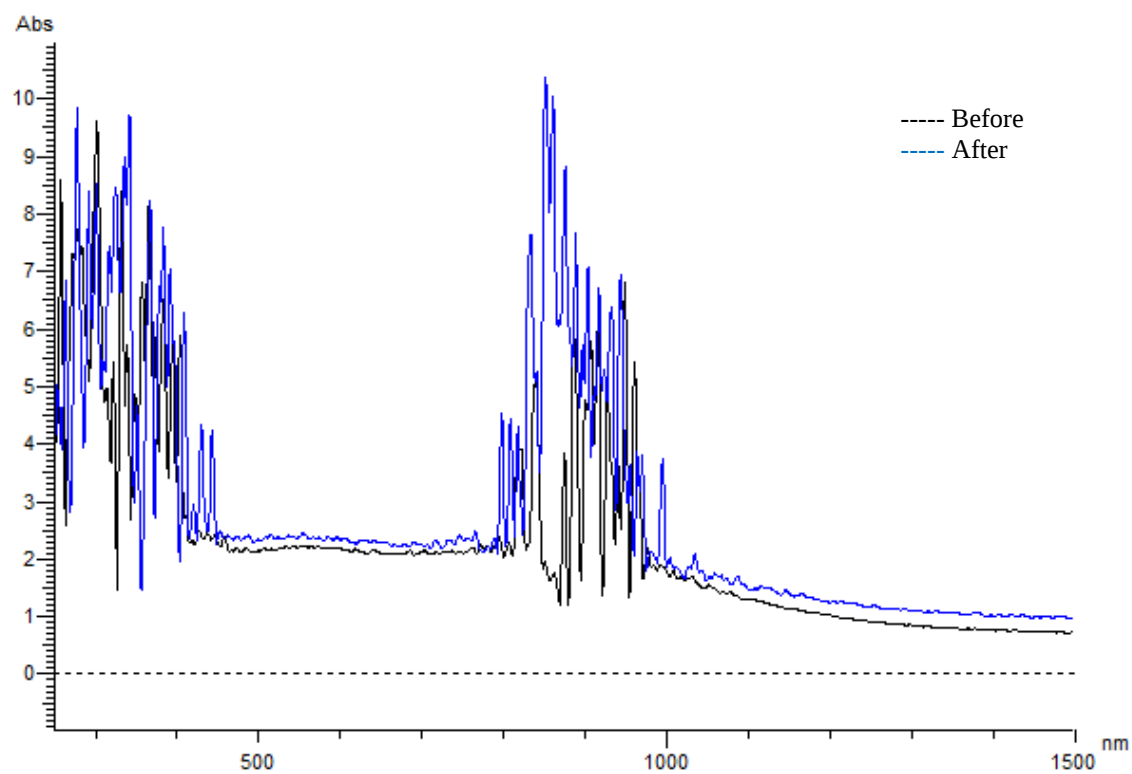
PhrDkC05_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrDkC06_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrDkC07_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrDkC08_2			โปร่งแสงขึ้น

PhrDkC09_2			สีน้ำเงินมาก ขึ้น โปรงแสง ขึ้น
PhrDkC15_2			โปรงแสงขึ้น
PhrDkC16_2			โปรงแสงขึ้น
PhrDkC17_2			โปรงแสงขึ้น

PhrDkC19_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrDkC20_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrWtC02_2			พลอยโปร่ง แสงขึ้น สี สนิมลดลง
PhrOp01_2			โปร่งแสงขึ้น สีสนิมลดลง

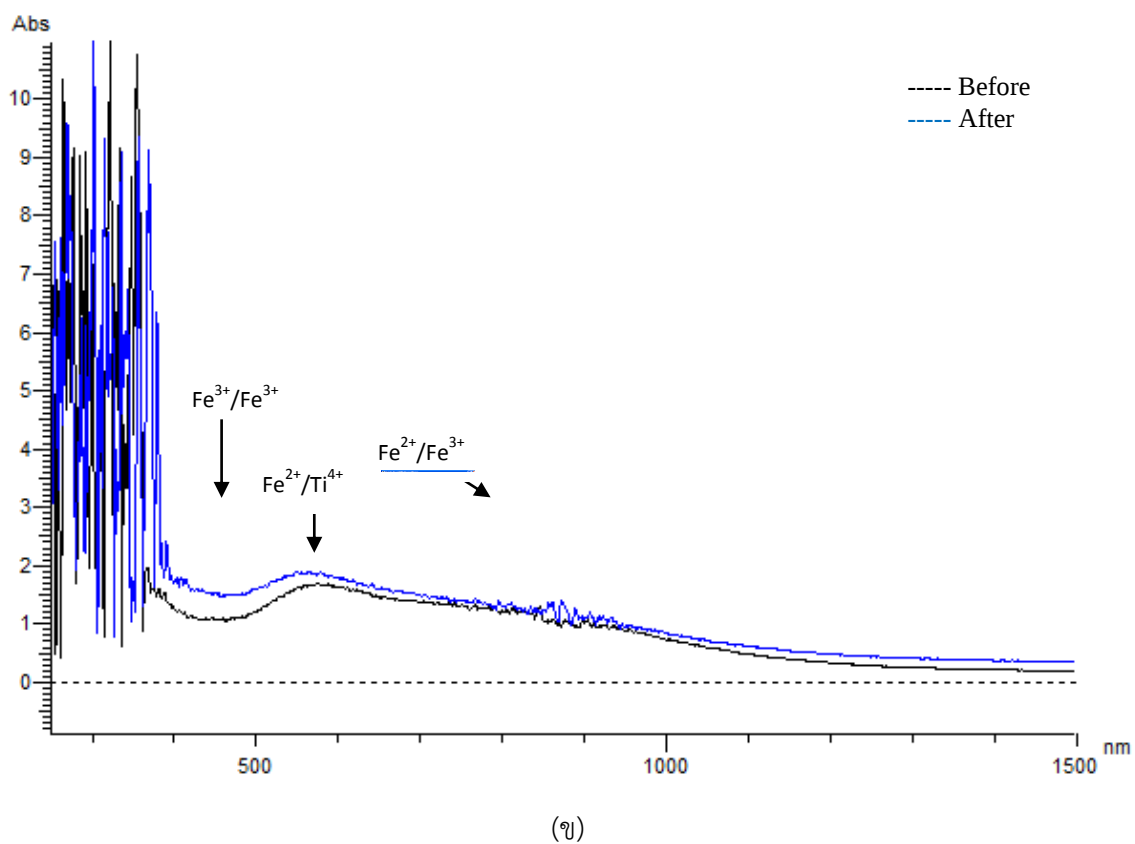
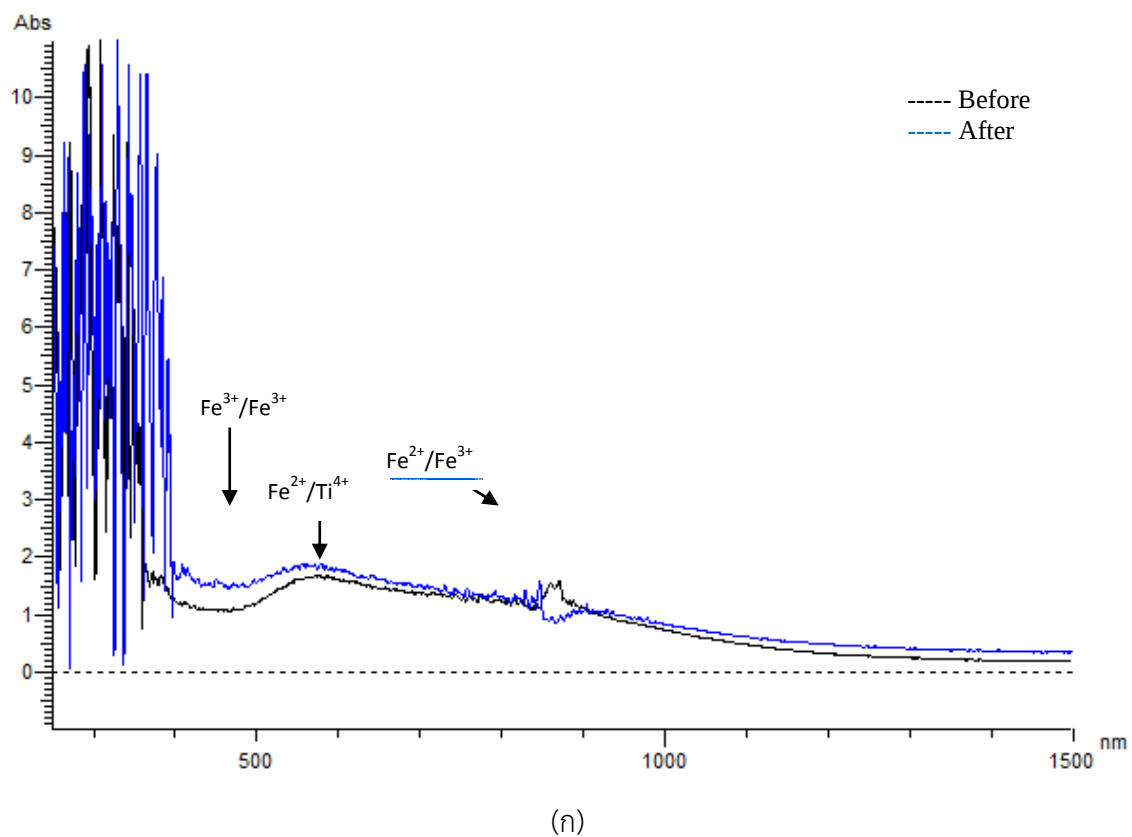


(ก)

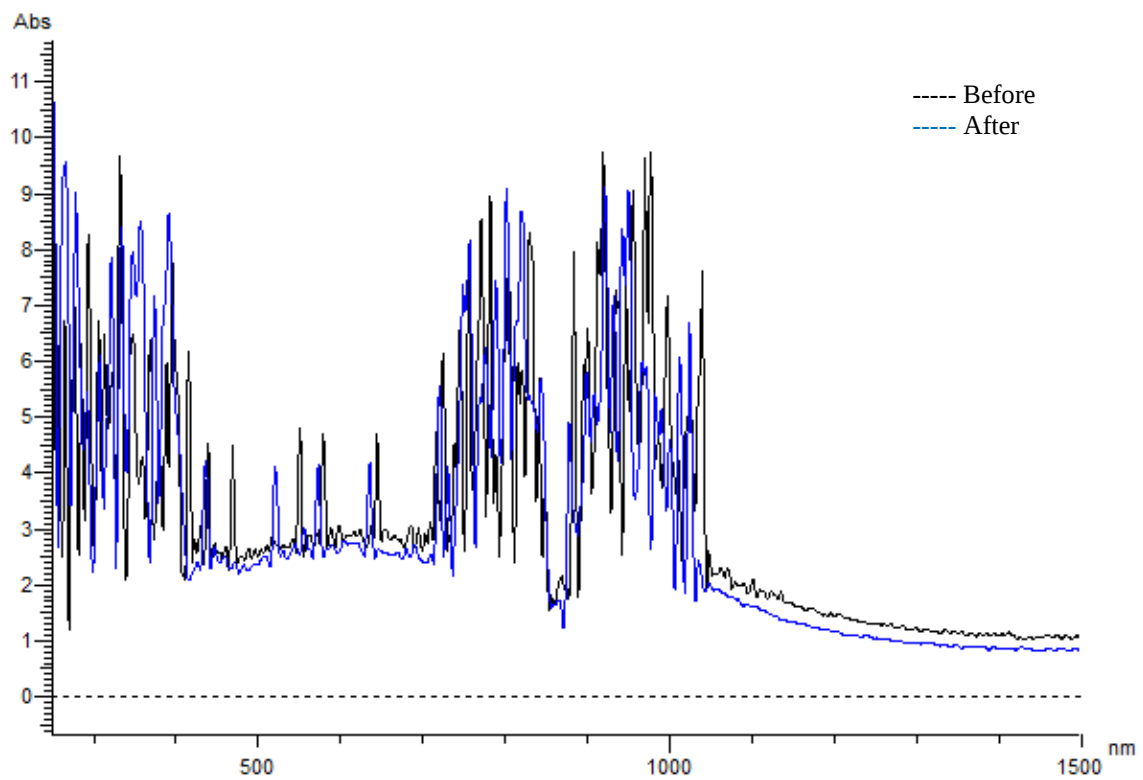


(ข)

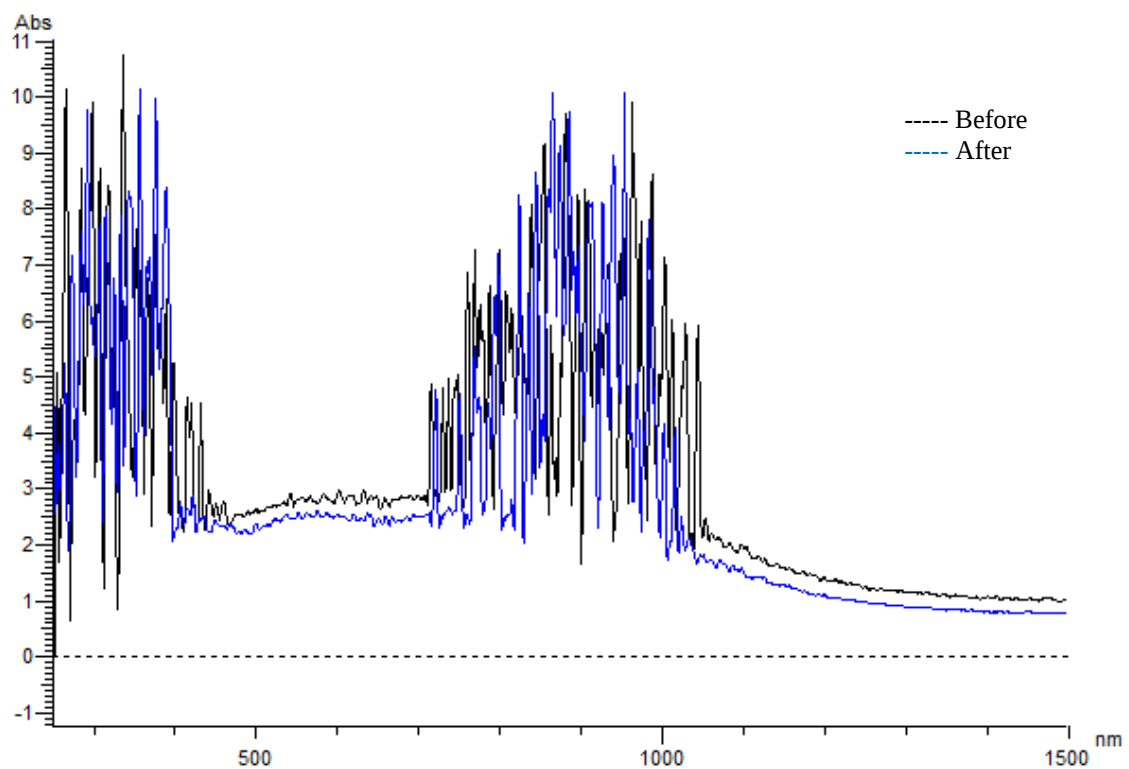
รูปที่ 4-27 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC05_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา



รูปที่ 4-28 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC06_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจนโดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

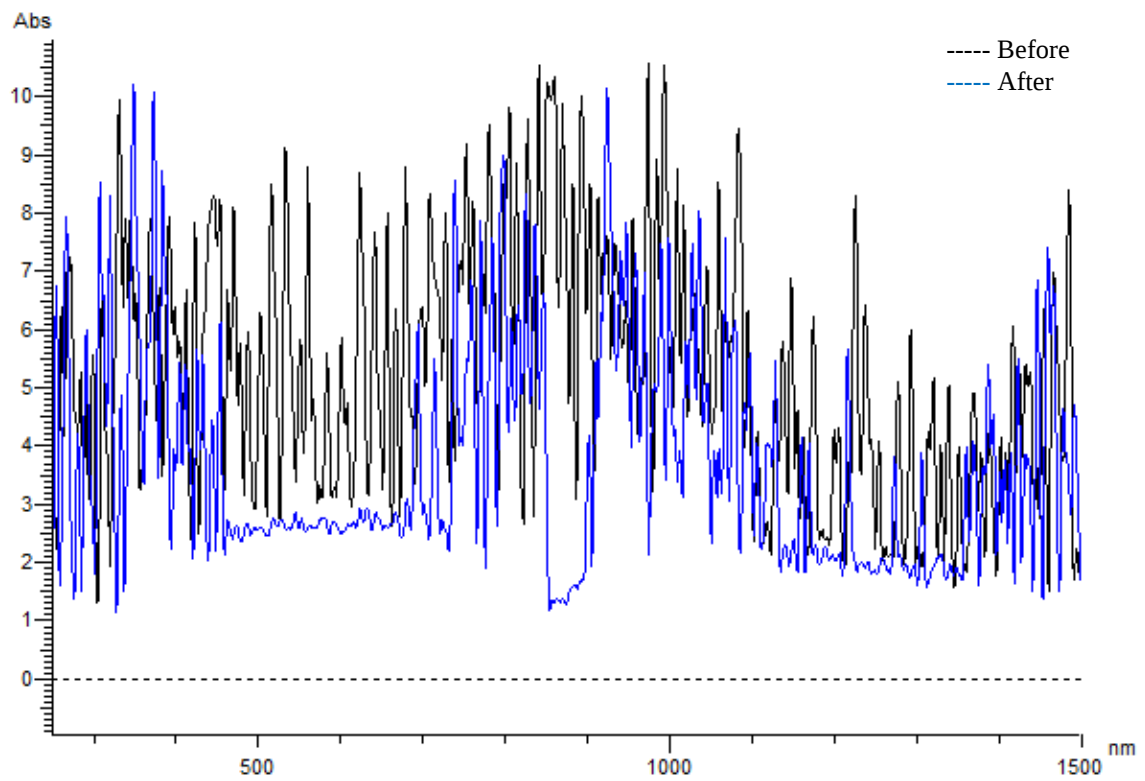


(ก)

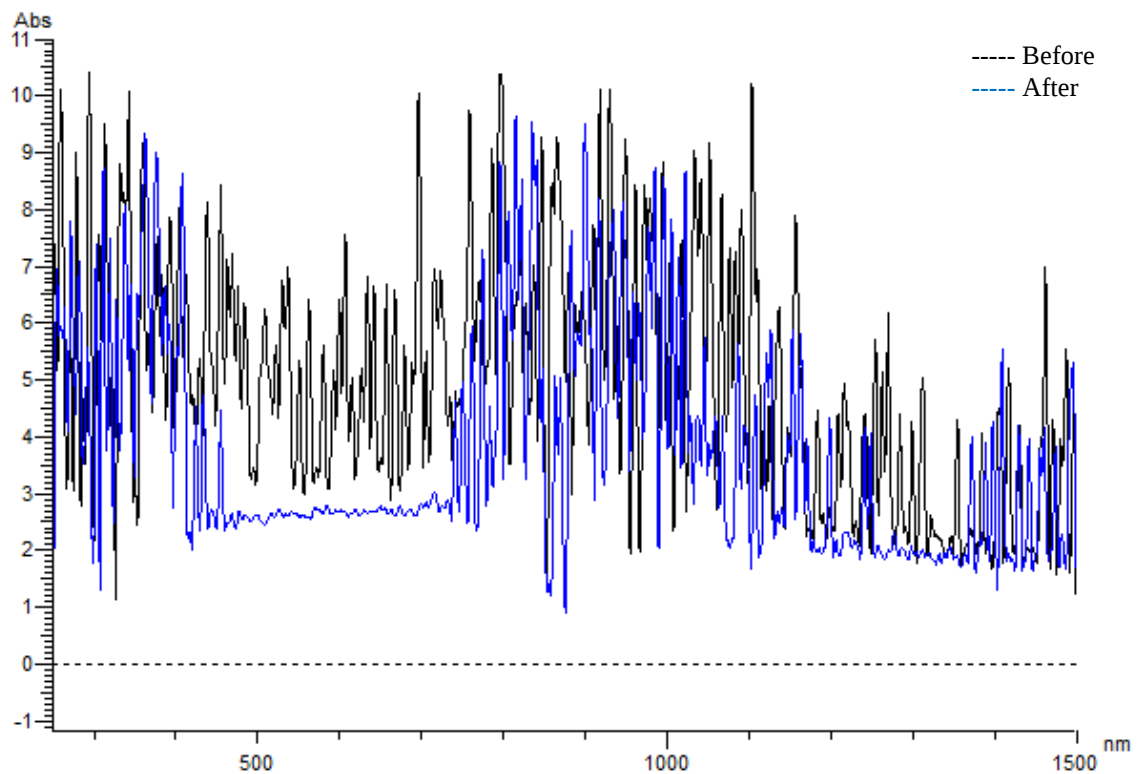


(ข)

รูปที่ 4-29 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC07_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังย้งด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

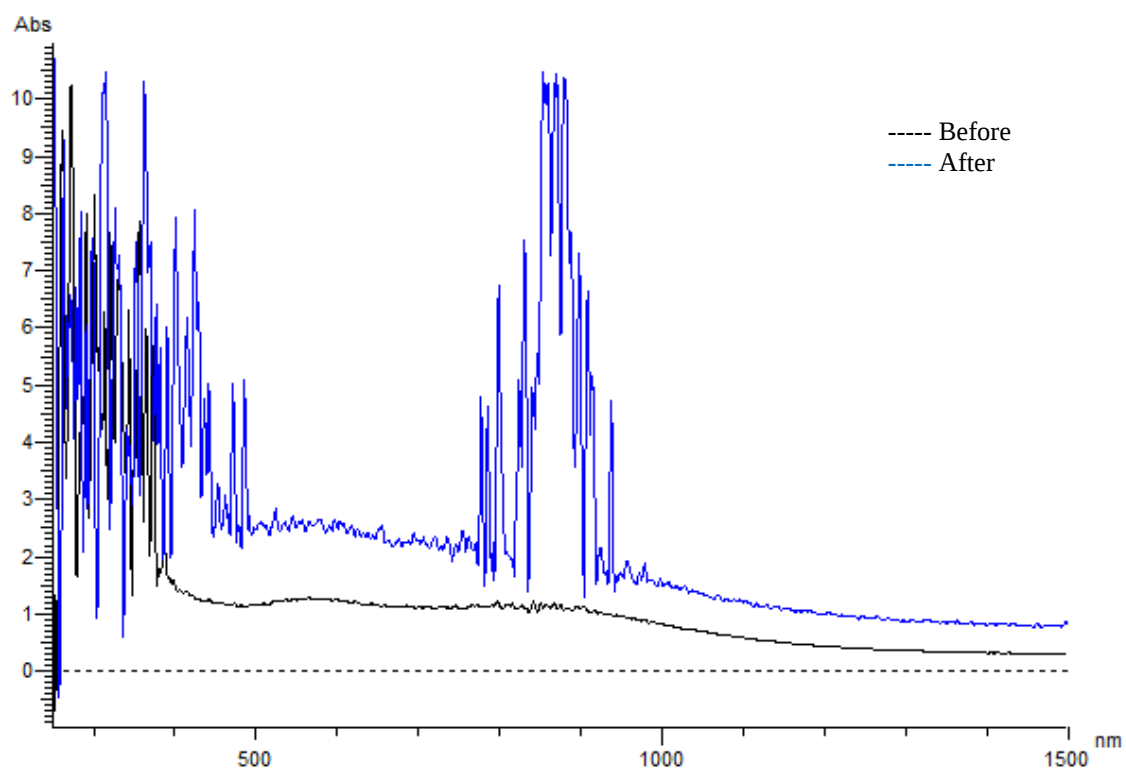


(ก)

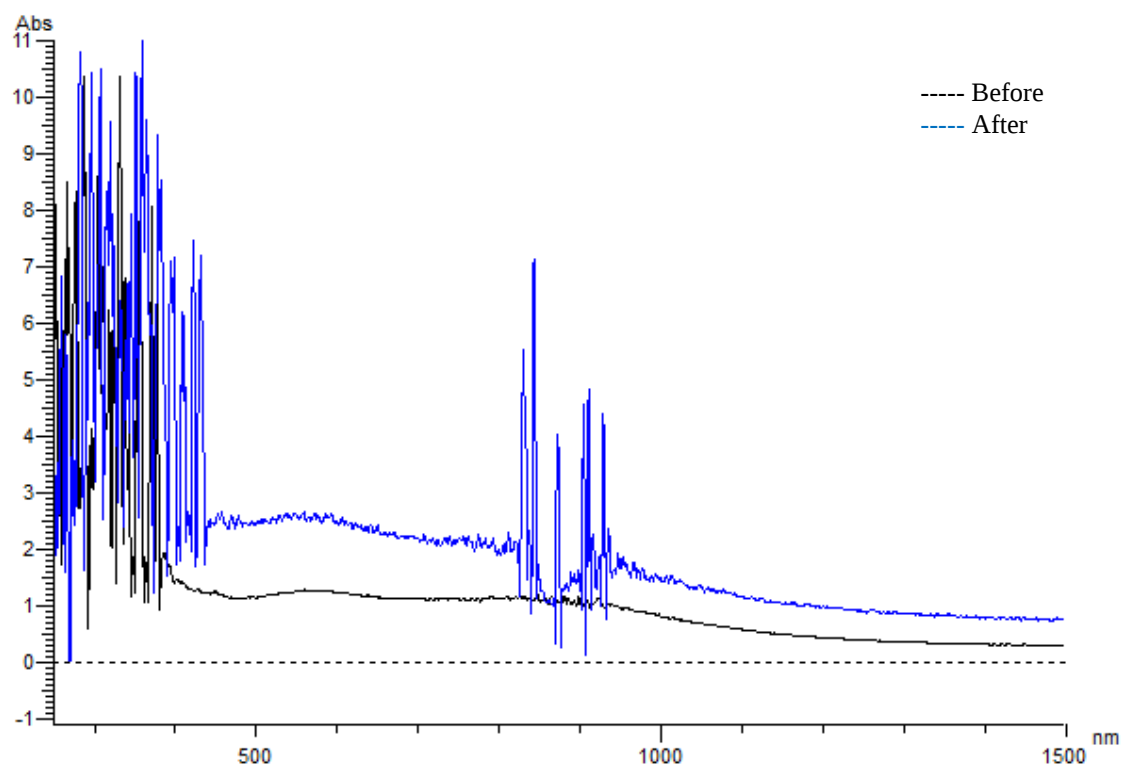


(ข)

รูปที่ 4-30 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

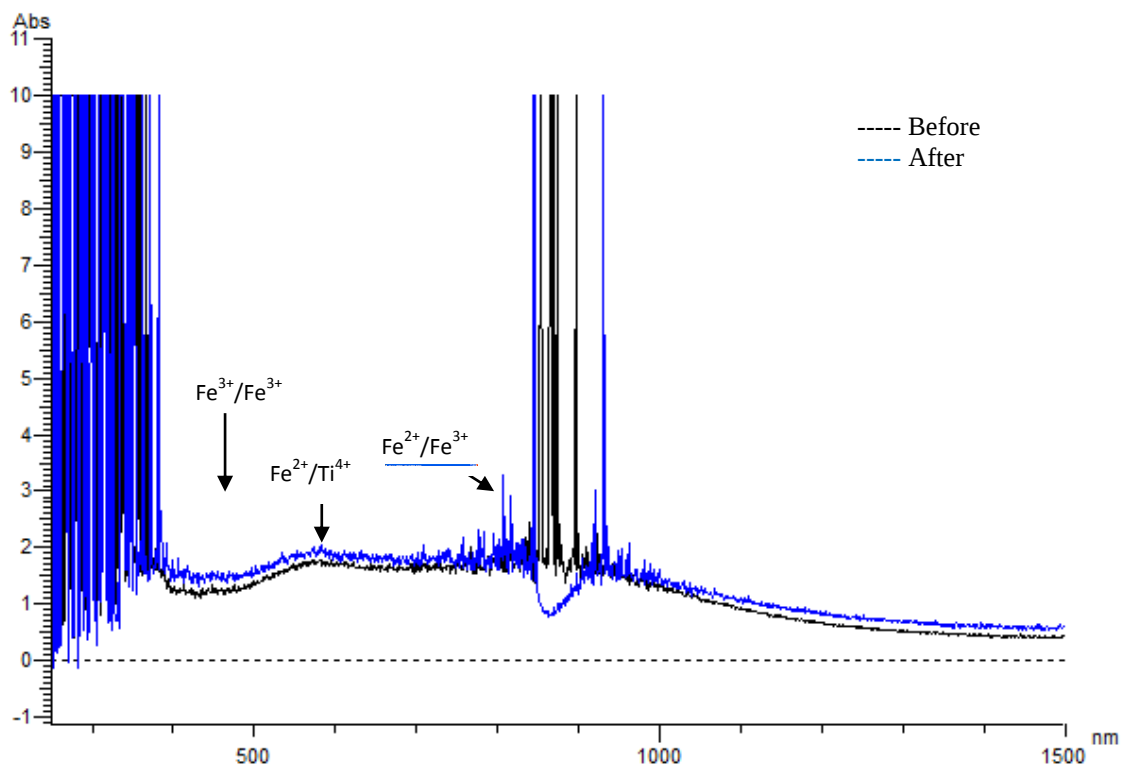


(ก)

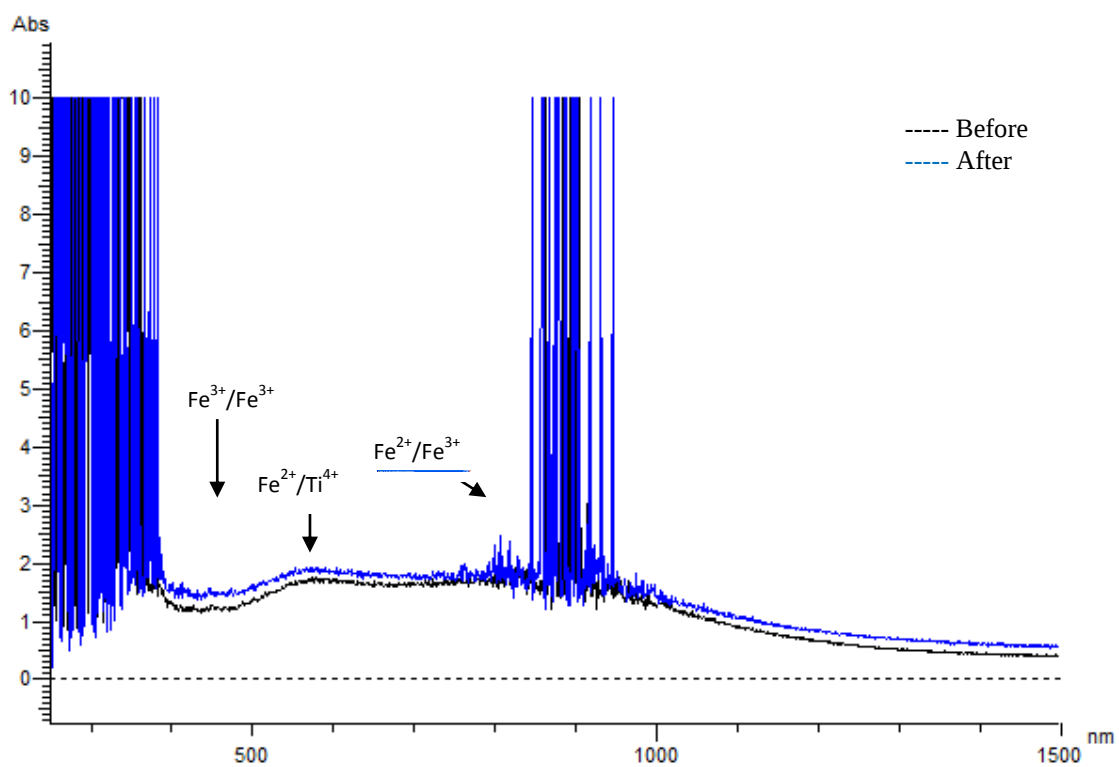


(ข)

รูปที่ 4-31 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC15_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

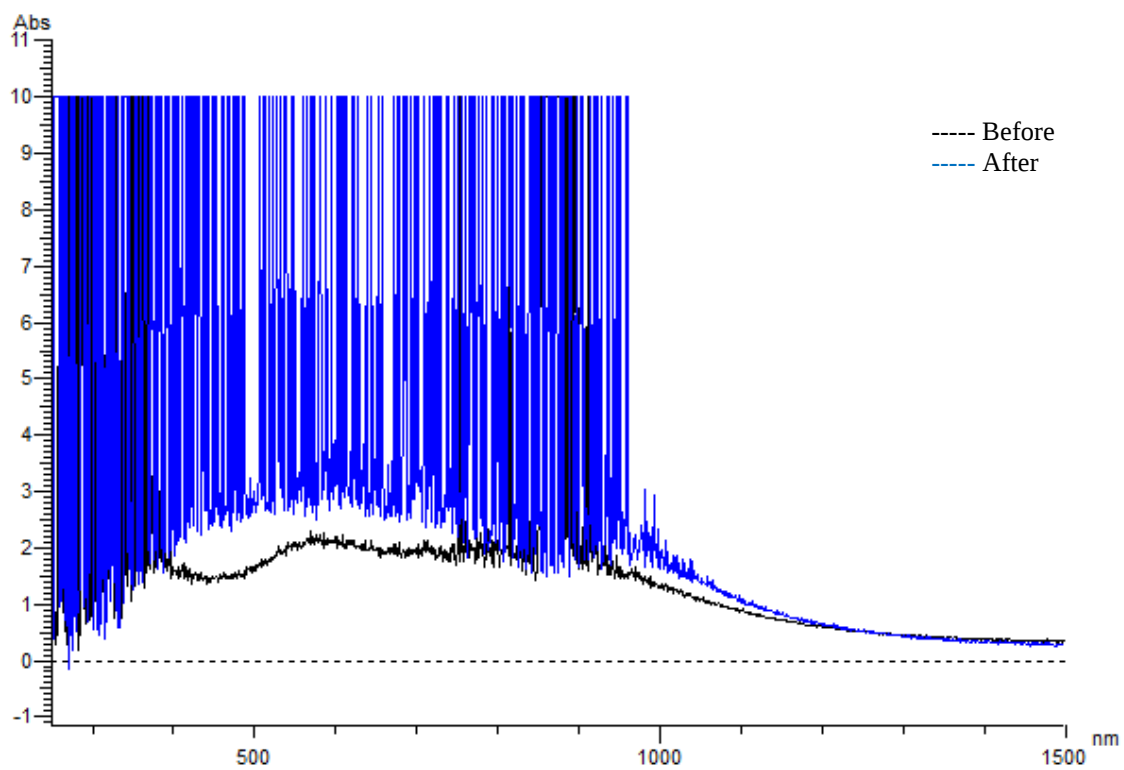


(ก)

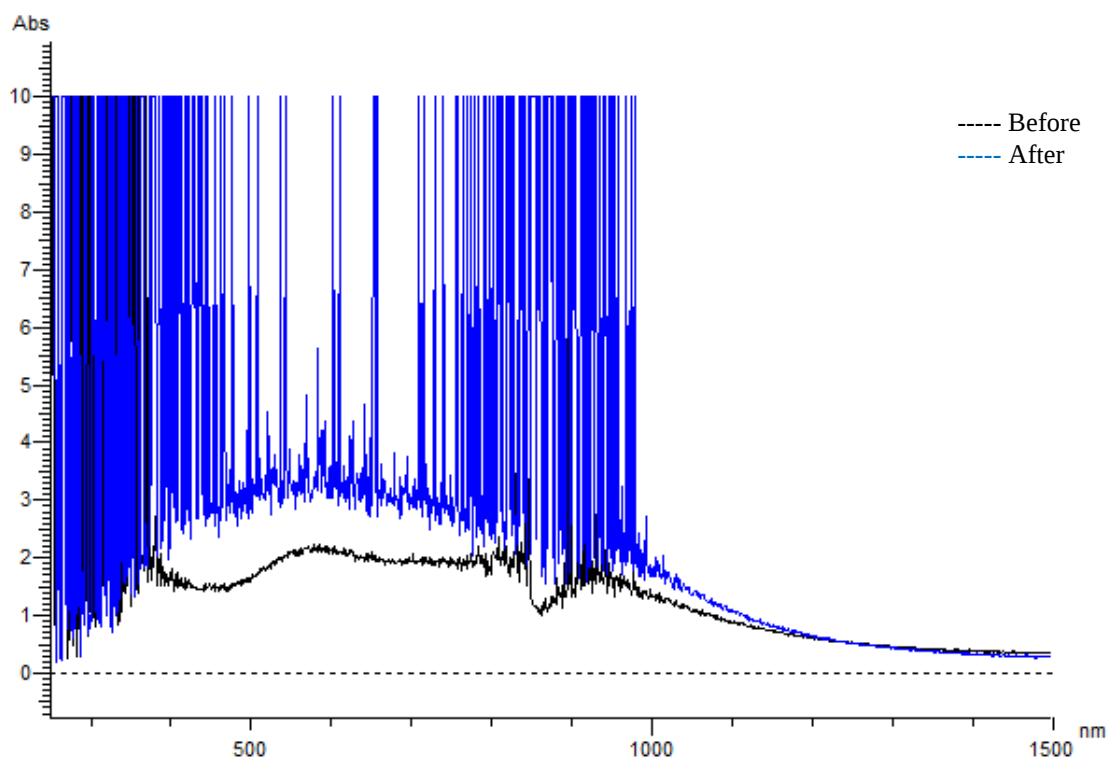


(ข)

รูปที่ 4-32 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC16_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

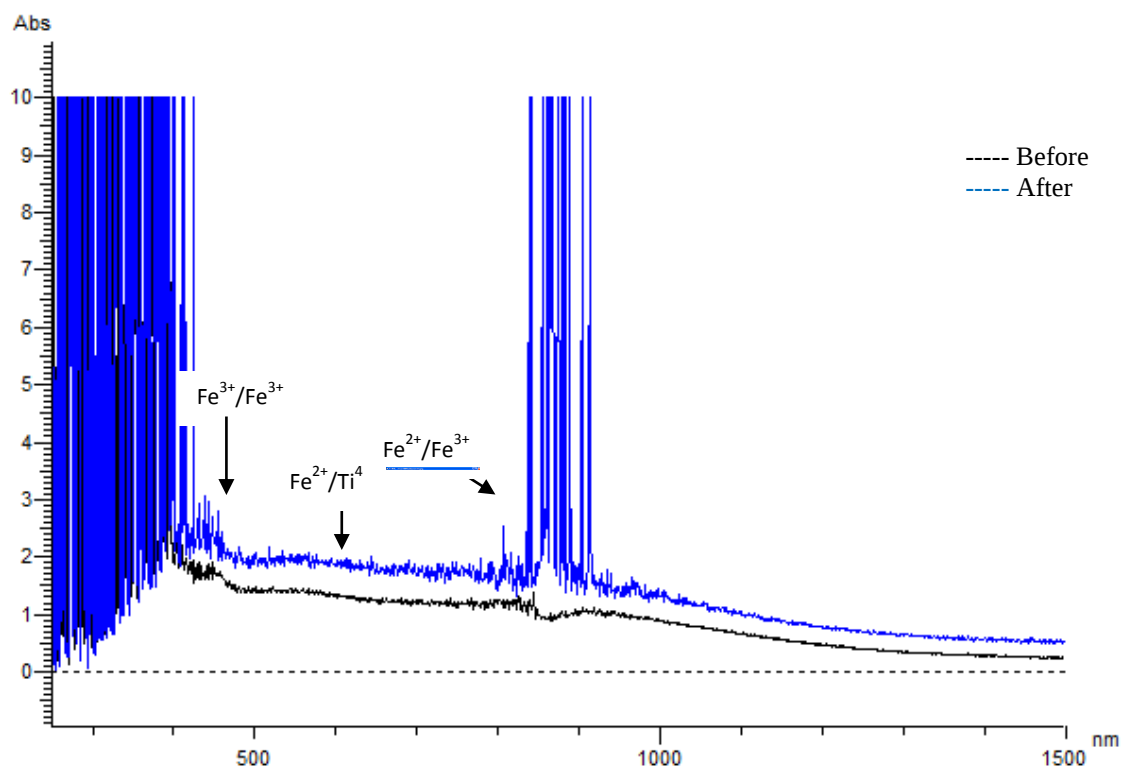


(ก)

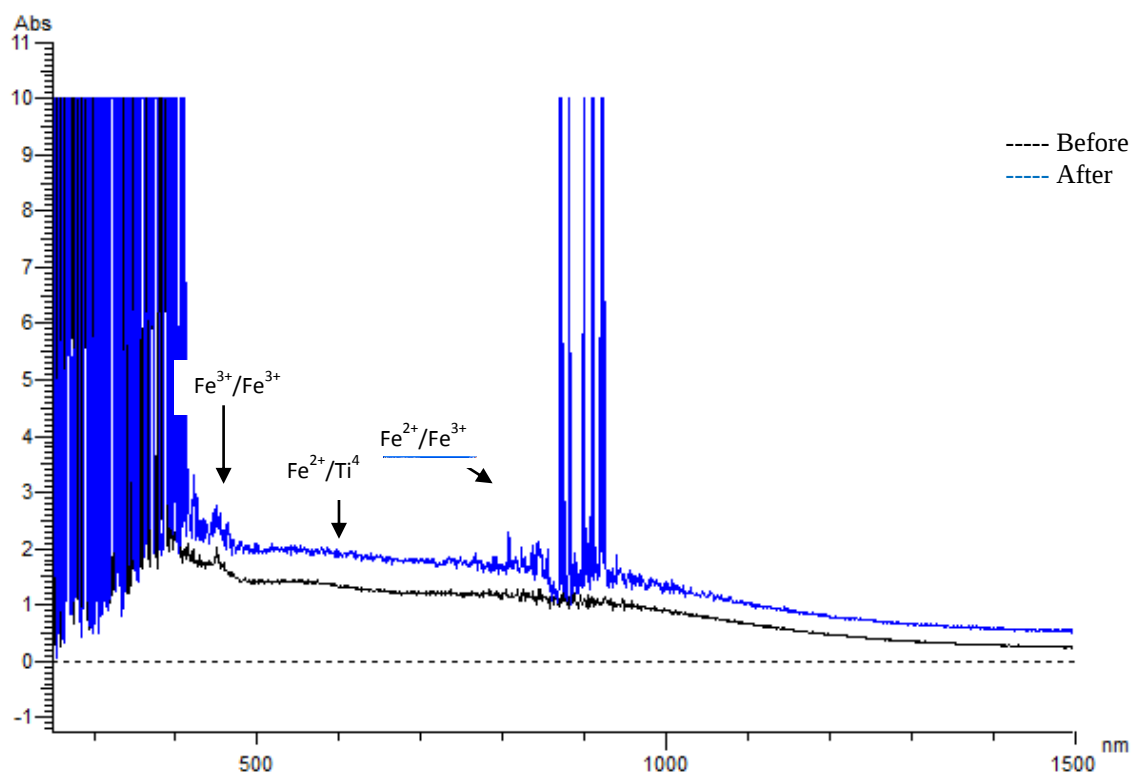


(ข)

รูปที่ 4-33 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC17_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

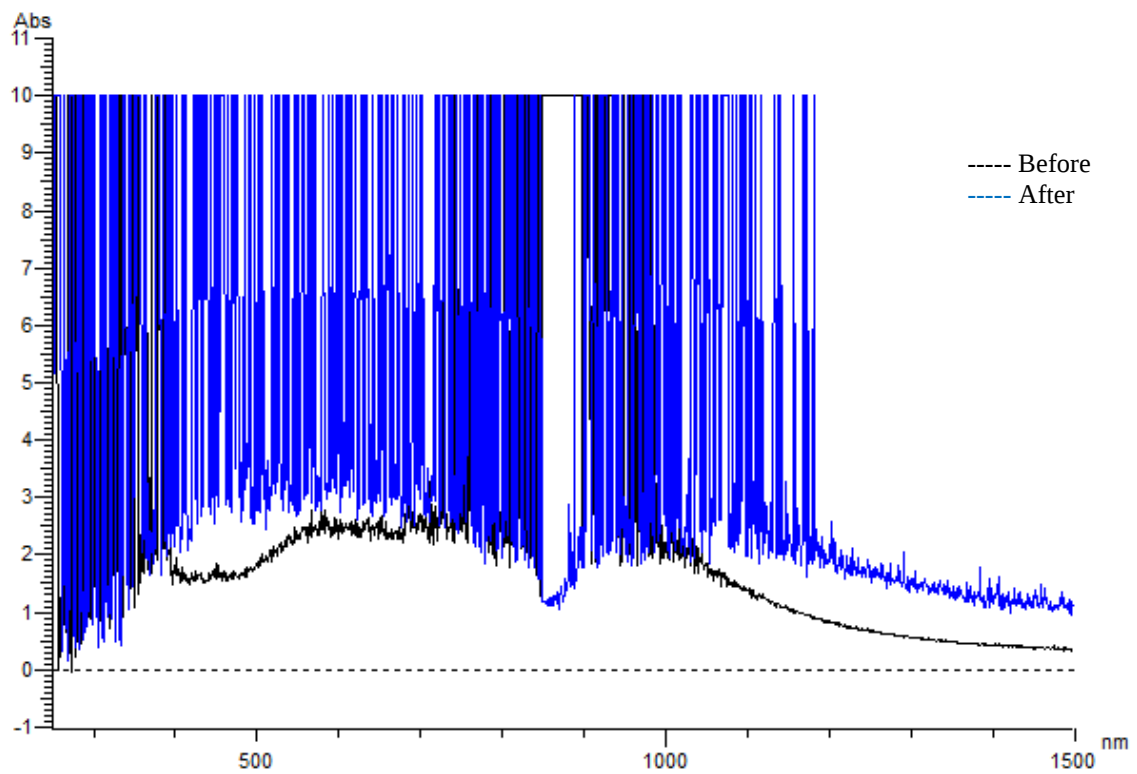


(ก)

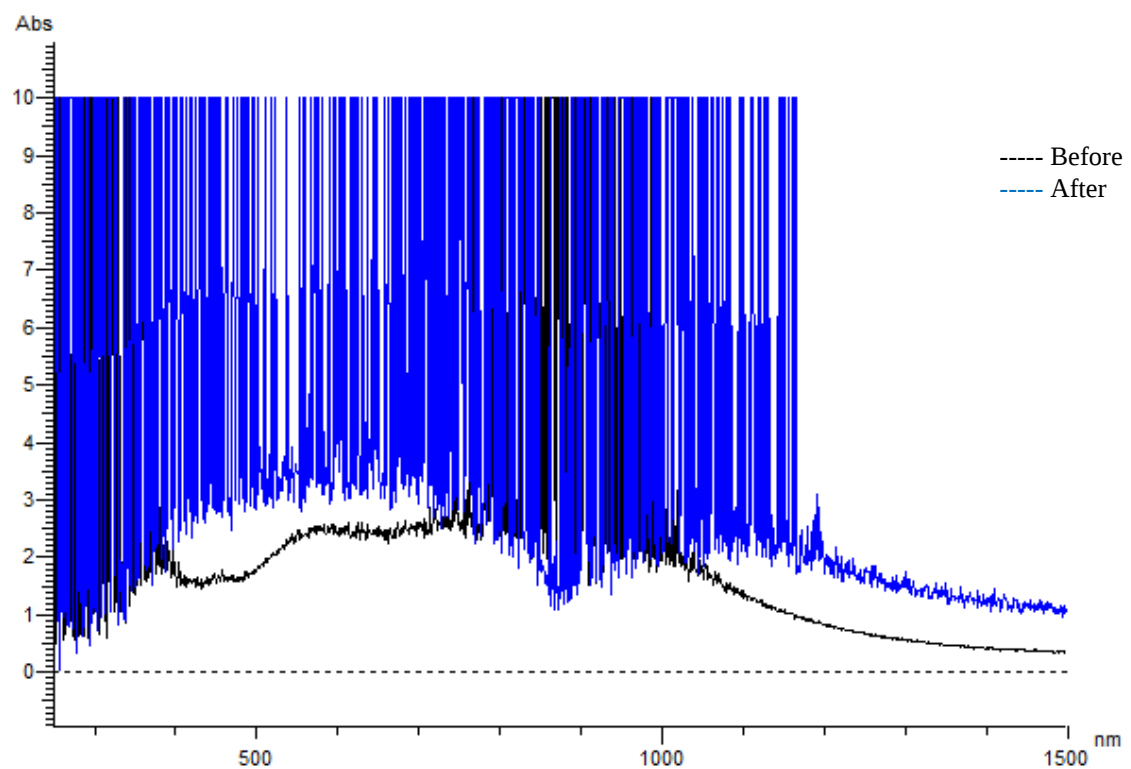


(ข)

รูปที่ 4-34 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC18_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน ออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-35 Absorption spectra ของตัวอย่าง PhrDkC19_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนออกซิเจน โดยที่ (ก) วัดในแนวแกน 0 องศา (ข) วัดในแนวแกน 90 องศา

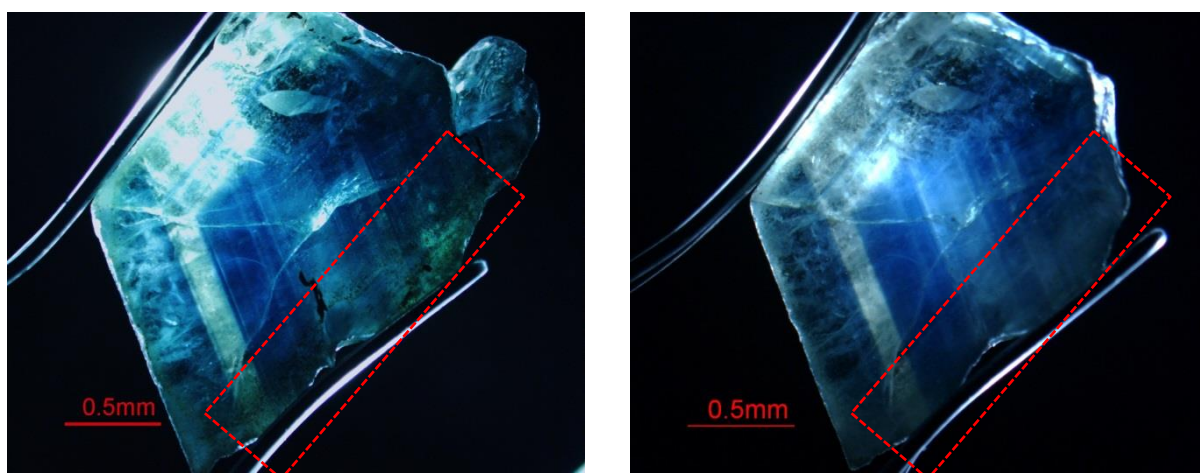
ในการพิจารณากราฟการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) ของพลอยแซปไฟร์เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ peak ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกลไกการให้สีของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน ได้แก่ absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 380 นาโนเมตร peak เล็กๆ ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และ peak $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร ส่วน absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT อยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร สำหรับการยิงฝังด้วยไอออนออกซิเจนในสภาวะสุญญากาศ ซึ่งไอออนออกซิเจนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ในกรณีพลอยแซปไฟร์กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้มจนมีลักษณะค่อนข้างทึบแสง จะพบว่าผลการวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงมักจะไม่ได้แสดงรูปแบบการดูดกลืนแสงที่ชัดเจน โดยจะแสดงลักษณะสเปกตรัมที่ดูดกลืนสูงเนื่องจากแซปไฟร์ค่อนข้างทึบแสง (รูปที่ 4-30) แต่เนื่องจากอิทธิพลของไอออนออกซิเจนส่งผลให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น และทำให้แซปไฟร์แสดงสีน้ำเงินสดชัดเจนขึ้นในบางตัวอย่าง (รูปที่ 4-28) โดยออกซิเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี มลทินขนาดเล็กในเนื้อแซปไฟร์ถูกแปรสภาพให้มีขนาดเล็กลงหรือสลายไป และออกซิเจนไอออนที่ฝังเข้าไปในแซปไฟร์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในแซปไฟร์ เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งให้สีเหลืองและทำให้แซปไฟร์มีสีที่สว่างขึ้น สเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงที่เกิดจากเฟอร์ริกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สีน้ำเงินทึบแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะของสีน้ำเงินที่สว่างเพิ่มมากขึ้น

4.2.2 การยิงด้วยไอออนไนโตรเจน

ในการทดลองนี้ เลือกใช้พลอยหลากหลายเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงในลักษณะต่างๆ โดยการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน โดสที่ใช้ 1.2×10^{18} ions/cm² ผลการทดลองแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม

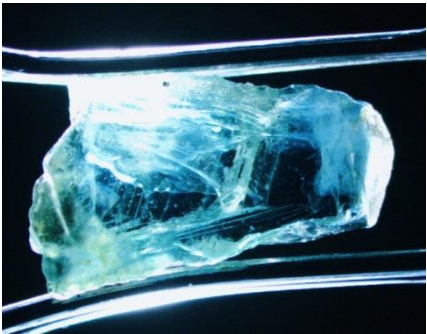
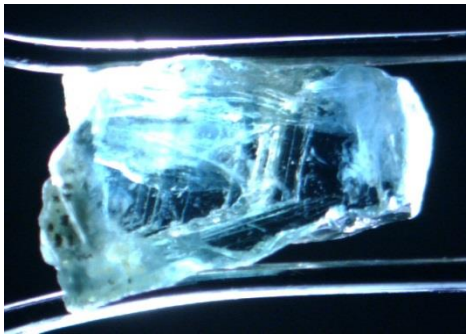
ก. กลุ่มพลอยน้ำเงินแกมเขียว

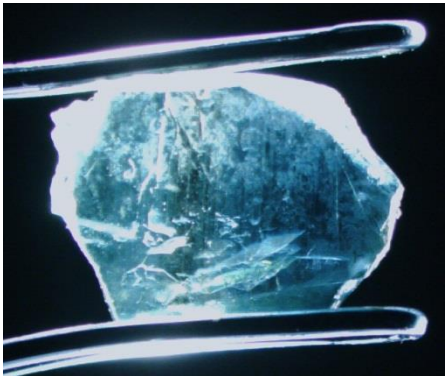
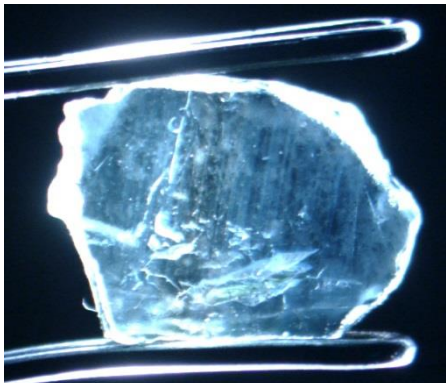
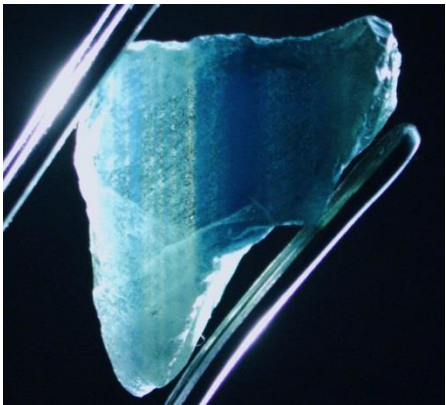
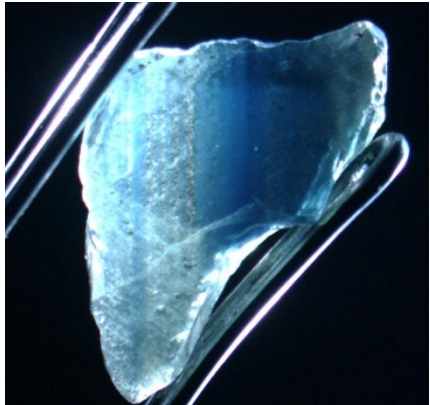
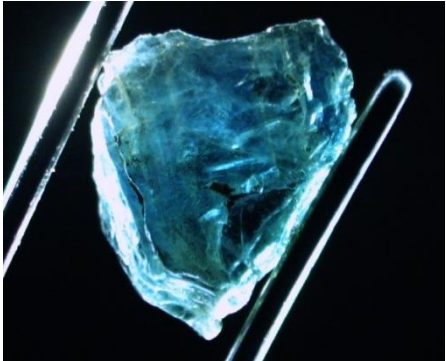
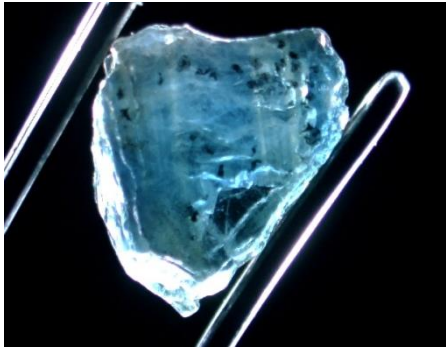
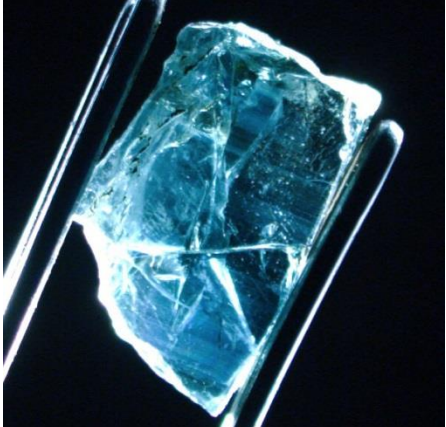
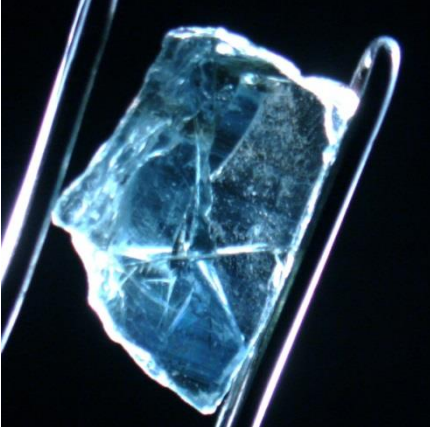
พบว่า ในพลอยกลุ่มบางกะจะซึ่งมีสีเขียวกระจายเป็นหย่อมๆ หลังยิงไอออนสีเหลืองเขียวหายไป และพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-36 และตารางที่ 4-4 กราฟการดูดกลืนแสงแสดงดังรูปที่ 4-37 ถึง 4-42

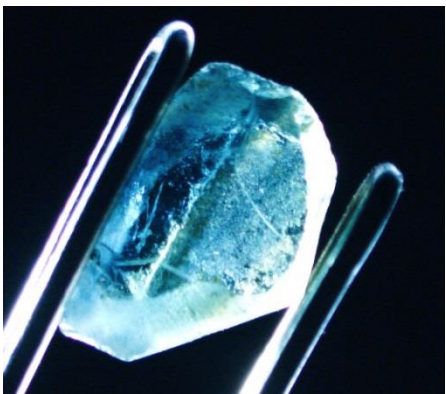
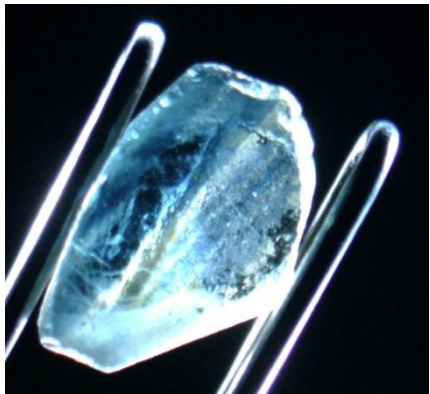
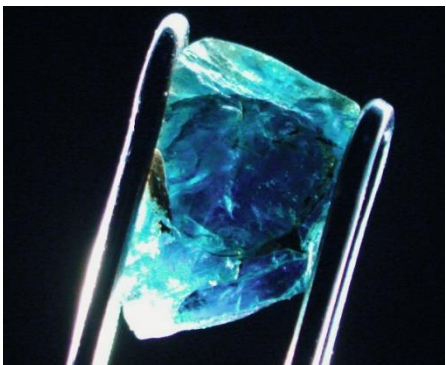
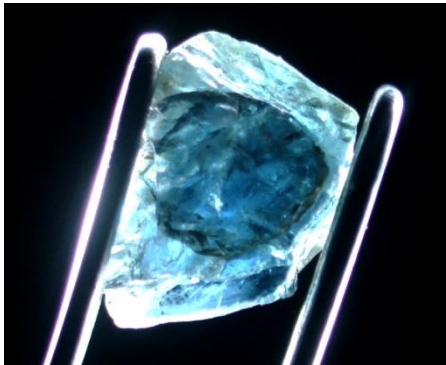


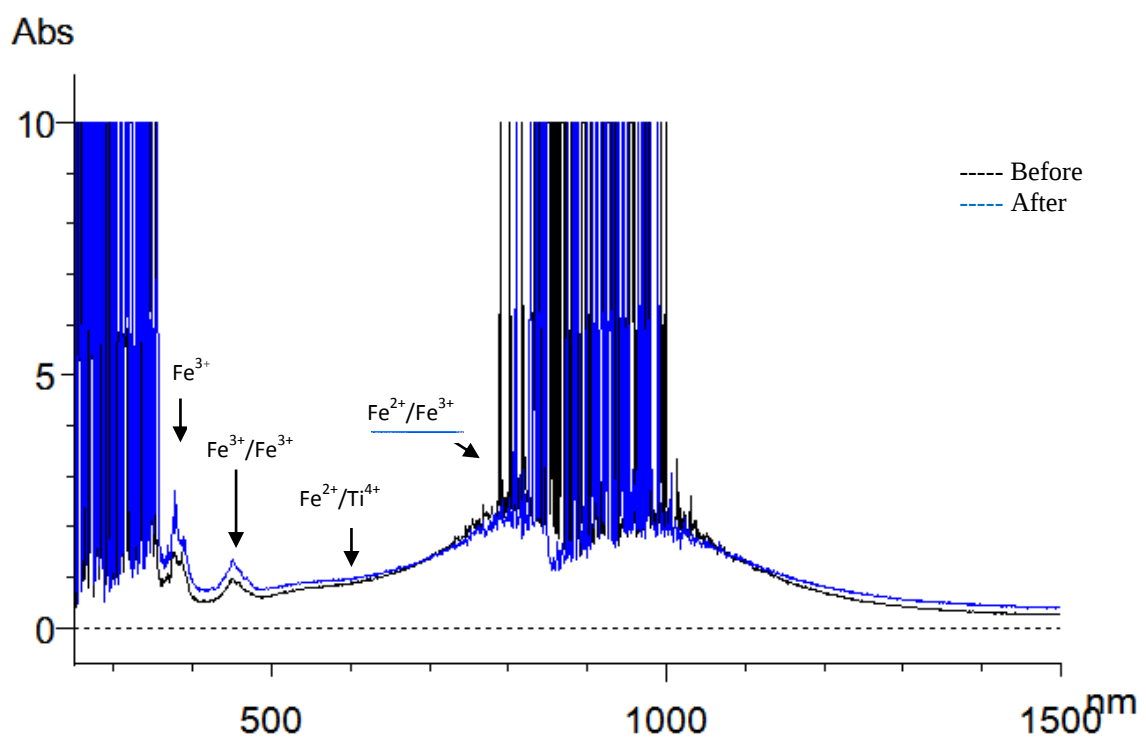
รูปที่ 4-36 ตัวอย่าง BkZn27_02 เปรียบเทียบก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะเห็นว่า เหลือสีเขียวหายไป และพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น

ตารางที่ 4-4 ผลของการยิงไอออนไนโตรเจนต่อพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว แหล่งบางกะจะ

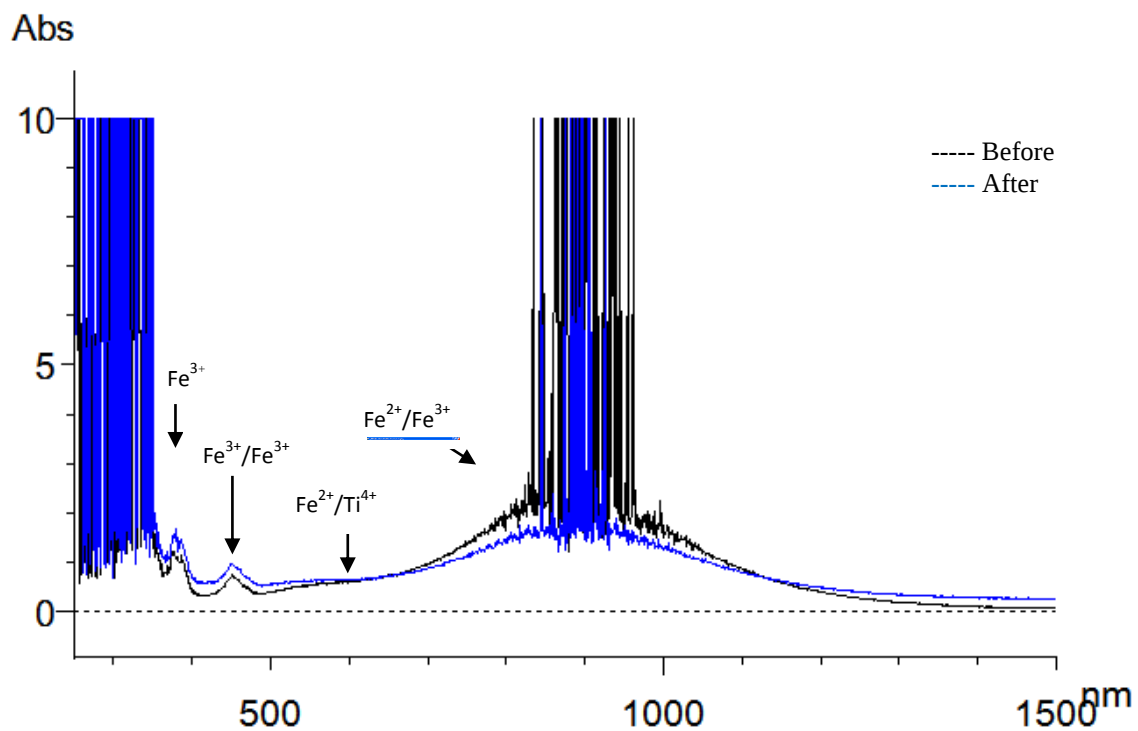
ตัวอย่าง	ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน	หมายเหตุ
BkZn02_2			สีเหลืองเขียว ลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน	หมายเหตุ
BkZn04_2			สีเหลืองเขียว ลดลง
BkZn11_2			สีเหลืองเขียว ลดลง
BkZn13_2			เหลืองเขียว ลดลง
BkZn15_2			สีเหลืองเขียว ลดลง

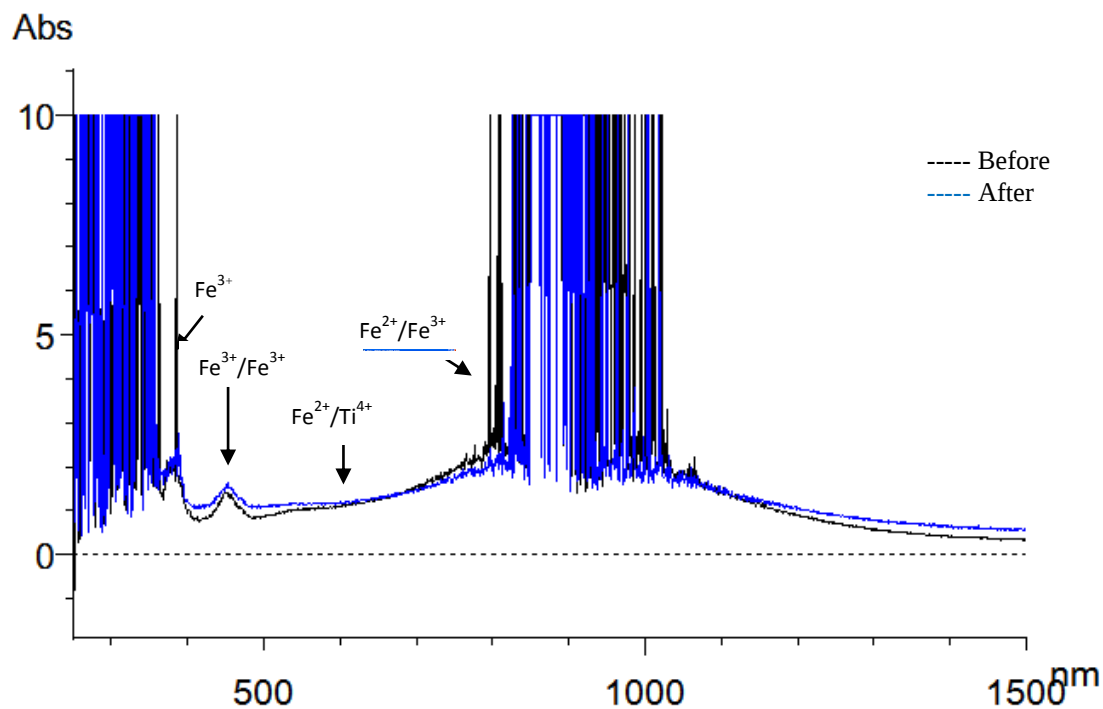
ตัวอย่าง	ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน	หมายเหตุ
BkZn20_2			สีเหลืองเขียว ลดลง
BkPt04_2			สีเหลืองเขียว ลดลง



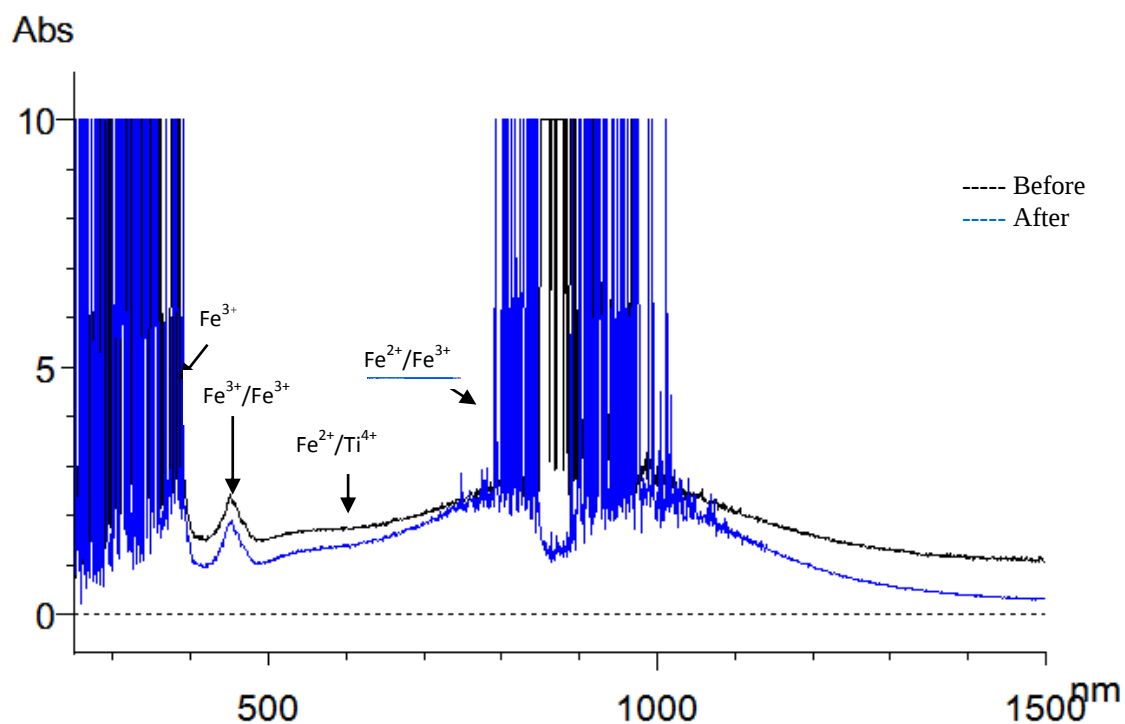
รูปที่ 4-37 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn02_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อน และหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



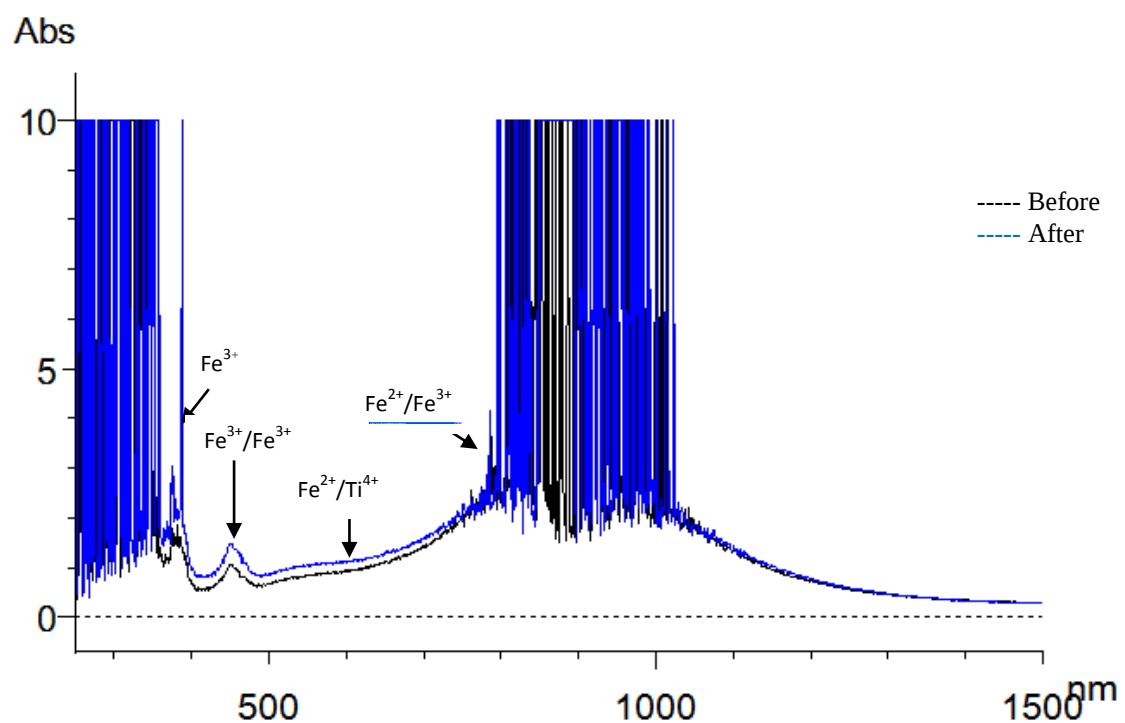
รูปที่ 4-38 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn04_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



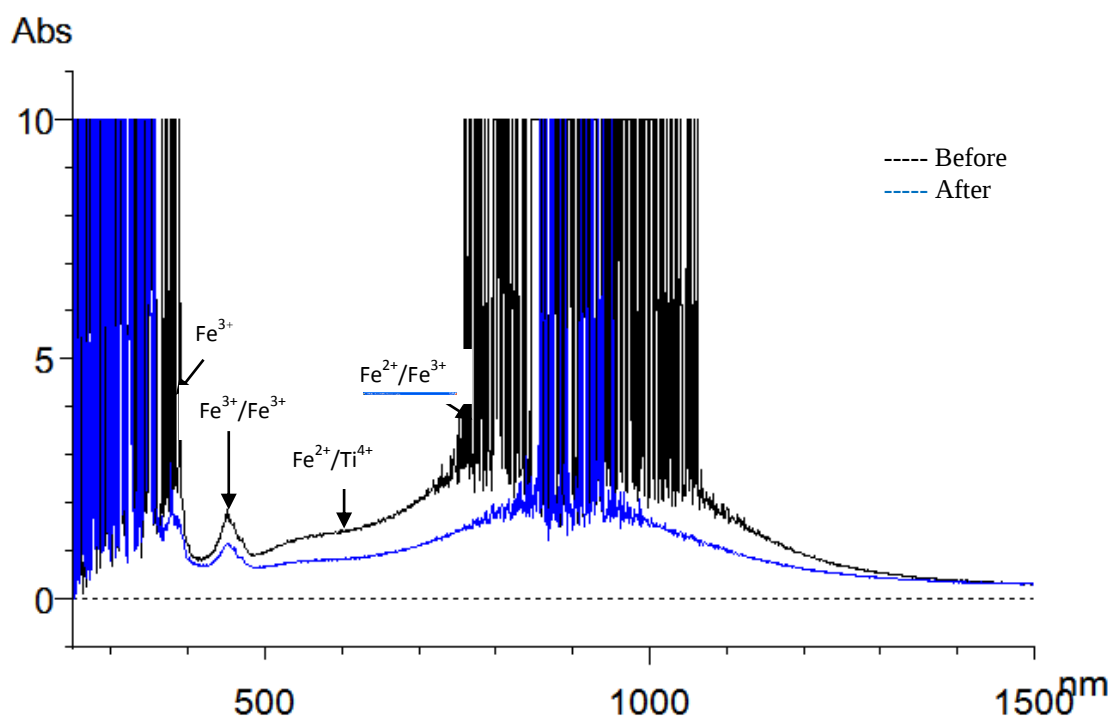
รูปที่ 4-39 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



รูปที่ 4-40 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn11_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



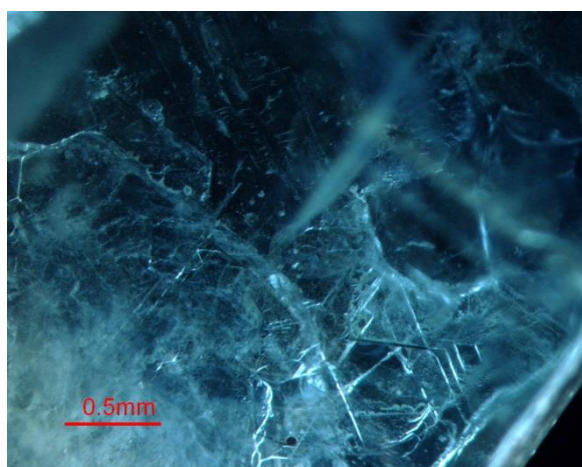
รูปที่ 4-41 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn15_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



รูปที่ 4-42 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง BkZn20_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน

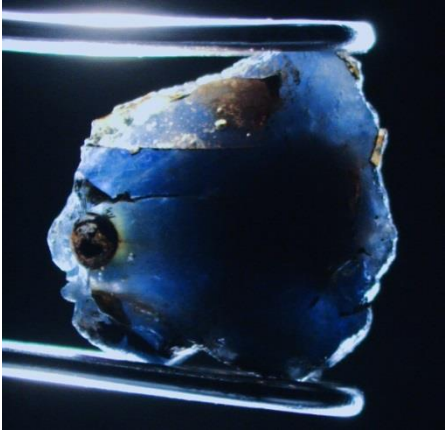
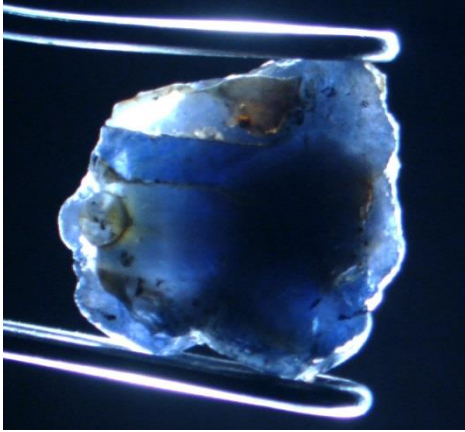
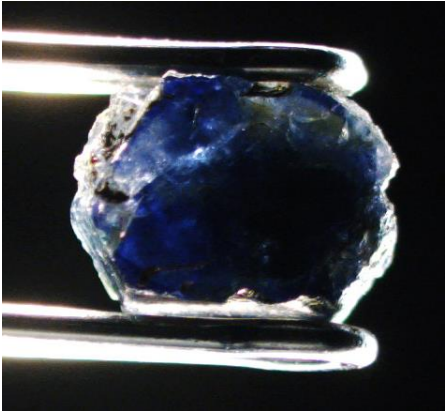
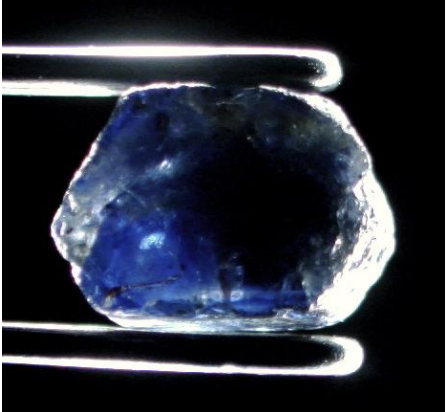
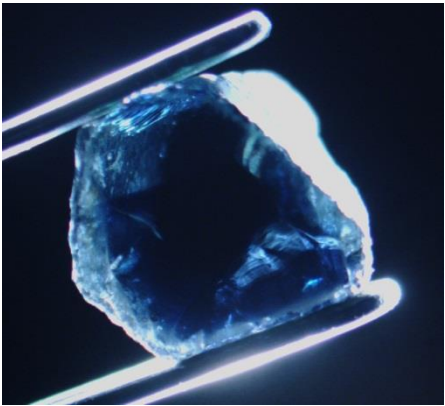
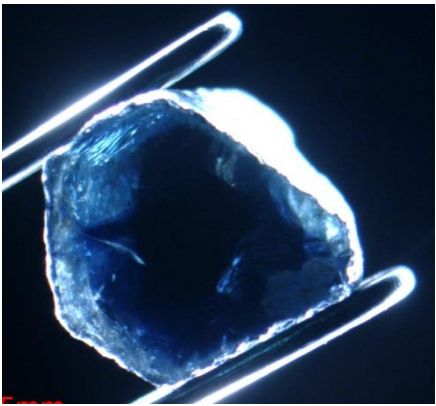
ข. กลุ่มพลอยสีน้ำเงิน

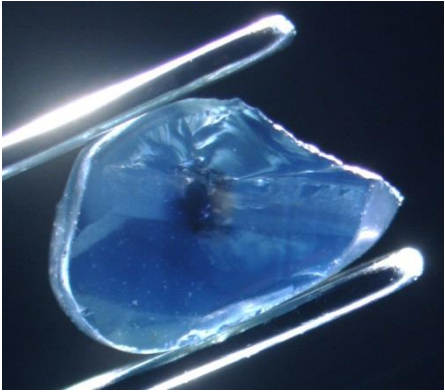
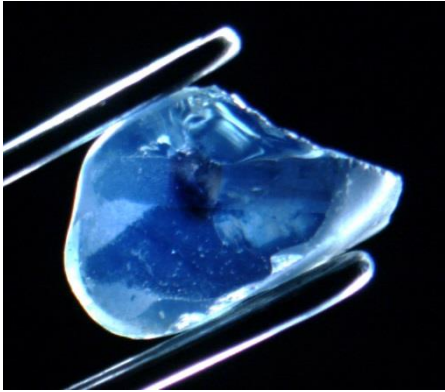
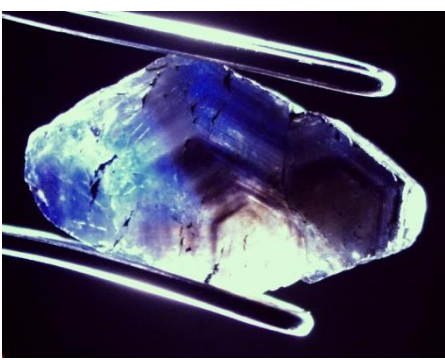
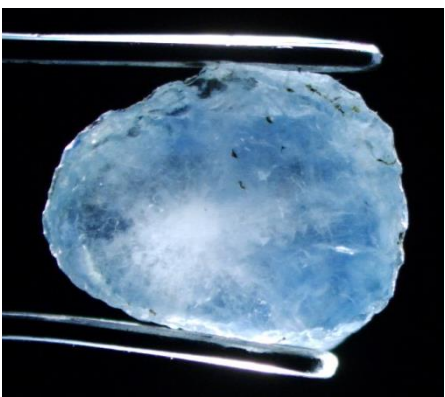
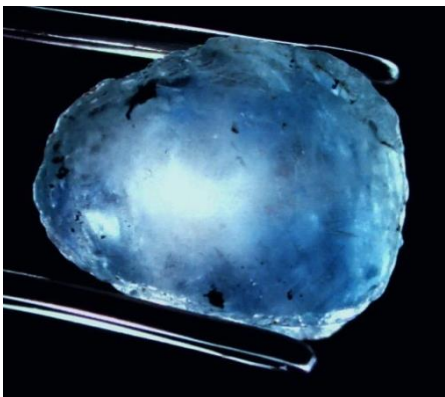
พลอยทดลองในกลุ่มนี้ค่อนข้างหลากหลาย ทั้งพลอยแพร์ พลอยตกรม และพลอยกาญจนบุรี ซึ่งในกลุ่มพลอยที่มีความทึบแสงมาก พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น และมีสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น และ ส่วนพลอยที่ค่อนข้างใสมีสีฟ้า จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4-43 และตารางที่ 4-5 กราฟการดูดกลืนแสงแสดงดังในรูปที่ 4-44 และ 4-45

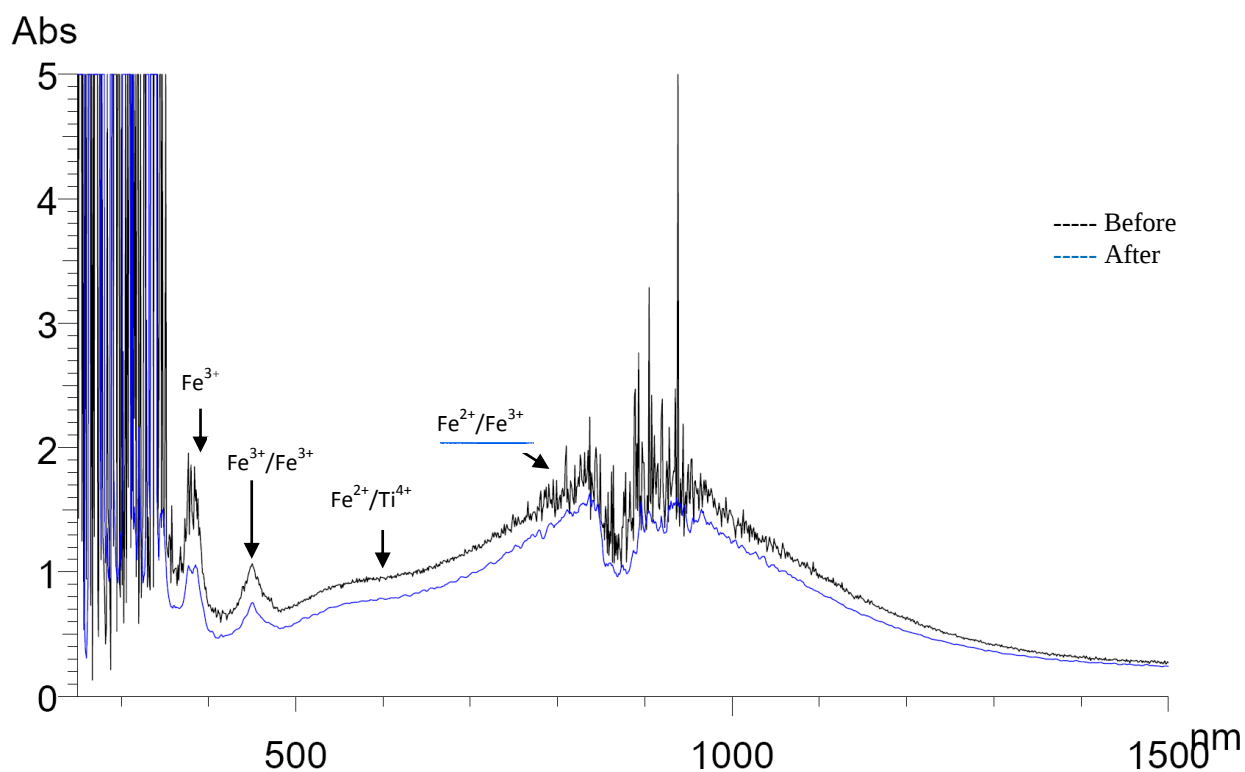


รูปที่ 4-43 ตัวอย่าง BkSLZn 04_2 เปรียบเทียบก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะเห็นว่าพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น

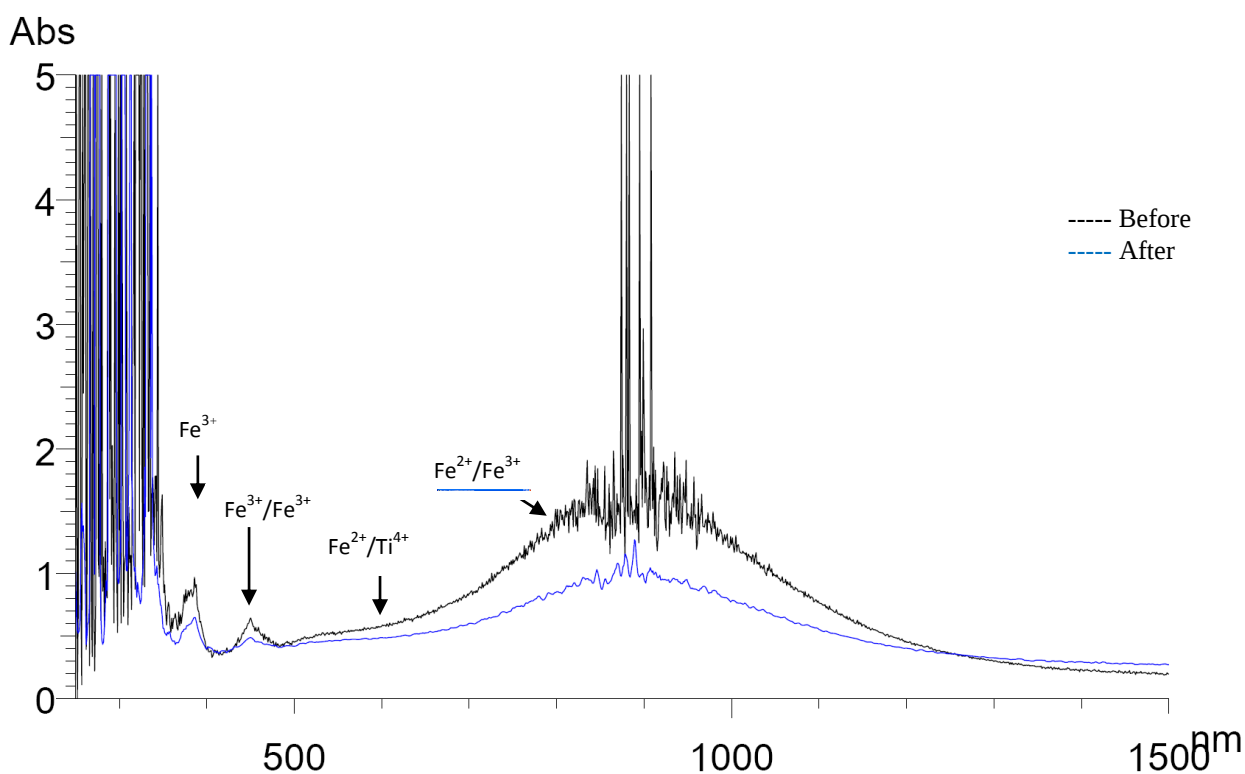
ตารางที่ 4-5 ผลของการยิงไอออนไนโตรเจนต่อพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว แหล่งแพร่ แหล่งตากพรหม และแหล่งกาญจนบุรี

ตัวอย่าง	ก่อนยิงไอออน	หลังยิงไอออน	หมายเหตุ
PhrDkC12_2			โปร่งแสงขึ้น
PhrDkC13_2			โปร่งแสงขึ้น
TpDkC01_2			โปร่งแสงขึ้น

TpZn05_2			โปร่งแสงขึ้น
KcOp01_2			โปร่งแสงขึ้น
KcPt06_2			สีน้ำเงินเข้มขึ้น
KcPt08_2			โปร่งแสงขึ้น



รูปที่ 4-44 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง KcPt06_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน



รูปที่ 4-45 Absorption spectra วัดในแนวแกน 90 องศา ของตัวอย่าง KcPt08_2 เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออนไนโตรเจน

ในการพิจารณากราฟการดูดกลืนแสง (absorption spectrum) ของพลอยแซปไฟร์เปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังยิงด้วยไอออน จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ peak ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกลไกการให้สีของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน ได้แก่ absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 380 นาโนเมตร peak เล็กๆ ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และ peak $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร ส่วน absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT อยู่ที่ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร สำหรับการทดลองยิงฝังด้วยลำไอออนไนโตรเจนในสถานะสุญญากาศ ซึ่งไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ไนโตรเจนไอออนจะถูกยิงฝังเข้าไปในเนื้อพลอย และถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวซึ่งมีสีเหลืองจากสีของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) และคู่เหล็กเฟอร์รัสและเฟอร์ริกที่มีกระบวนการดูดกลืนแสงแบบแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน (Intervalence charge transfer) ที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้าง ซึ่งเป็นสาเหตุการเกิดสีน้ำเงินเข้มในแซปไฟร์ที่มีปริมาณของเหล็กสูง ที่มีการเกิดสัมพันธ์กับหินแมกมา (Magmatic rock) หลังการยิงฝังไอออนไนโตรเจนจะพบว่า สีเหลืองจางลงจนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น (รูปที่ 4-39) แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงที่ลดลงในตำแหน่งการดูดกลืนของเฟอร์ริกแบบต่างๆ ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ เกิดจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจากเฟอร์ริกไปเป็นเฟอร์รัส ส่งผลให้สีเหลืองในแซปไฟร์ลดลง ประกอบกับการดูดกลืนแสงของคู่เหล็กเฟอร์รัสและเฟอร์ริคลดลงอีกด้วย ผลที่ได้คือทำให้สีเขียวเจือจางลงหรือหายไปและได้สีน้ำเงินที่มีความสว่างเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน

เทคนิคการเผาพลอยในงานวิจัยครั้งนี้ มุ่งแก้ปัญหาแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มีสีน้ำเงินเข้มเกือบดำ และแซปไฟร์สีน้ำเงินที่มีโซนสีเขียว โดยเฉพาะกลุ่มที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหิน basalt

4.3.1 การทดลองเผาด้วยเตาไฟฟ้า

มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหา blue sapphire สีเข้ม-มืด และ/หรือ ขุ่นมัวให้มีสีอ่อนลง และ/หรือ ใสขึ้น โดยใช้เตาไฟฟ้าภายใต้สภาวะ oxidize (เป็นสภาวะมีออกซิเจน 100% โดยเติมก๊าซออกซิเจนเข้าเตา 3 ลิตรต่อนาทีก) แบ่งการทดลองเผาออกเป็น 2 ชุด คือ

(ก) การเผาชุดที่ 1

เป็นการเผาซ้ำหลายครั้ง ที่อุณหภูมิ 1200 °C 1400 °C 1600 °C และ 1750 °C รวม 4 ครั้ง โดยเย็นอุณหภูมิเท่ากัน คือ ครั้งละ 5 ชั่วโมง รวม 20 ชั่วโมง ใช้ตัวอย่างในการศึกษาจากแหล่งแพร่ 8 ตัวอย่าง และตัวอย่างจากกาญจนบุรี 1 ตัวอย่าง รวม 9 ตัวอย่าง

แบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- **กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม** มีสีน้ำเงินเข้มมากกระจายทั่วทั้งเม็ด เป็นตัวอย่างจากแหล่งแพร่ จำนวน 1 ตัวอย่าง คือ PhrDkB 02_1
- **กลุ่มทึบแสง** สีเข้มมากและทึบแสง เป็นตัวอย่างจากแหล่งกาญจนบุรี จำนวน 1 ตัวอย่างคือ KcOp 01_1
- **กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม** มีแกนกลางสีน้ำเงินเข้มจนเกือบดำ บางเม็ดแสดงลักษณะของ Trapiche จำนวน 7 ตัวอย่าง เป็นตัวอย่างจากแหล่งแพร่ทั้งหมด คือ PhrDkC 08_1, PhrDkC 09_1, PhrDkC 10_1, PhrDkC 11_1, PhrDkC 12_1, PhrDkC 13_1 และ PhrDkC 14_1

สภาวะที่ใช้ในการเผา

อุณหภูมิสูงสุด 1200 °C 1400 °C 1600 °C และ 1750 °C โดยใช้สภาวะในการเร่งอุณหภูมิ และการเอาพลอยออกแบบเดียวกันทั้ง 4 ครั้ง คือ

ใช้อัตราเร่ง 200 °C ต่อชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ 25 – 200 °C

ใช้อัตราเร่ง 350 °C ต่อชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ 200 – 600 °C

ใช้อัตราเร่ง 400 °C ต่อชั่วโมง ในช่วงอุณหภูมิ 600 °C จนถึงอุณหภูมิสูงสุด

เผาแบบยก คือนำพลอยออกจากเตาทันทีเมื่อยืนอุณหภูมิสูงสุดครบ 5 ชั่วโมง

ผลการทดลองเผาชุดที่ 1

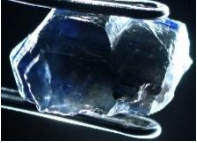
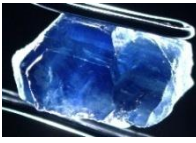
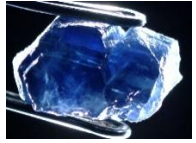
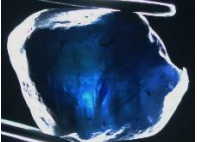
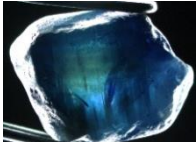
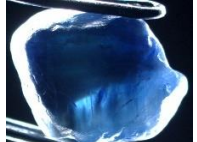
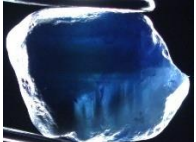
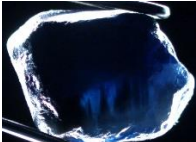
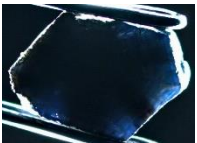
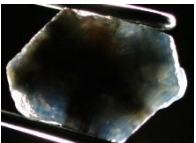
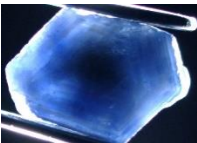
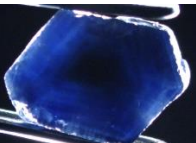
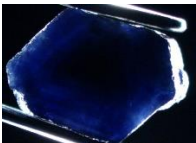
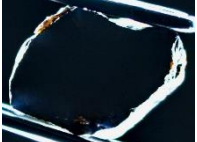
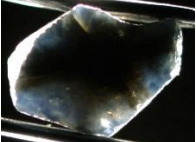
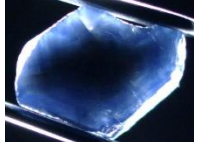
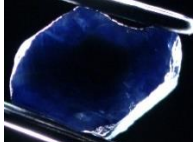
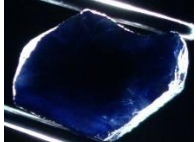
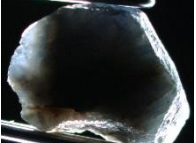
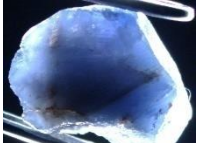
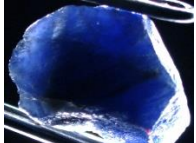
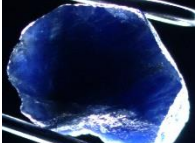
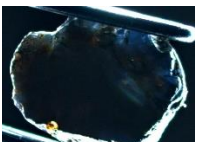
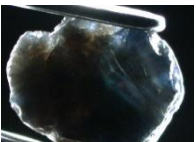
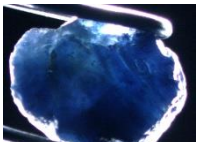
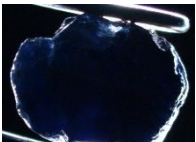
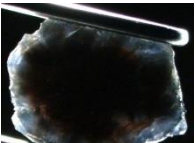
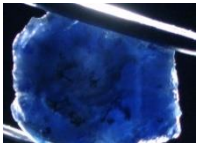
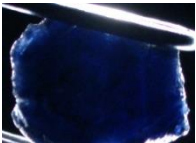
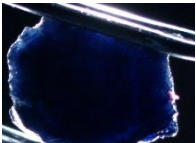
การเปลี่ยนแปลงหลังเผาของตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม สามารถจำแนกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้

ลักษณะที่ 1 ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง ทำให้เห็นสีน้ำตาลบริเวณที่เป็นลักษณะ Trapiche ชัดเจนขึ้น เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและสีน้ำตาลลดลง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น และเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1750 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมากจนเกือบทึบแสงคล้ายกับตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการเผา ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 7 ตัวอย่างจาก 9 ตัวอย่าง คิดเป็น 78 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ตัวอย่าง KcOp 01_1, PhrDkB 02_1, PhrDkC 08_1, PhrDkC 10_1, PhrDkC 11_1, PhrDkC 13_1 และ PhrDkC 14_1 ดังตารางที่ 4-6

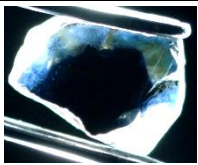
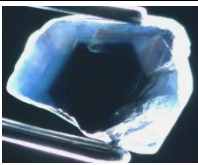
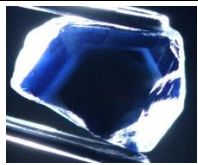
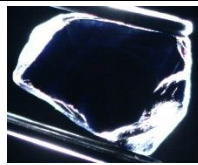
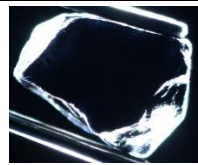
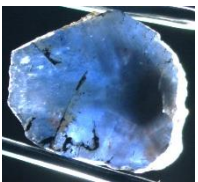
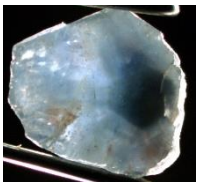
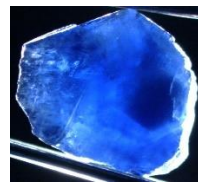
ลักษณะที่ 2 ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง ทำให้เห็นลักษณะแกนกลาง (core) สีน้ำเงินเข้มเป็นรูปร่างที่ชัดเจนขึ้น เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมาก และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1750 °C แกนกลางของตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมาก และทำให้พลอยมีลักษณะสีเข้มจนเกือบทึบแสง ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 2 ตัวอย่าง จาก 9 ตัวอย่าง คิดเป็น 22 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkC 09_1 และ PhrDkC 12_1 ดังตารางที่ 4-7

การเปลี่ยนแปลงทั้งสองลักษณะ มีส่วนที่คล้ายกันคือภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น เป็นผลเนื่องจาก Fe^{2+} (FeO) บางส่วนเปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} (Fe_2O_3) เนื่องจากสภาวะ oxidize ลดการเกิดสีน้ำเงินที่เกิดจาก Fe^{2+} - Ti^{4+} IVCT (การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างเหล็กและไทเทเนียมซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสีน้ำเงินในโพลิน) และทำให้สีน้ำเงินจางลง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และสีน้ำตาลบริเวณที่เป็นลักษณะ Trapiche ซึ่งพบได้ในบางตัวอย่างลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO_2) ซึ่งในลักษณะที่ 1 แทรกอยู่ใน Trapiche ส่วนในลักษณะที่ 2 แทรกอยู่ใน core เริ่มสลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ที่ยังคงมีอยู่ในโครงสร้างเกิดเป็น Fe^{2+} - Ti^{4+} IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้แร่รูไทล์ สลายตัวออกมามากขึ้น และเกิดเป็นสีน้ำเงินเข้มมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4-6 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ภายหลังจากการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลง สีน้ำตาลเพิ่มมากขึ้น เห็นลักษณะ Trapiche ชัดเจนขึ้น และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นตั้งแต่ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และสีน้ำตาลลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1200 °C	หลังเผา 1400 °C	หลังเผา 1600 °C	หลังเผา 1750 °C
KcOp 01_1					
PhrDkB 02_1					
PhrDkC 08_1					
PhrDkC 10_1					
PhrDkC 11_1					
PhrDkC 13_1					
PhrDkC 14_1					

ตารางที่ 4-7 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลง เห็นลักษณะแกนกลางสีน้ำเงินเข้มชัดเพิ่มขึ้น และเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตั้งแต่ 1400 °C ขึ้นไป ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และแถบสีน้ำตาลลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1200 °C	หลังเผา 1400 °C	หลังเผา 1600 °C	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 09_1					
PhrDkC 12_1					

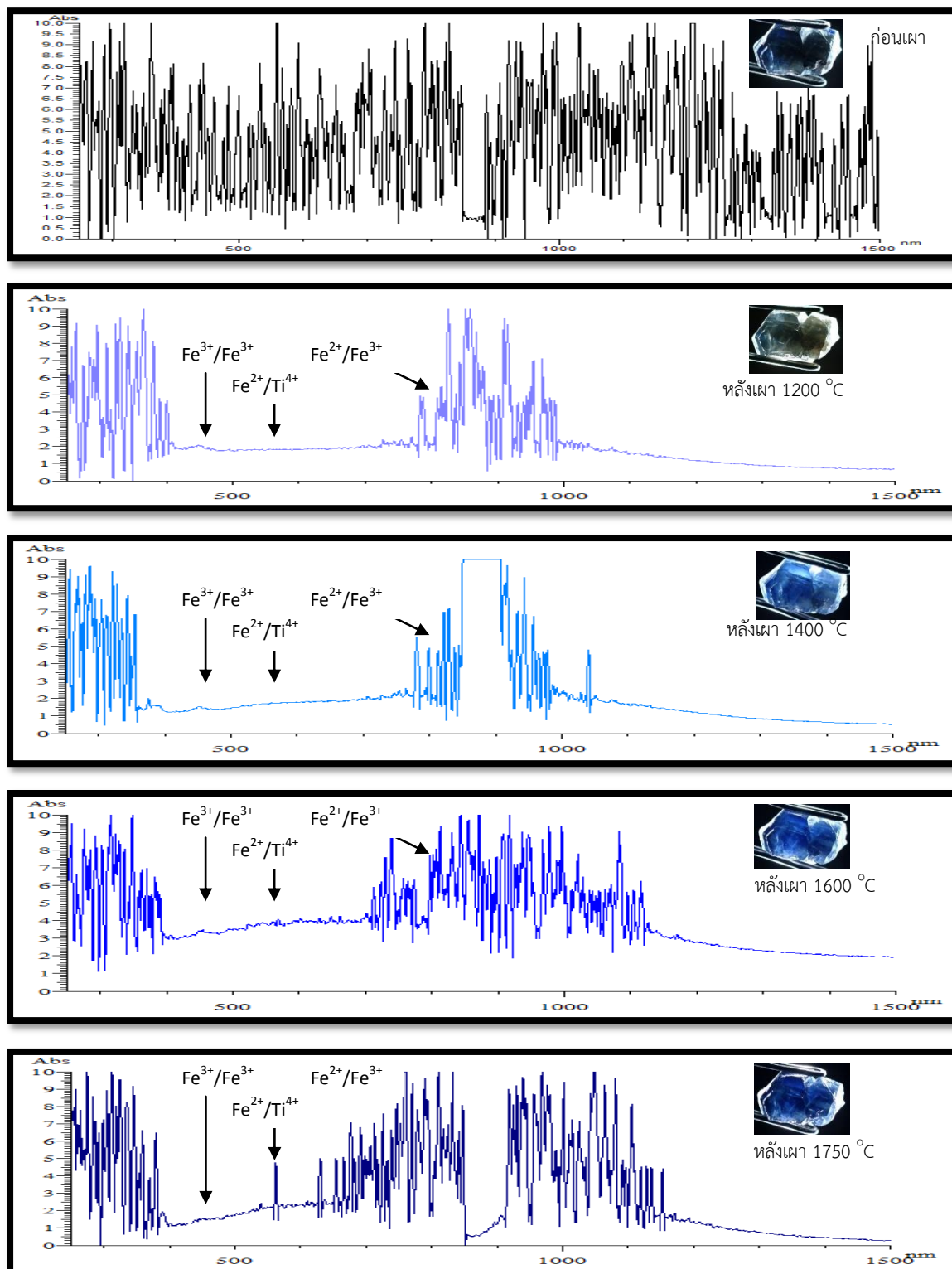
การเปรียบเทียบ Absorption spectrum ของตัวอย่างแซปไฟร์หลังการทดลองเผาชุดที่ 1

หลังการทดลองเผาในแต่ละครั้ง ทำการวัด absorption spectrum เพื่อเปรียบเทียบกับก่อนการเผา พบว่า absorption spectrum ในแนวขนานและตั้งฉากแกนแสง (C) มีความคล้ายคลึงกันมาก (รูปที่ 4-46 ถึง 4-47) และในแต่ละลักษณะ แสดง absorption spectrum ดังนี้

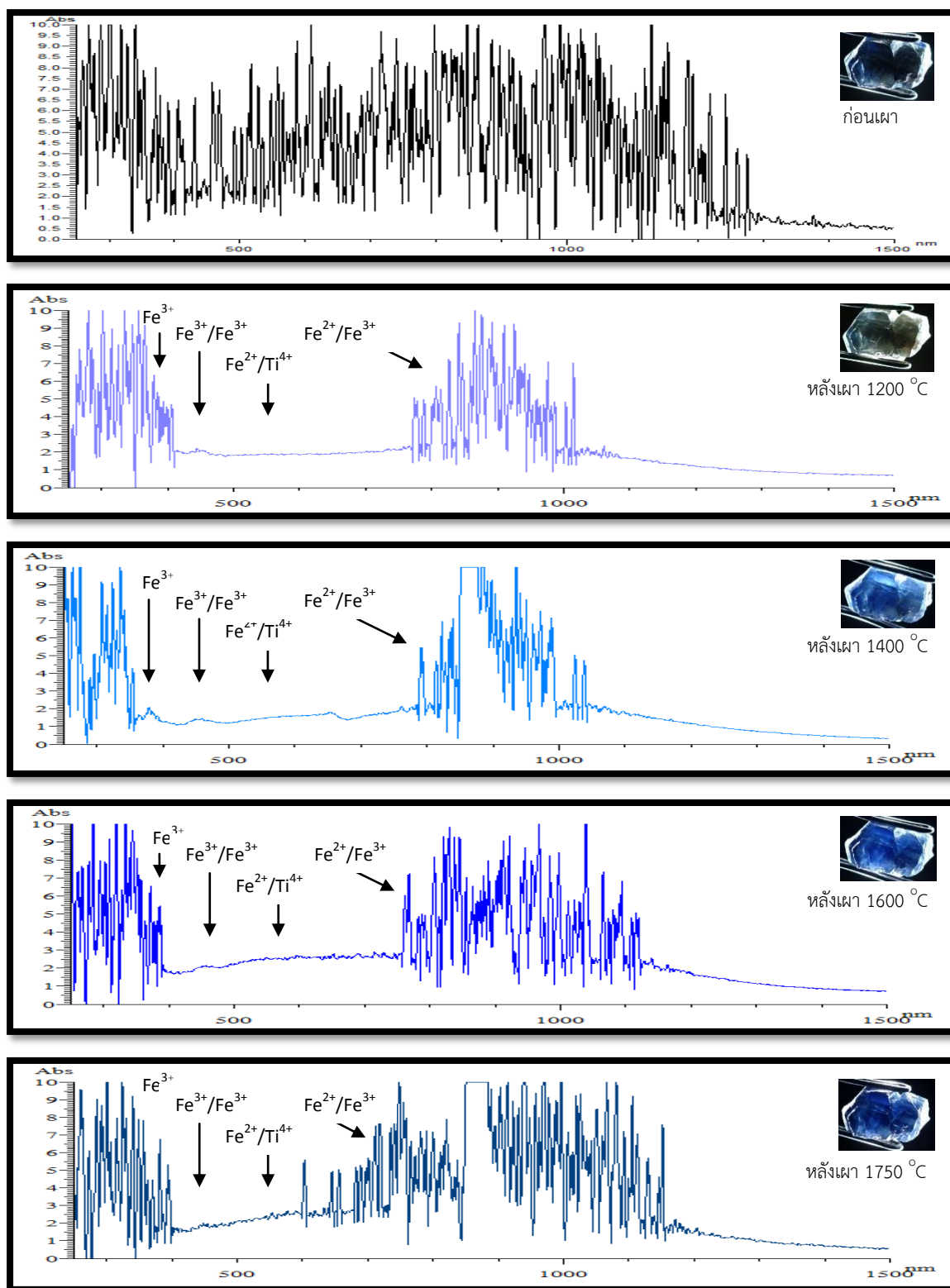
Absorption spectrum ของตัวอย่างลักษณะที่ 1 ก่อนการเผา blue sapphire จากแพร่และกาญจนบุรี ไม่สามารถอ่านตำแหน่ง absorption spectrum ได้ อาจเป็นเพราะตัวอย่างมีความหนาค่อนข้างมาก มีรอยแตก และมีสีเข้มมาก ภายหลังการเผาที่ 1200 °C ซึ่งตัวอย่างโปร่งใสขึ้น จึงแสดง absorption peak ชัดเจนขึ้น โดยพบ absorption peak เล็กๆ ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C พบ absorption peak ใหม่อีก 2 ตำแหน่ง คือ peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 380 นาโนเมตร และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C พบว่าช่วง peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงที่กว้างขึ้น และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C พบ peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่ง 565 นาโนเมตรชัดเจน และ peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงที่กว้างขึ้นมาก คล้ายกับ absorption spectrum ของตัวอย่างก่อนการเผา

ตัวอย่างจากทั้ง 2 แหล่ง มีการเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ในลักษณะเดียวกัน แต่ตัวอย่างจากแพร่เห็น peak ไม่ชัดเจนเนื่องจากมี peak รบกวน (noise) จำนวนมาก (รูปที่ 4-48 ถึง 4-49)

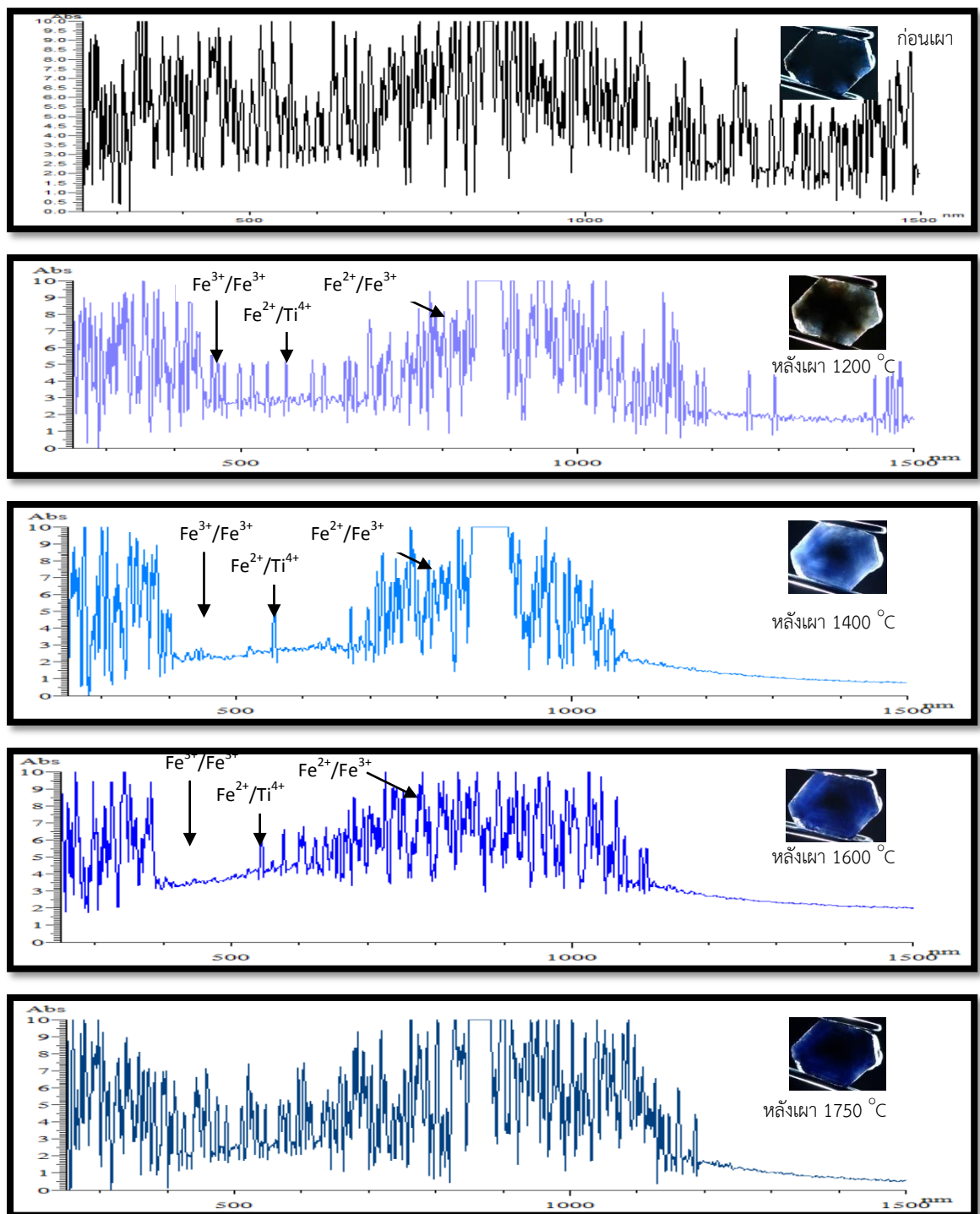
Absorption spectrum ของตัวอย่างลักษณะที่ 2 ก่อนการเผา blue sapphire แสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่ง 380 นาโนเมตร peak เล็กๆ ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร ส่วน absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร เห็นได้ชัดเจน ภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1200 °C เห็น absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ 380 นาโนเมตรชัดเจนกว่าก่อนเผา เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C absorption peak ของ Fe^{3+} ลดลง และ peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงแคบและลดลง เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ เพิ่มขึ้น และ peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงที่กว้างขึ้น เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C พบว่า absorption peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงกว้างขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 4-50 ถึง 4-51)



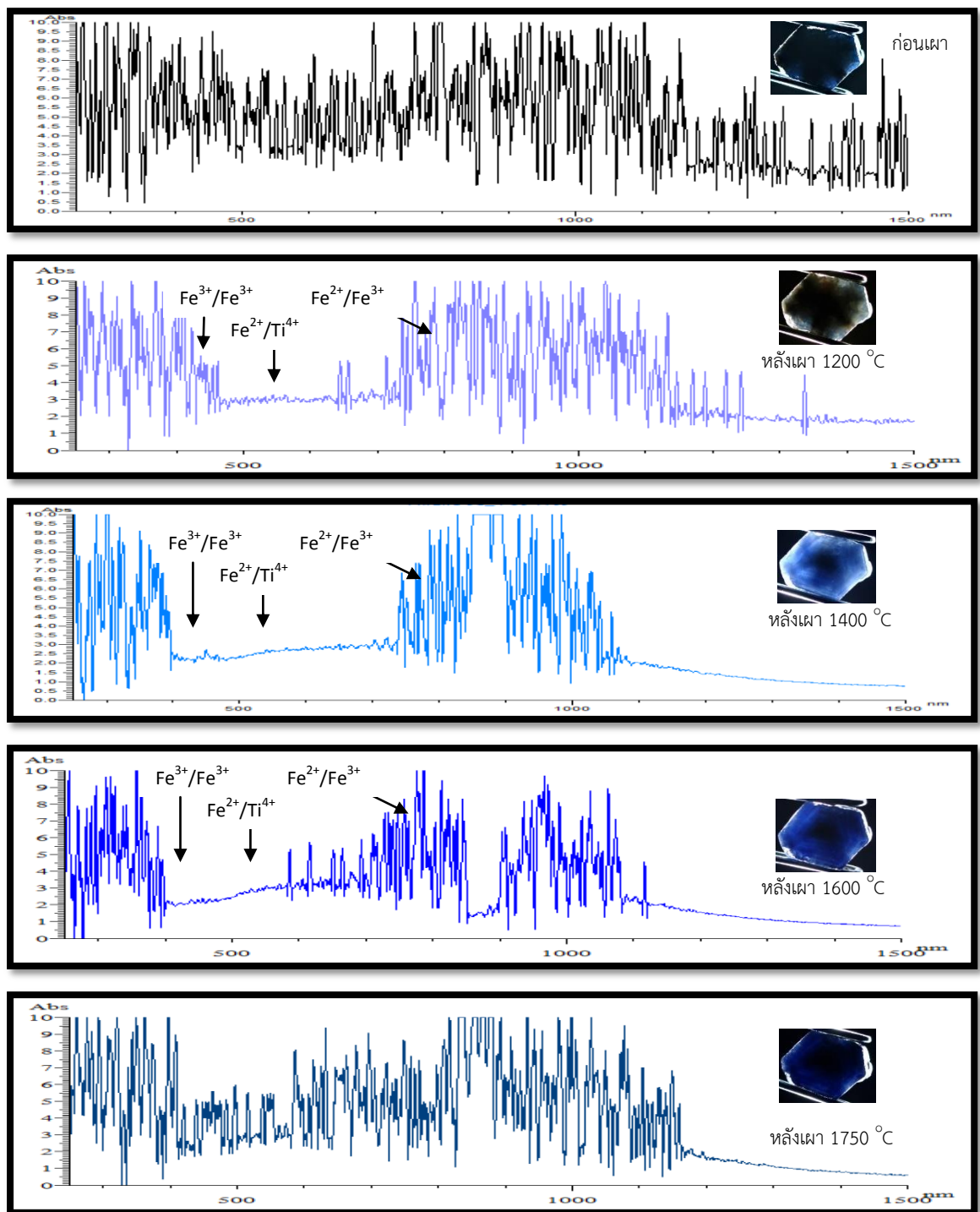
รูปที่ 4-46 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01_1 ในทิศทางขนานแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



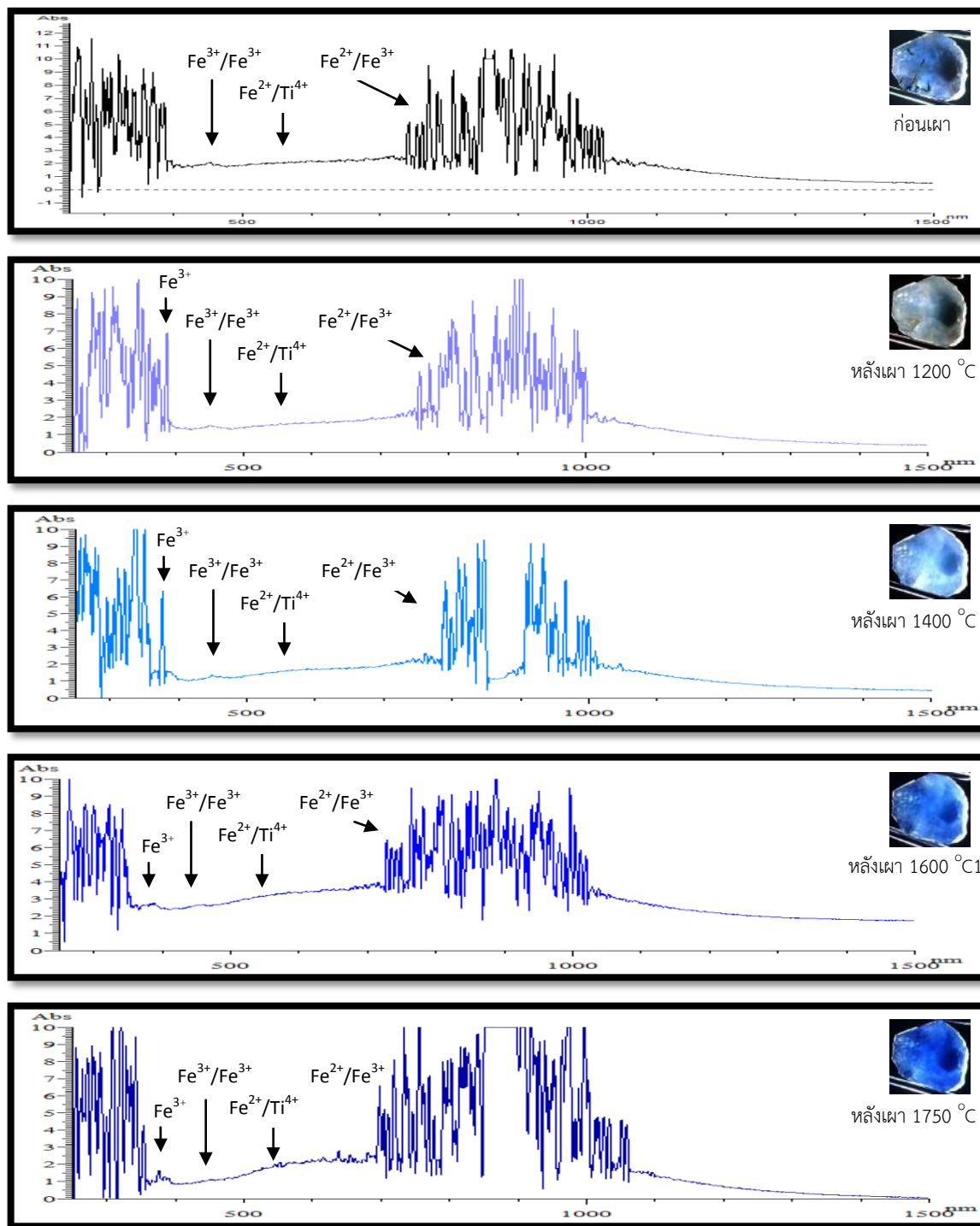
รูปที่ 4-47 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง KcOp 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



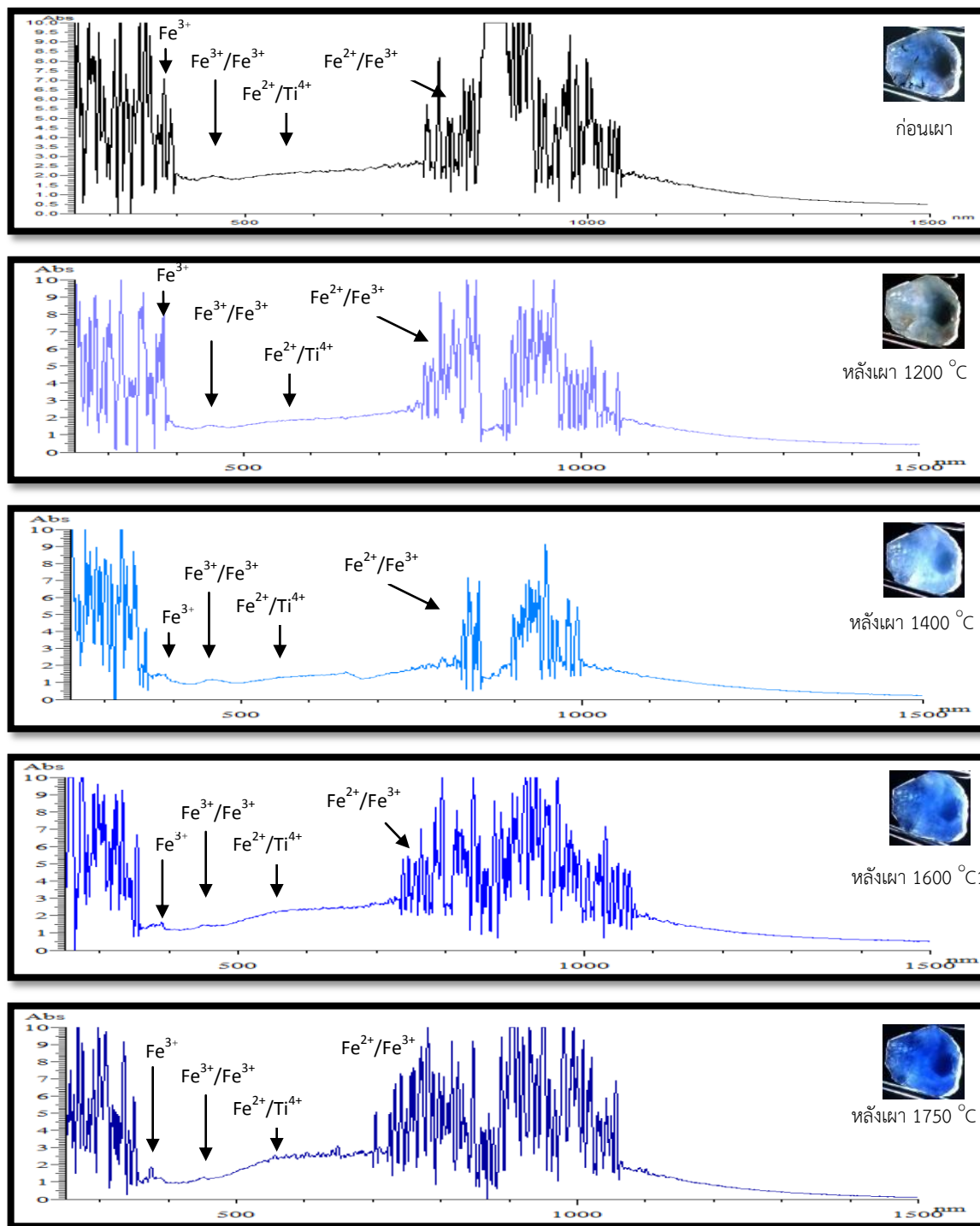
รูปที่ 4-48 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 08_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง
เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4-49 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 08_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4-50 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC12_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 4-51 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC12_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

(ข) การเผาชุดที่ 2

เป็นการเผาต่อเนื่องครั้งเดียวที่อุณหภูมิสูงสุด 1750 °C โดยยีนอุณหภูมิสูงสุด 5 ชั่วโมง โดยใช้ตัวอย่างในการศึกษาจากแหล่งแพร่ทั้งหมด รวม 12 ตัวอย่างแบ่งตัวอย่างออกเป็น 3 กลุ่มได้แก่

- **กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม** มีแกนกลางสีน้ำเงินเข้มมากจนเกือบดำ บางเม็ดแสดงลักษณะของ Trapiche รวมทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrDkC 15_1, PhrDkC 16_1, PhrDkC 17_1, PhrDkC 18_1, PhrDkC 19_1, PhrDkC 20_1 และ PhrDkC21_1 และ PhrDkC 22_1

- **กลุ่มหย่อมสีน้ำเงินมีสีน้ำเงินเป็นหย่อม** ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเม็ด รวม 3 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrPt 02_1, PhrPt 04_1 และ PhrPt 08_1

- **กลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น** มีแถบสีขาวหรือมีแกนกลางสีขาวขุ่น จำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrWtC 03_1

สภาวะที่ใช้ในการเผา

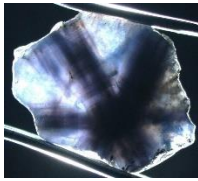
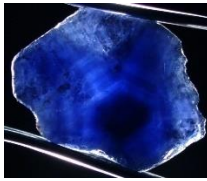
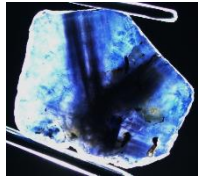
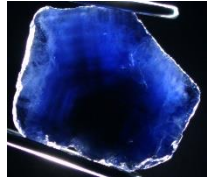
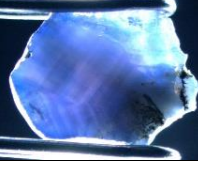
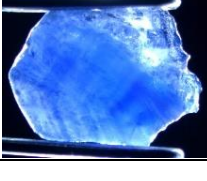
อุณหภูมิสูงสุด 1750 °C โดยใช้สภาวะในการเร่งอุณหภูมิและการเอาพลอยออก แบบเดียวกันกับการเผาชุดที่ 1

ผลการทดลองเผา

สามารถจำแนกการเปลี่ยนแปลงหลังเผาของตัวอย่าง เป็น 5 ลักษณะได้ดังนี้

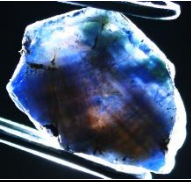
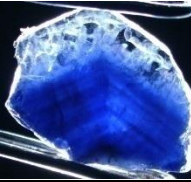
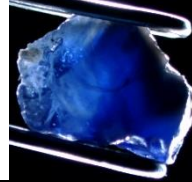
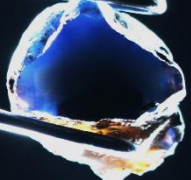
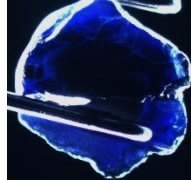
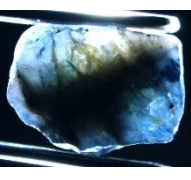
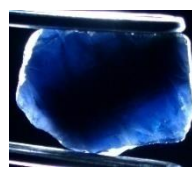
ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด ลักษณะแขนของ Trapiche จางลง หรือหายไป แต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่ ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 3 ตัวอย่างจาก 12 ตัวอย่าง คิดเป็น 25% ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkC 15_1, PhrDkC 16_1 และ PhrWtC 03_1 ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น แขนของ Trapiche ลดลง สีกระจายทั่วทั้งเม็ด

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 15_1		
PhrDkC 16_1		
PhrWtC 03_1		

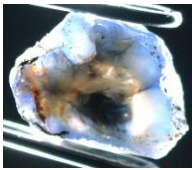
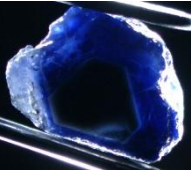
ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเด่นชัดและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 4 ตัวอย่างจาก 12 ตัวอย่าง คิดเป็น 33.33% ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkC 17_1, PhrDkC 20_1, PhrDkC 21_1 และ PhrPt 08_1 ดังตารางที่ 4-9

ตารางที่ 4-9 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเด่นชัดและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkC 17_1			PhrPt 21_1		
PhrDkC 20_1			PhrPt 08_1		

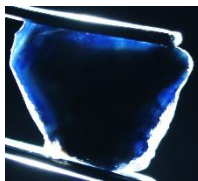
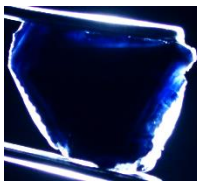
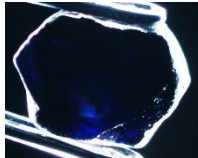
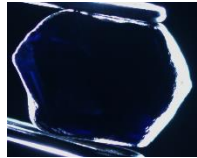
ลักษณะที่ 3 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นชัดเจน บริเวณแกนกลางสีเข้มมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีเทา ดำ มลทินสีเหลืองลดลง ทำให้ตัวอย่างมีความใสมากขึ้น ส่วน core สีเทานั้นเกิดจากการที่ Fe^{2+} เข้าจับกับ Al_2O_3 กลายเป็น $FeAl_2O_4$ (Hercynite) มีลักษณะเป็นมลทินสีเทาและเผาแก้ได้ยาก ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีเพียง 1 ตัวอย่างจาก 12 ตัวอย่าง คิดเป็น 8.33% ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkC 18_1 ดังตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นชัดเจน บริเวณแกนกลางสีเข้มมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 18_1		

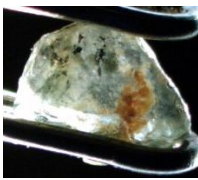
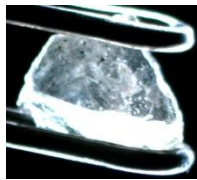
ลักษณะที่ 4 ตัวอย่างก่อนเผาแสดงแกนกลางสีน้ำเงินเข้มขนาดใหญ่ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังเผา ทั้งหมด 2 ตัวอย่างจาก 12 ตัวอย่าง คิดเป็น 16.66% ได้แก่ ตัวอย่าง PhrDkC 19_1 และ PhrDkC 22_1 ดังตารางที่ 4-11

ตารางที่ 4-11 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า ตัวอย่างชุดนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 19_1		
PhrDkC 22_1		

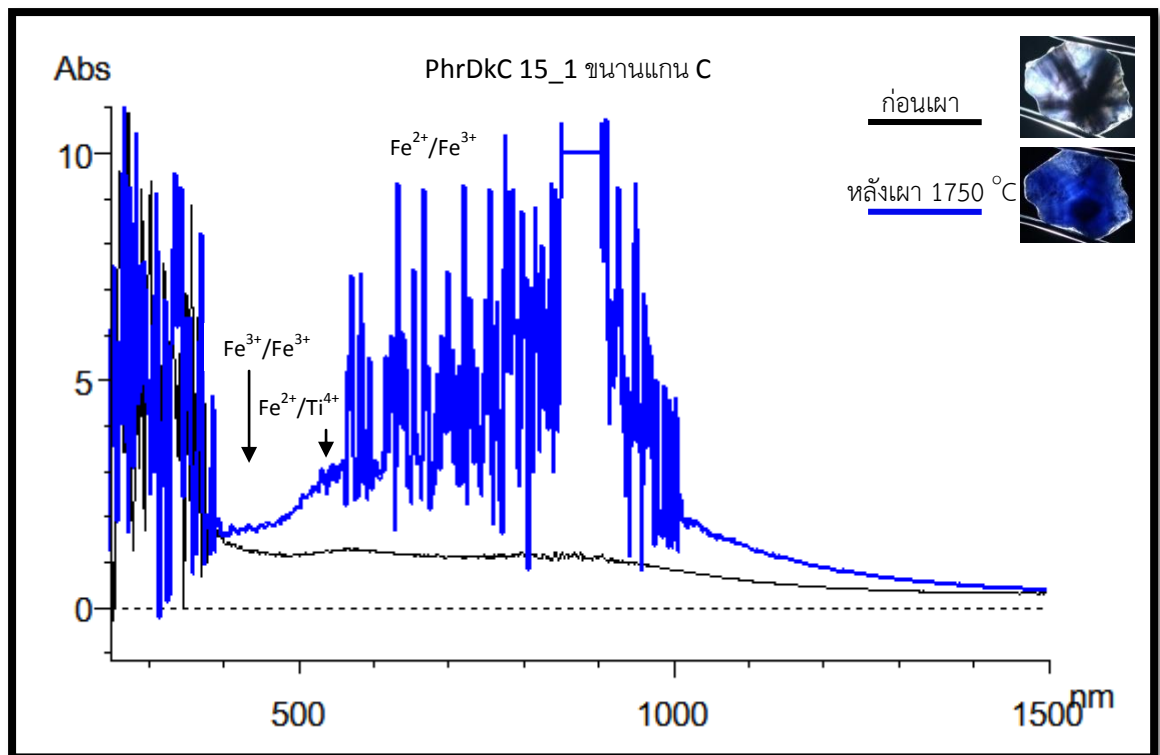
ลักษณะที่ 5 ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กัน กลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ทั้งหมด 2 ตัวอย่างจาก 12 ตัวอย่าง คิดเป็น 16.67% ได้แก่ตัวอย่าง PhrPt 02_1 และ PhrPt 04_1 ดังตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า สีเขียวและคราบในตัวอย่างชุดนี้หายไป เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น

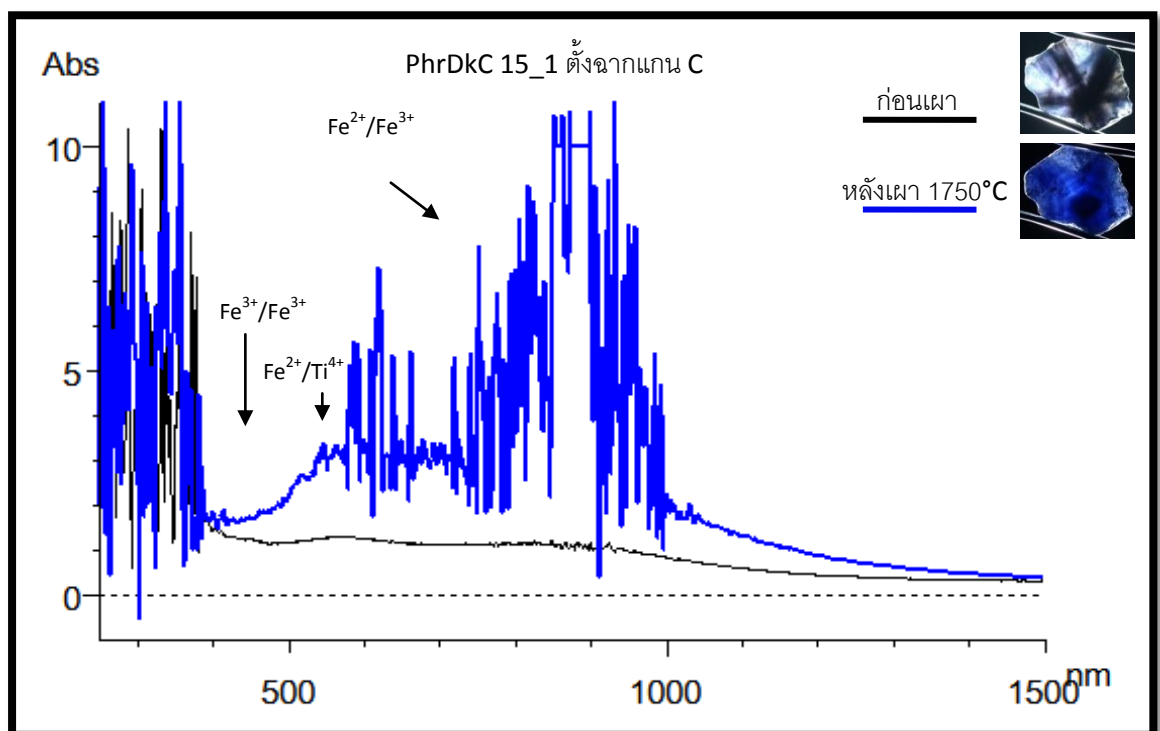
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrPt 02_1		
PhrPt 04_1		

การเปรียบเทียบ Absorption spectrum ของตัวอย่างแซปไฟร์หลังการทดลองเผาชุดที่ 2

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 1 ตัวอย่างก่อนเผา พบการดูดกลืนในช่วง 550 - 700 นาโนเมตรของ Fe^{2+}/Ti^{4+} และ ของ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผา พบว่า มี peak ใหม่เพิ่มขึ้นมาอีก 1 ตำแหน่ง คือ peak ของ Fe^{3+}/Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร ส่วน peak ของ Fe^{2+}/Ti^{4+} และของ Fe^{2+}/Fe^{3+} IVCT เพิ่มขึ้นชัดเจน ดังรูปที่ 4-52 และ 4-53

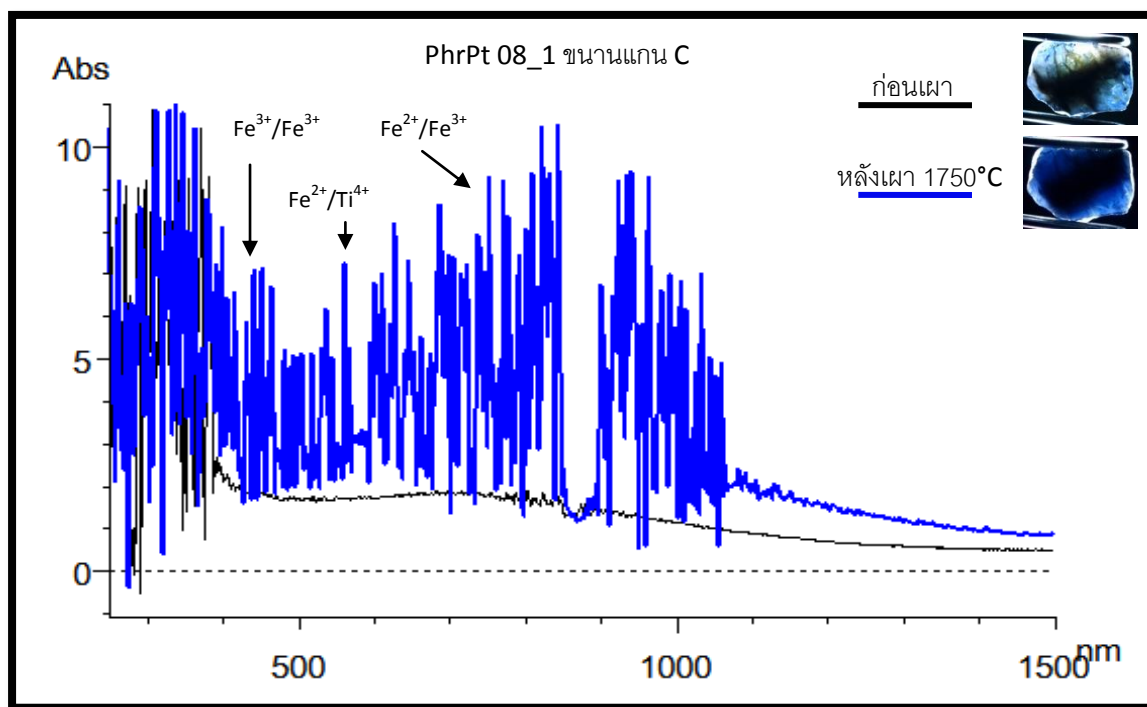


รูปที่ 4-52 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 15_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

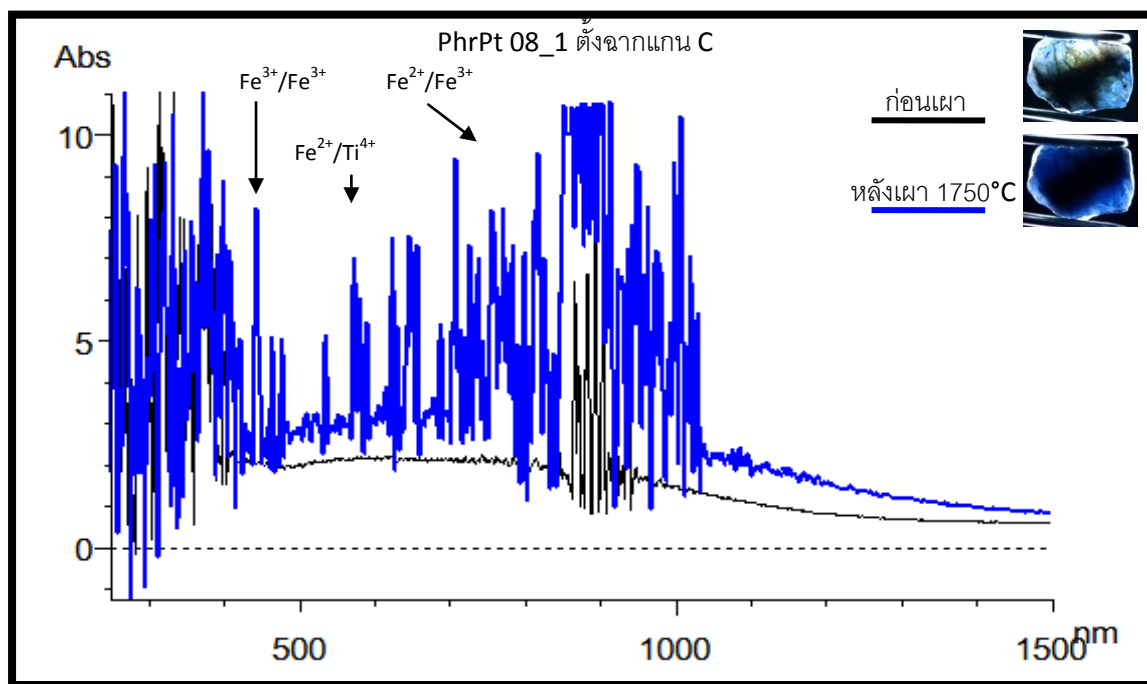


รูปที่ 4-53 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 15_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

Absorption spectrum ของการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่ 2 ก่อนเผาแสดง peak การดูดกลืนช่วงคลื่นแสงของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร และของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร หลังการเผาพบว่า absorption spectrum ไม่แสดง peak ชัดเจน ดังรูปที่ 4-54 และ 4-55

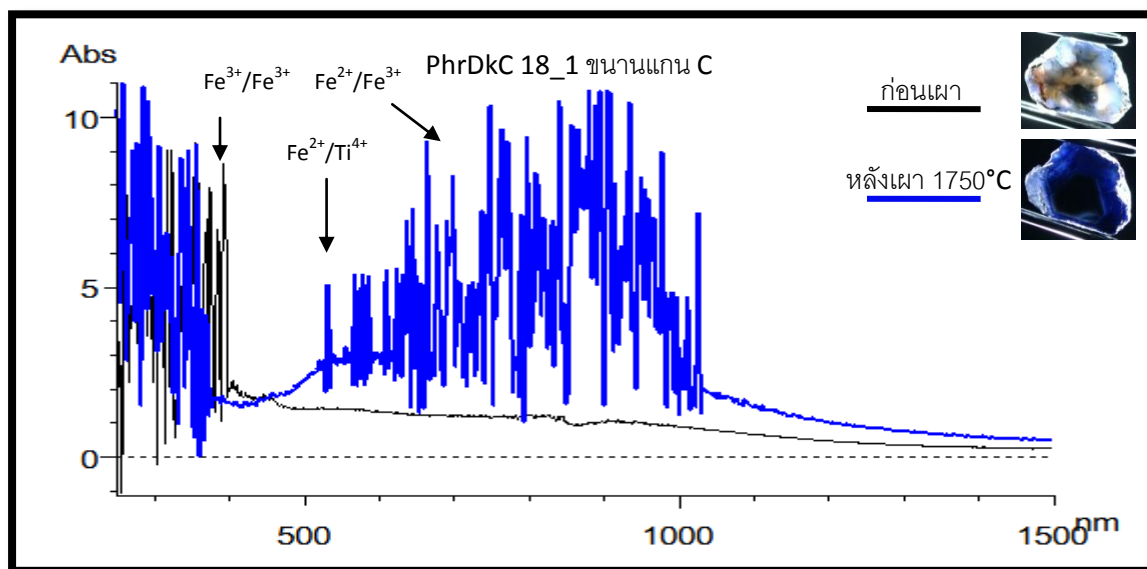


รูปที่ 4-54 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 08_1 ในทิศทางชานานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

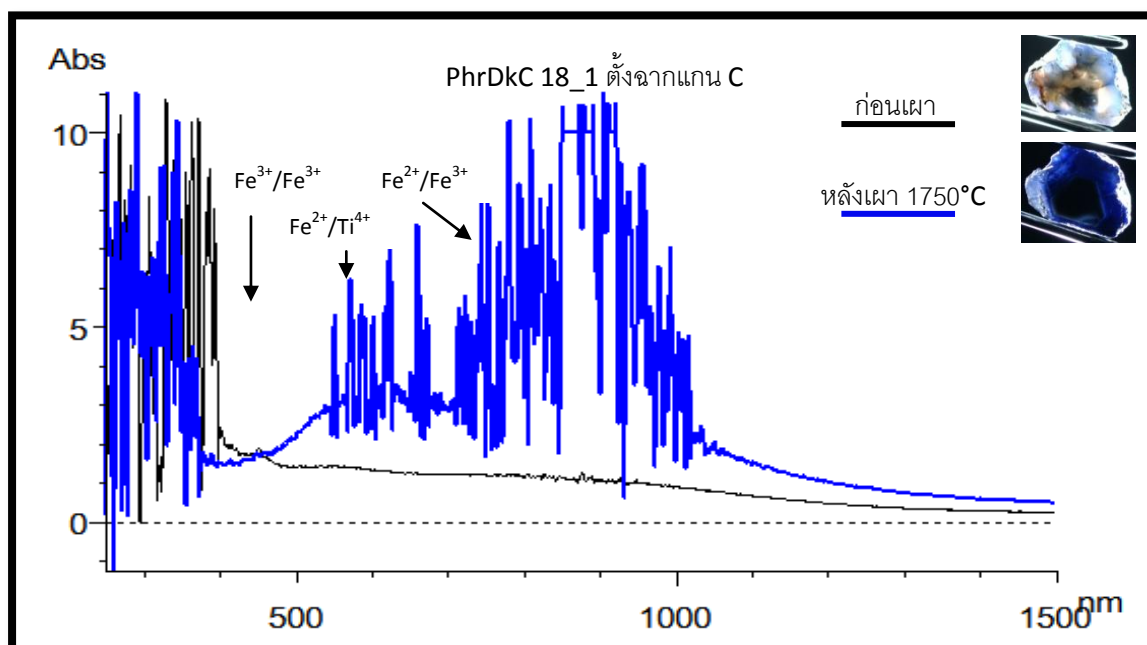


รูปที่ 4-55 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 08_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 3 ตัวอย่างก่อนเผาแสดง absorption spectrum ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 380 นาโนเมตร $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร หลังการเผาพบว่า peak ของ Fe^{3+} ลดลง ส่วน peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังรูปที่ 4-56 และ 4-57

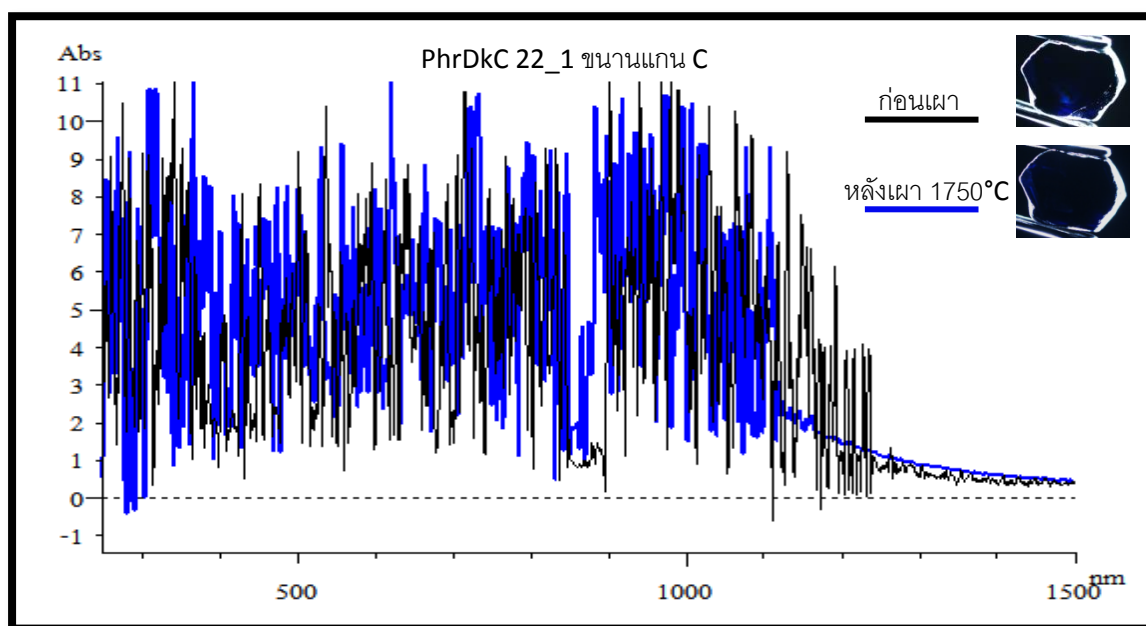


รูปที่ 4-56 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 18_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

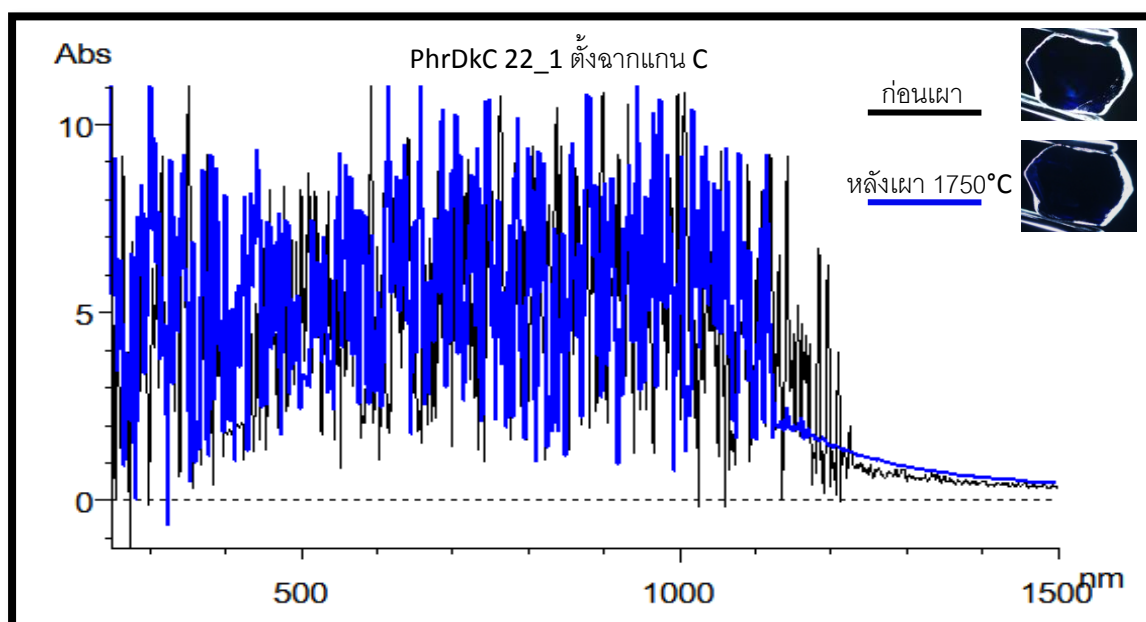


รูปที่ 4-57 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 18_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 4 ทั้งก่อนและหลังเผาไม่แสดง absorption peak ชัดเจน ดังรูปที่ 4-58 และ 4-59

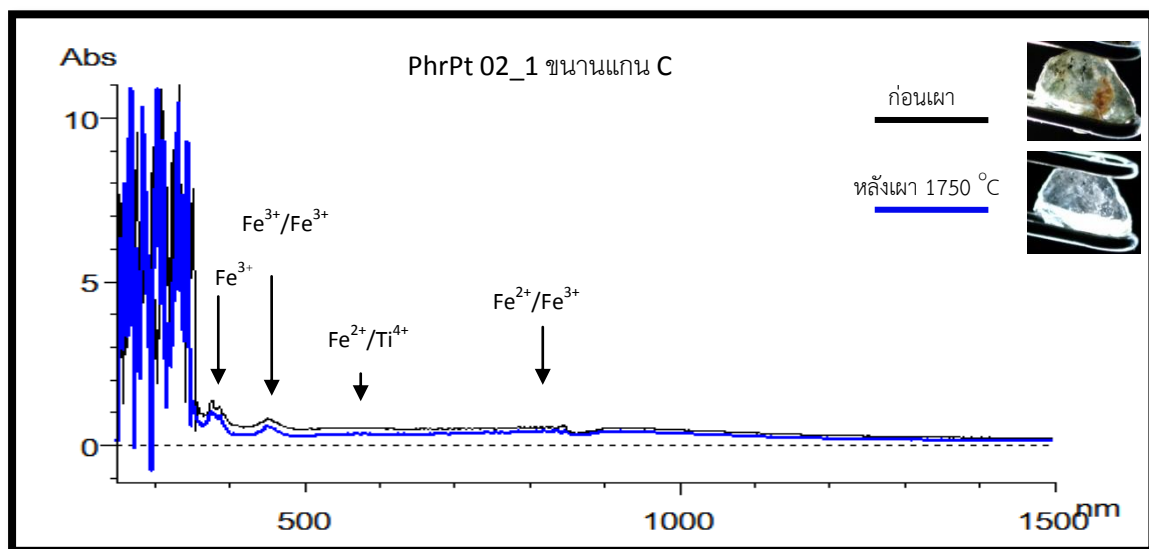


รูปที่ 4-58 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 22_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

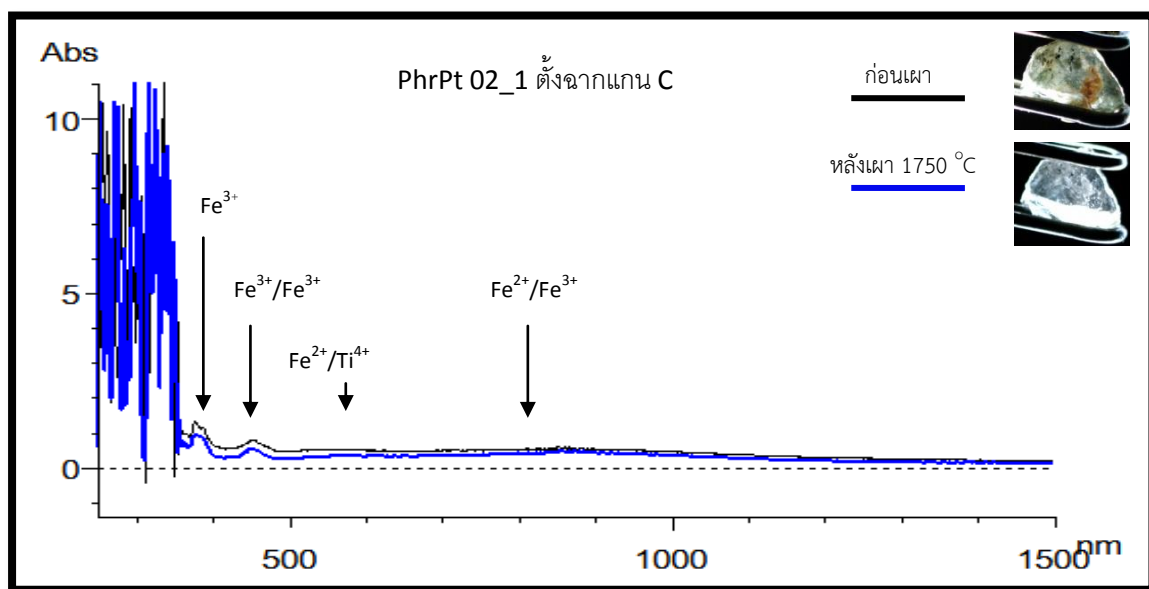


รูปที่ 4-59 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 22_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 5 ตัวอย่างก่อนเผาแสดง absorption peak ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 388 นาโนเมตร $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่าการดูดกลืนที่ตำแหน่ง Fe^{3+} ที่ 388 นาโนเมตร และ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่ง 450 นาโนเมตร ลดลงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4-60 และ 4-61



รูปที่ 4-60 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 02_1 ในทิศทางชานานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า



รูปที่ 4-61 Absorption spectrum ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 02_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

4.3.2 การทดลองเผาด้วยเตาแก๊ส อุณหภูมิ 1900 °C

มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาตัวอย่าง blue sapphire สีเข้ม-มืด และ/หรือ ขุ่นมัวให้มีสีอ่อนลงและ/หรือใสขึ้น โดยใช้แก๊สภายใต้สภาวะ oxidize เพื่อเปรียบเทียบกับผลการเผาด้วยเตาไฟฟ้า

ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเผา

แบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็น 4 กลุ่ม รวมทั้งสิ้น 11 ตัวอย่าง ได้แก่

- กลุ่มสีน้ำเงินเข้ม มีสีน้ำเงินเข้มมากกระจายทั่วทั้งเม็ด เป็นตัวอย่างจากแหล่งแพร่ จำนวน 1 ตัวอย่าง คือ PhrDkB 01_1

- กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม มีแกนกลางสีน้ำเงินเข้มจนเกือบดำ บางเม็ดแสดงลักษณะของ Trapiche เป็นตัวอย่างจากแหล่งแพร่ทั้งหมด จำนวน 7 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrDkC 01_1, PhrDkC 02_1, PhrDkC 03_1, PhrDkC 04_1, PhrDkC 05_1, PhrDkC 06_1 และ PhrDkC 07_1

- กลุ่มหยาบสีน้ำเงิน มีสีน้ำเงินเป็นหยาบ ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเม็ด จำนวน 1 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrPt 07_1

- กลุ่มทึบแสง ตัวอย่างในกลุ่มนี้มีสีเข้มมากและทึบแสง จำนวน 2 ตัวอย่าง คือ PhrOp 01_1 และ KcOp 02_1

สภาวะที่ใช้ในการเผา

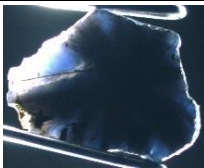
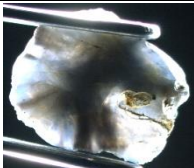
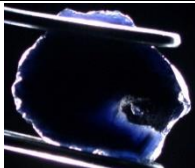
อุณหภูมิสูงสุด 1900 °C โดยยืนอุณหภูมิในช่วง 1800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในสภาวะออกซิไดส์ และทำการเผา ยก คือนำพลอยออกจากเตาทันทีเมื่อยืนอุณหภูมิสูงสุดครบ 3 ชั่วโมง

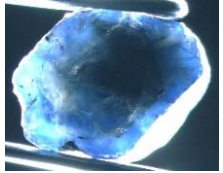
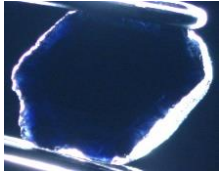
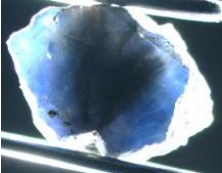
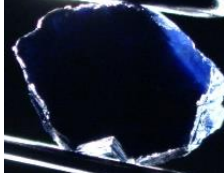
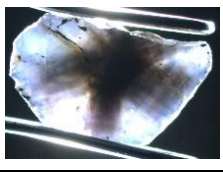
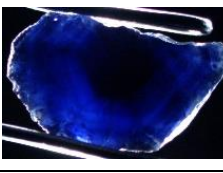
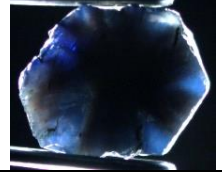
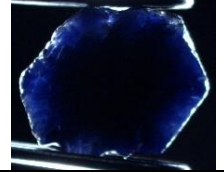
ผลการทดลองเผา

การเปลี่ยนแปลงหลังเผาสามารถจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด ลักษณะแกนของ Trapiche จางลงหรือหายไป แต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่ ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 6 ตัวอย่างจาก 11 ตัวอย่าง คิดเป็น 54.54% ได้แก่ ตัวอย่าง PhrDkC 01_1, PhrDkC 02_1, PhrDkC 03_1, PhrDkC 05_1, PhrDkC 07_1 และ KcOp 02_1 ดังตารางที่ 4-13

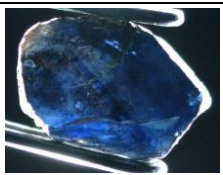
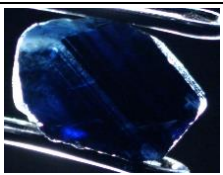
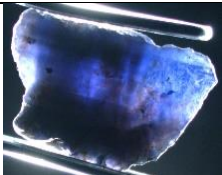
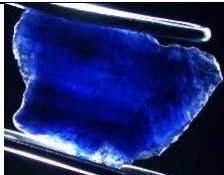
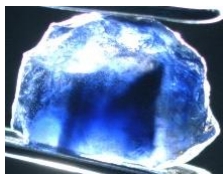
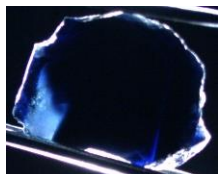
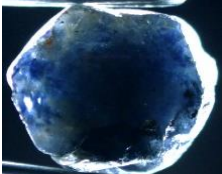
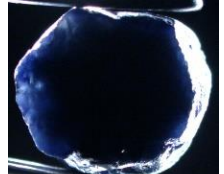
ตารางที่ 4-13 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น และกระจายทั่วทั้งเม็ด แกนของ Trapiche จางลงหรือหายไปแต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkC 01_1			PhrDkC 05_1		

PhrDkC 02_1			PhrDkC 07_1		
PhrDkC 03_1			KcOp 02_1		

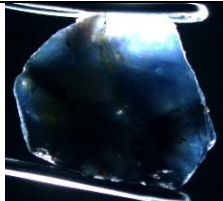
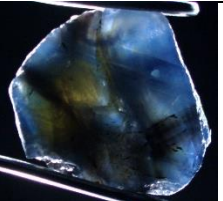
ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้ มีจำนวน 4 ตัวอย่างจาก 11 ตัวอย่าง คิดเป็น 36.36% ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkB 01_1, PhrDkC 04_1, PhrDkC 06_1 และ PhrOp 01_1 ดังตารางที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkB 01_1			PhrDkC 06_1		
PhrDkC 04_1			PhrOp 01_1		

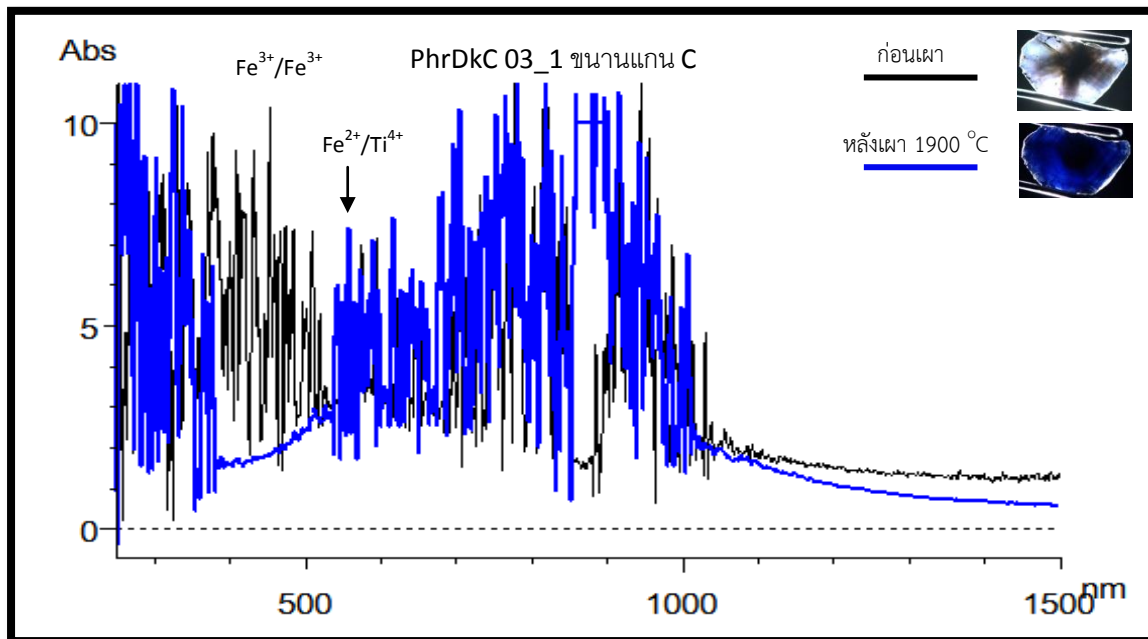
ลักษณะที่ 3 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สีกระจายมากขึ้นและเห็นสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีจำนวน 1 ตัวอย่างจาก 11 ตัวอย่าง คิดเป็น 9% คือตัวอย่าง PhrPt 07_1 ดังตารางที่ 4-15

ตารางที่ 4-15 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น สีกระจายมากขึ้นและเห็นมลทินสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น

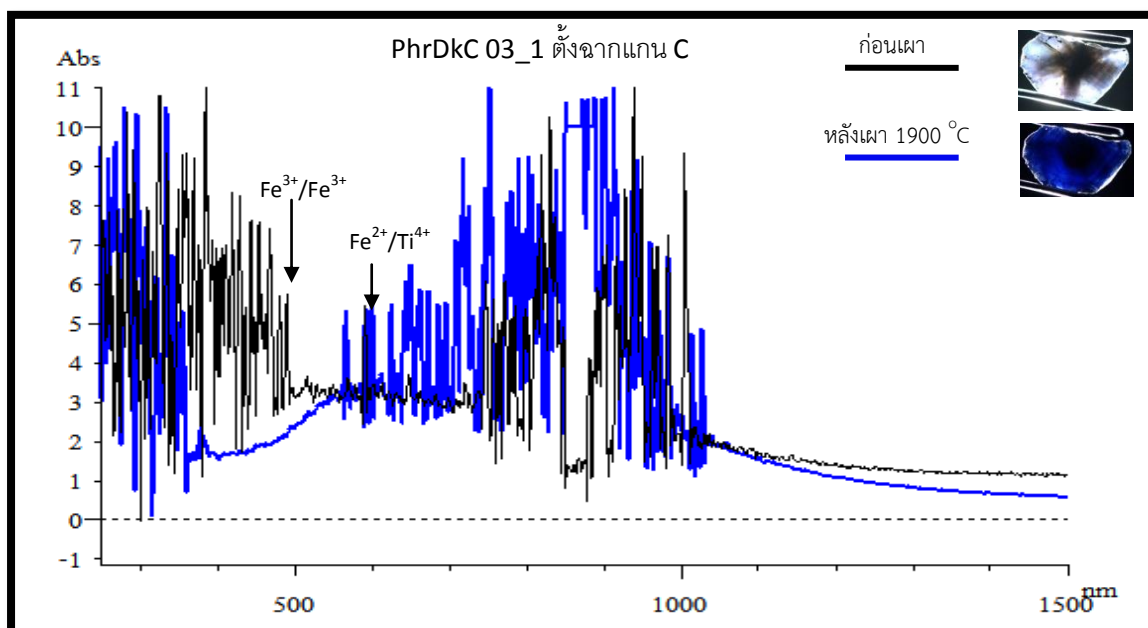
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrPt 07_1		

การเปรียบเทียบ Absorption spectrum ของตัวอย่างแชปไฟร์หลังการทดลองเผาชุดที่ 1

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 1 ตัวอย่างก่อนเผา พบการดูดกลืนในช่วงของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 550 - 700 นาโนเมตร และ ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่าการดูดกลืนแสงของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร ลดลง แต่ในส่วนการดูดกลืนแสงช่วงของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตร และของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-62 และ 4-63

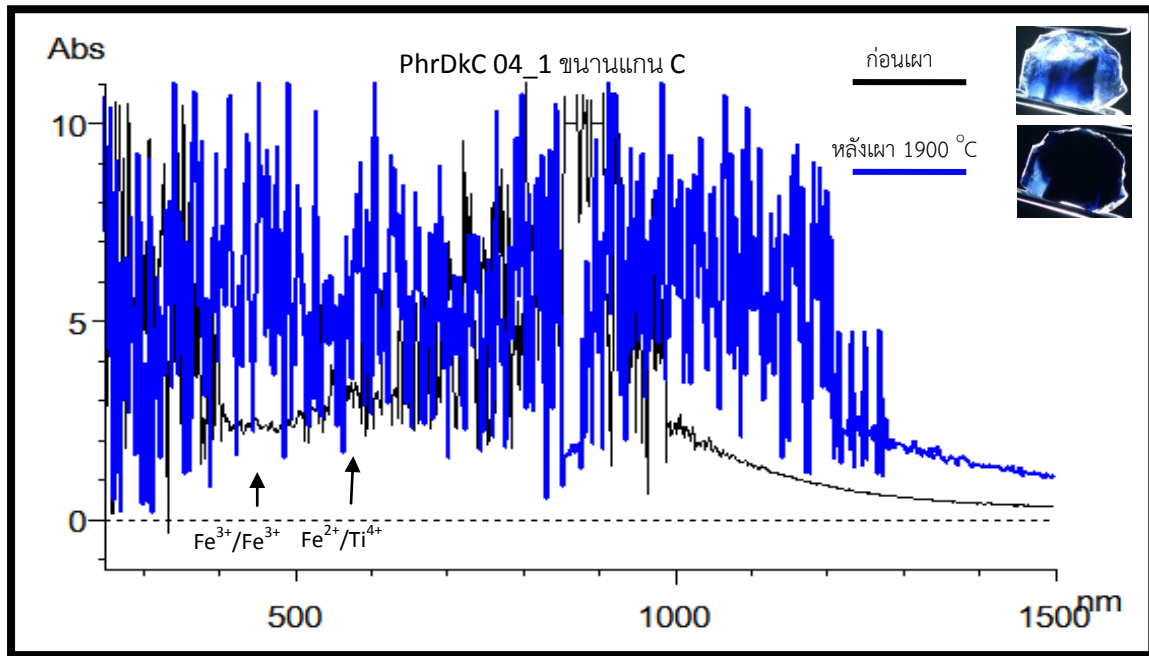


รูปที่ 4-62 Absorption spectra ของแชปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 03_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

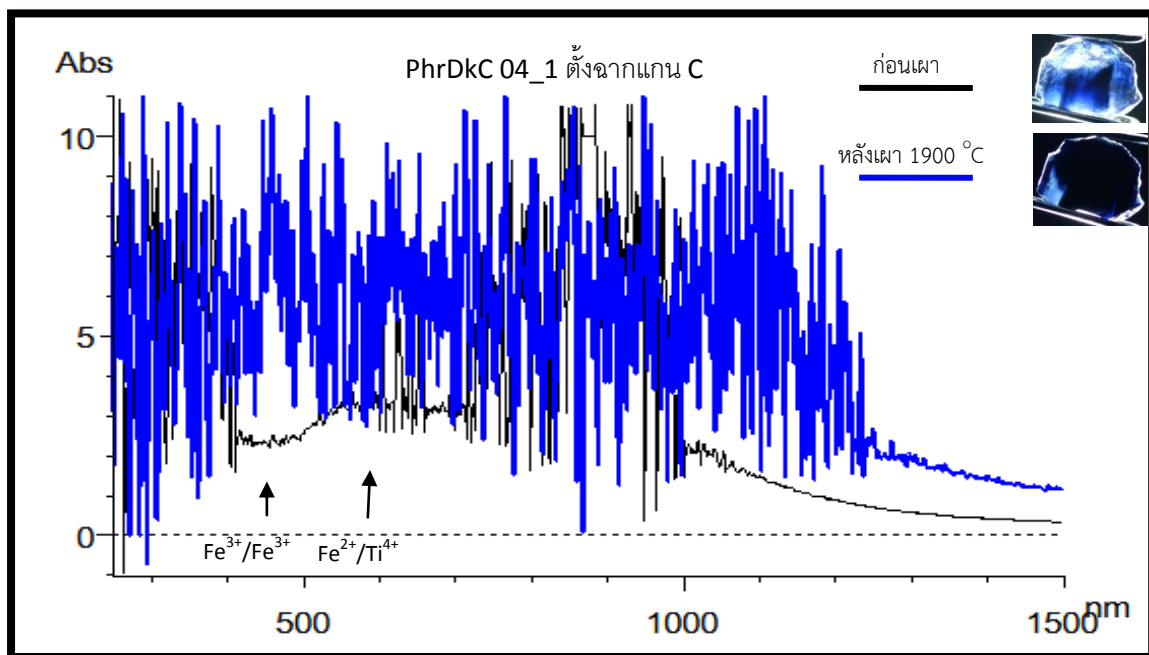


รูปที่ 4-63 Absorption spectra ของแชปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 03_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 2 ตัวอย่างก่อนเผา พบการดูดกลืนในช่วงของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 550 - 700 นาโนเมตร และ ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่าตัวอย่างไม่แสดงตำแหน่ง absorption spectrum ชัดเจน ดังรูปที่ 4-64 และ 4-65

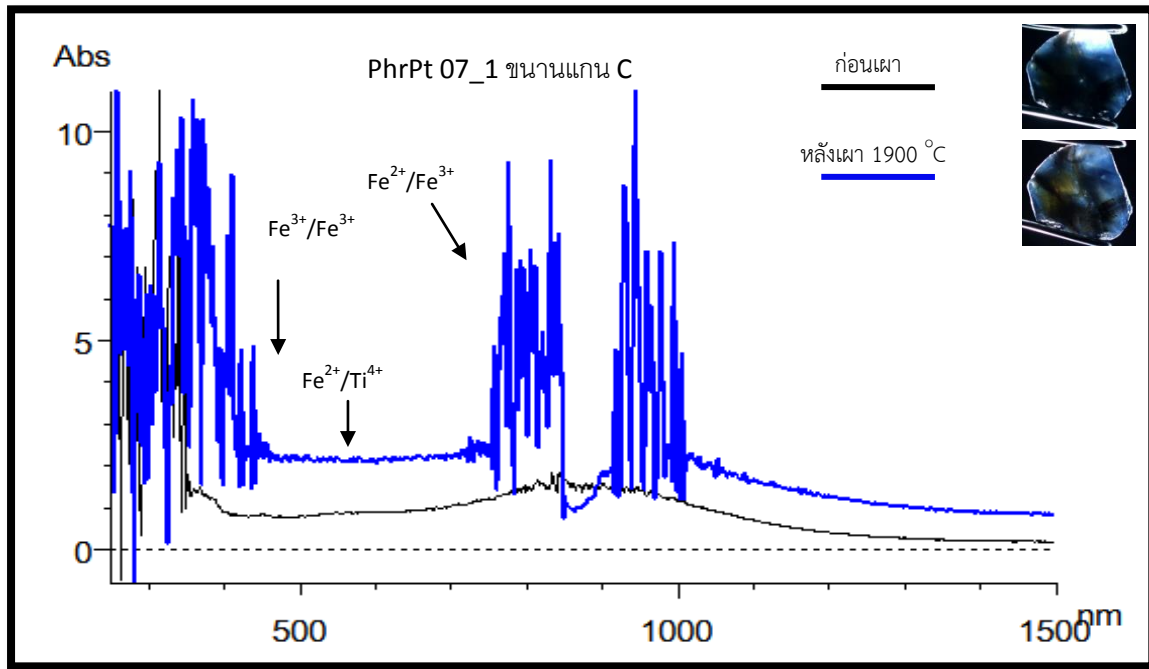


รูปที่ 4-64 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 04_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

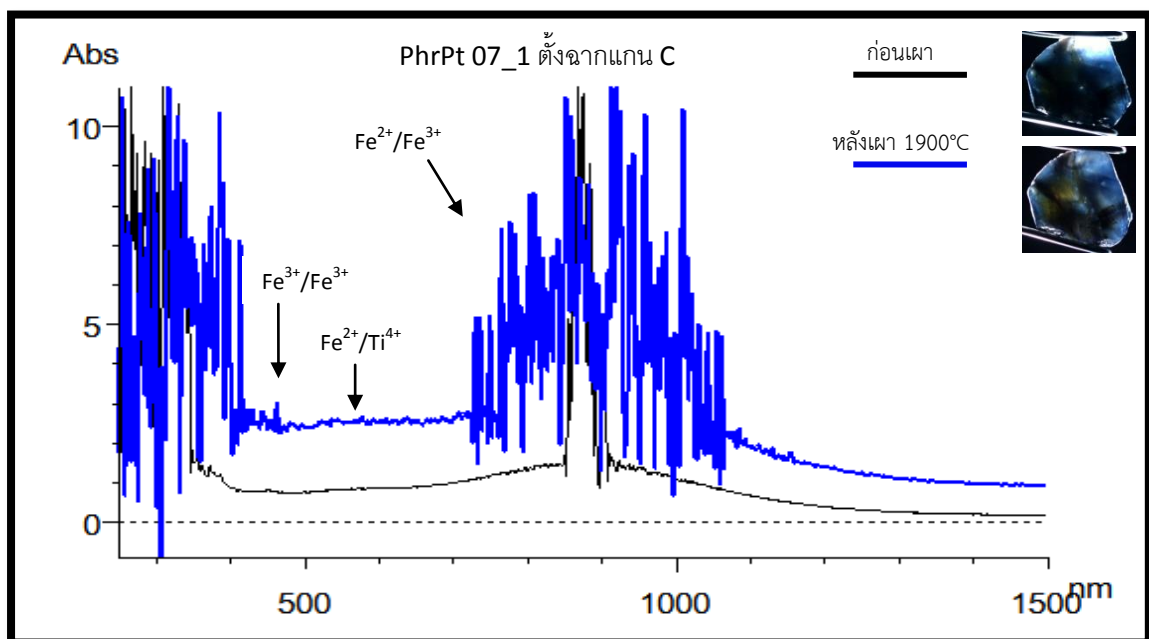


รูปที่ 4-65 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrDkC 04_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ของลักษณะที่ 3 ตัวอย่างก่อนเผา พบการดูดกลืนในช่วงของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 550 - 700 นาโนเมตร และ ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่า absorption spectrum ใหม่อีก 2 ตำแหน่งคือ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตรและ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 550 - 700 นาโนเมตร ส่วน $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT มีช่วงกว้างขึ้น ดังรูปที่ 4-66 และ 4-67



รูปที่ 4-66 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 07_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส



รูปที่ 4-67 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 07_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

4.3.3 การทดลองเผาด้วยเตาน้ำมัน

มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาตัวอย่าง blue sapphire สีอ่อนให้เข้มขึ้น และ/หรือให้สีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด โดยใช้เตาน้ำมันดีเซลเผาภายใต้สภาวะ reducing (ไม่เติมออกซิเจนเข้าไปในเตา)

ตัวอย่างที่ใช้ทดลองเผา

แบ่งกลุ่มตัวอย่างเป็น 6 กลุ่ม รวมทั้งสิ้น 90 ตัวอย่าง ได้แก่

- **กลุ่มสีน้ำเงิน** มีสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด แต่สียังไม่เข้มพอ จำนวน 14 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrDkB 03_1, TpDkB01_1, TpDkB 02_1, TpDkB 03_1, TpDkB 04_1, TpDkB 05_1, TpDkB 06_1, TpDkB 07_1, TpDkB 08_1, TpDkB 09_1, TpDkB 10_1, TpDkB 11_1, BkDkB 01_1 และ BkDkB 02_1
- **กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม** มีแกนกลางสีน้ำเงินเข้มจนเกือบดำจำนวน 3 ตัวอย่าง ได้แก่ TpDkC 01_1, TpDkC 02_1 และ TpDkC 03_1
- **กลุ่มหย่อมสีน้ำเงิน** มีสีน้ำเงินเป็นหย่อม ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งเม็ด จำนวน 23 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrPt 01_1, PhrPt 03_1, PhrPt 05_1, PhrPt 06_1, TpPt 01_1, TpPt 02_1, TpPt 03_1, TpPt 04_1, TpPt05_1, TpPt 06_1, TpPt 07_1, BkPt 01_1, BkPt 02_1, BkPt 03_1, BkPt 04_1, KcPt 01_1, KcPt 02_1, KcPt 03_1, KcPt 04_1, KcPt 05_1, KcPt 06_1, KcPt 07_1 และ KcPt 08_1
- **กลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงินเด่นชัด** มีแถบสีน้ำเงินเห็นเด่นชัด จำนวน 36 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrZn 01_1, PhrZn 02_1, TpZn 01_1, TpZn 02_1, TpZn 03_1, TpZn 04_1, TpZn 05_1, TpZn 06_1, BkZn 01_1, BkZn 02_1, BkZn 03_1, BkZn 04_1, BkZn 05_1, BkZn 06_1, BkZn 07_1, BkZn 08_1, BkZn 09_1, BkZn 10_1, BkZn 11_1, BkZn 12_1, BkZn 13_1, BkZn 14_1, BkZn 15_1, BkZn 16_1, BkZn 17_1, BkZn 18_1, BkZn 19_1, BkZn 20_1, BkZn 21_1, BkZn 22_1, BkZn 23_1, BkZn 24_1, BkZn 25_1, BkZn 26_1, BkZn 27_1 และ BkZn 28_1,
- **กลุ่มแสดงแถบสีน้ำเงินไม่เด่นชัด** มีแถบสีน้ำเงินแต่ไม่เด่นชัด จำนวน 12 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrSlZn01_1, TpSlZn 01_1, TpSlZn 02_1, TpSlZn 03_1, BkSlZn 01_1, BkSlZn 02_1, BkSlZn 03_1, BkSlZn 04_1, BkSlZn 05_1, BkSlZn 06_1, BkSlZn 07_1 และ BkSlZn 08_1
- **กลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น** มีแกนกลางสีขาวขุ่น จำนวน 2 ตัวอย่าง ได้แก่ PhrWtC 01_1 และ PhrWtC 02_1

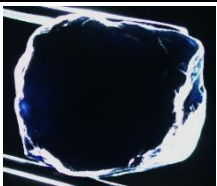
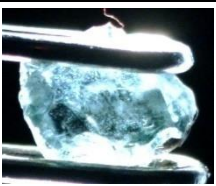
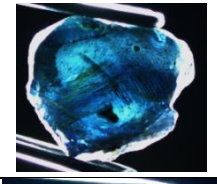
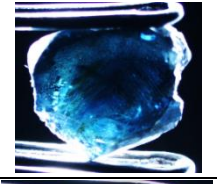
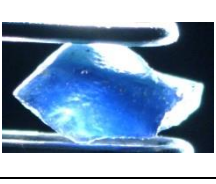
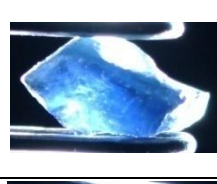
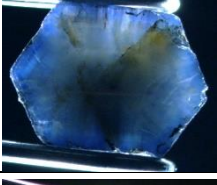
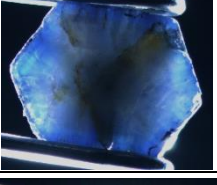
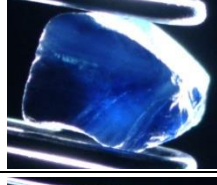
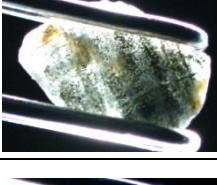
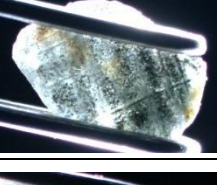
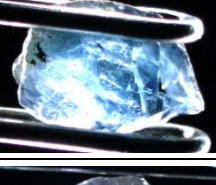
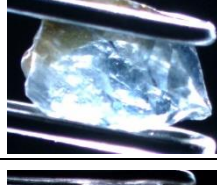
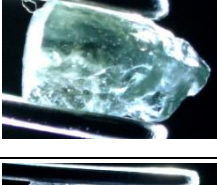
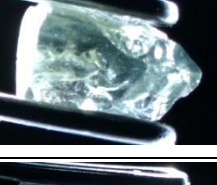
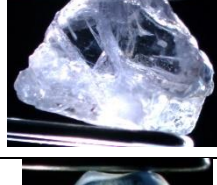
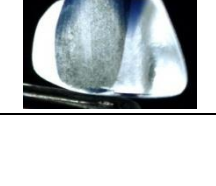
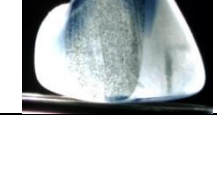
สภาวะที่ใช้ในการเผา

อุณหภูมิสูงสุด 1600 °C สภาวะ reducing (ไม่เติมออกซิเจนเข้าไปในเตาเผา) เเผาแบบอบ คือดับเตาทันทีเมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุด ทั้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมงให้เย็นตัวลงแล้วจึงนำตัวอย่างออกจากเตา

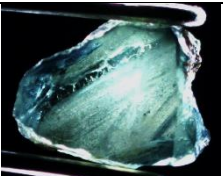
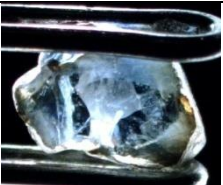
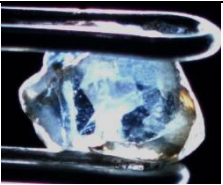
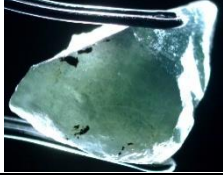
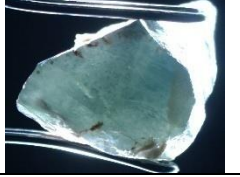
ผลการทดลองเผา

ลักษณะที่ 1 ไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีจำนวน 20 ตัวอย่างจาก 90 ตัวอย่าง คิดเป็น 22.22% ได้แก่ตัวอย่าง PhrDkB 03_1, PhrZn 02_1, PhrWtC 02_1, PhrPt 01_1, PhrPt 03_1, PhrPt 05_1, PhrPt 06_1, TpDkB 01_1, TpDkB 10_1, TpDkB 11_1, TpPt 01_1, TpPt 03_1, TpPt 04_1, TpPt 07_1, TpSlZn 03_1, BkZn 01_1, BkSlZn 08_1, KcPt 06_1, KcPt 08_1 และ KcPt 04_1 ดังตารางที่ 4-16 และ 4-17

ตารางที่ 4-16 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

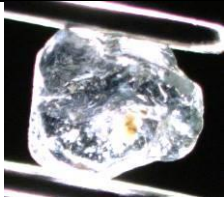
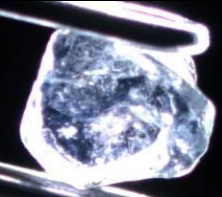
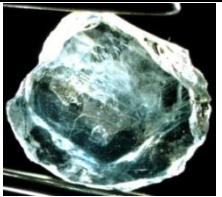
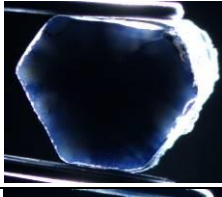
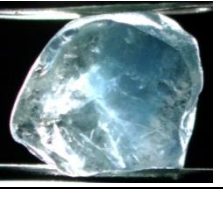
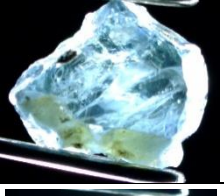
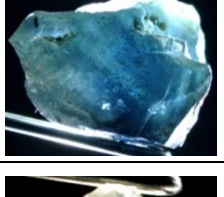
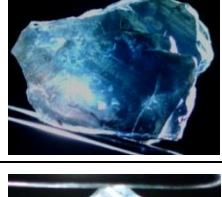
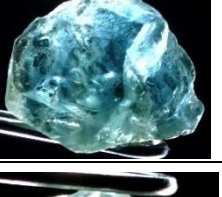
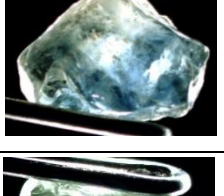
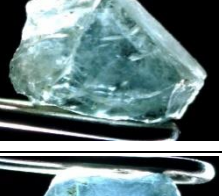
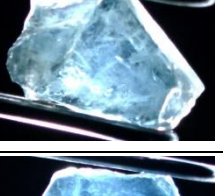
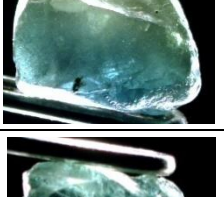
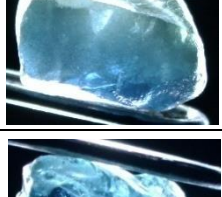
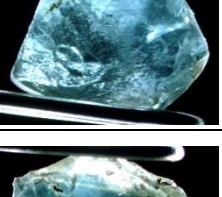
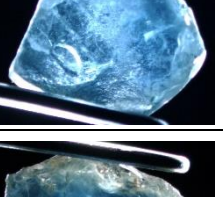
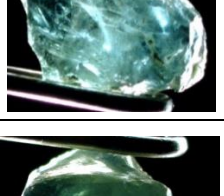
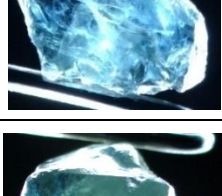
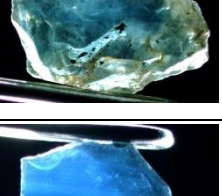
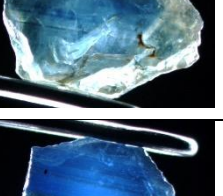
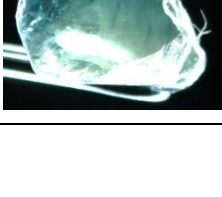
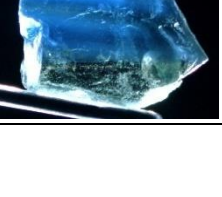
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
PhrDkB 03_1			PhrPt 06_1		
PhrZn 02_1			TpDkB 01_1		
PhrWtC 02_1			TpDkB 10_1		
PhrPt 01_1			TpDkB 11_1		
PhrPt 03_1			TpPt 01_1		
PhrPt 05_1			TpPt 03_1		

ตารางที่ 4-17 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างชุดนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

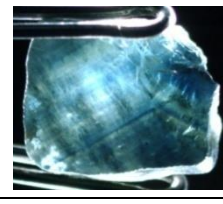
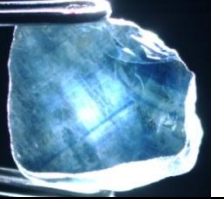
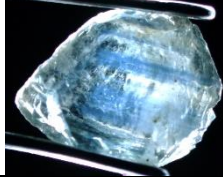
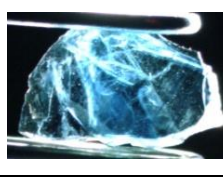
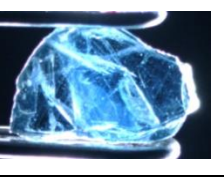
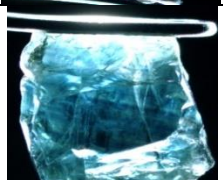
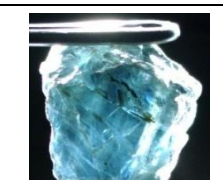
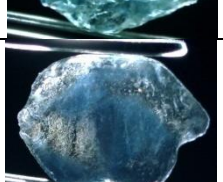
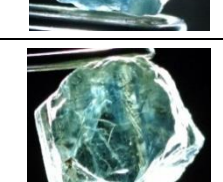
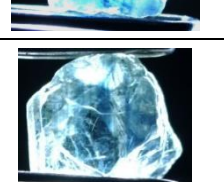
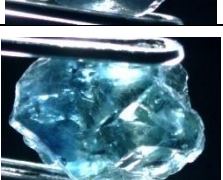
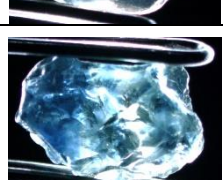
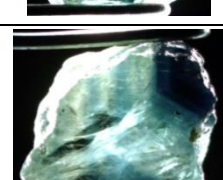
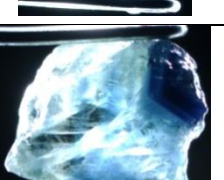
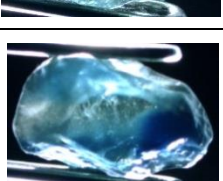
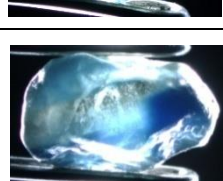
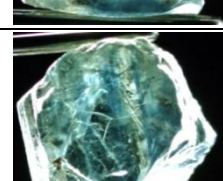
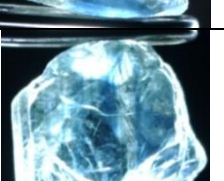
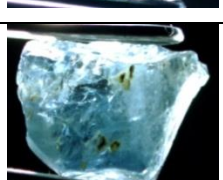
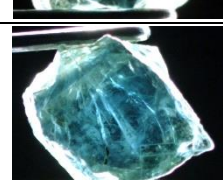
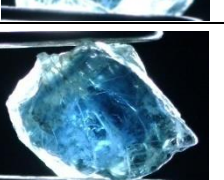
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
TpPt 04_1			KcPt 04_1		
TpPt 07_1			KcPt 06_1		
TpSLZn 03_1			KcPt 08_1		
BkZn 01_1			BkSLZn 08_1		

ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีจำนวน 54 ตัวอย่าง จาก 90 ตัวอย่าง คิดเป็น 60% ได้แก่ ตัวอย่าง PhrSLZn 01_1, PhrWtC 01_1, BkDkB 01_1, BkPt 02_1, BkPt 03_1, BkPt 04_1, BkSLZn 03_1, BkSLZn 04_1, BkSLZn 06_1, BkSLZn 07_1, BkSLZn 21_1, BkSLZn 23_1, BkZn 02_1, BkZn 03_1, BkZn 04_1, BkZn 05_1, BkZn 06_1, BkZn 07_1, BkZn 08_1, BkZn 13_1, BkZn 14_1, BkZn 15_1, BkZn 18_1, BkZn 19_1, BkZn 20_1, BkZn 22_1, BkZn 24_1, BkZn 25_1, BkZn 26_1, BkZn 27_1, BkZn 28_1, TpZn 04_1, TpSLZn 02_1, KcPt 03_1, KcPt 05_1 และ KcPt 07_1 ดังตารางที่ 4-18 ถึง 4-21

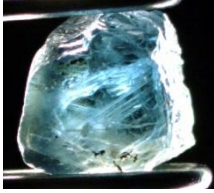
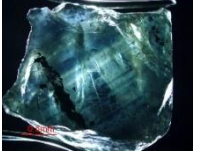
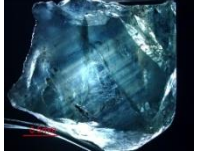
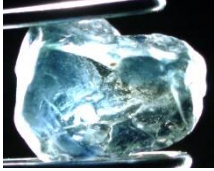
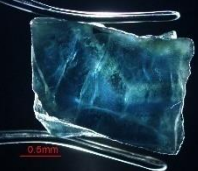
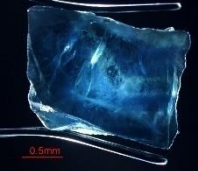
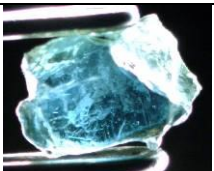
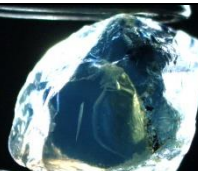
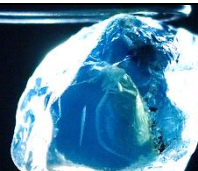
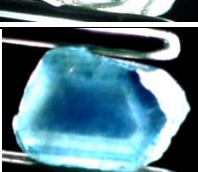
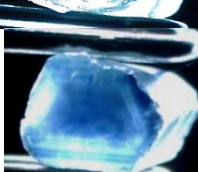
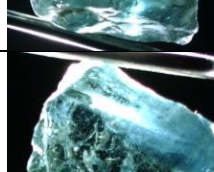
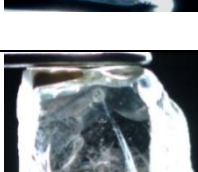
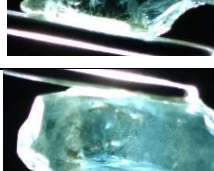
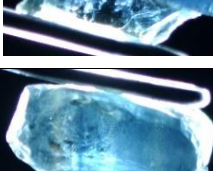
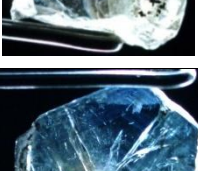
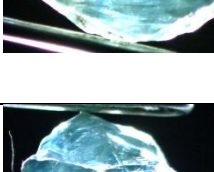
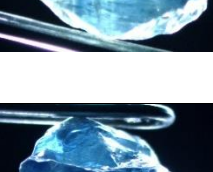
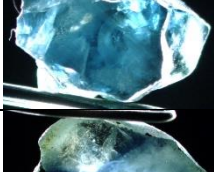
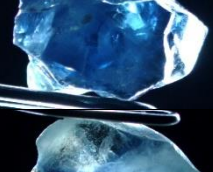
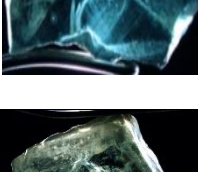
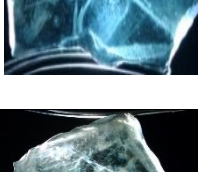
ตารางที่ 4-18 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียว ลดลงและเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
PhrSlZn 01_1			BkSlZn 01_1		
PhrWtC 01_1			BkSlZn 02_1		
BkDkB 01_1			BkSlZn 03_1		
BkDkB 02_1			BkSlZn 04_1		
BkPt 01_1			BkSlZn 05_1		
BkPt 02_1			BkSlZn 06_1		
BkPt 03_1			BkSlZn 07_1		
BkPt 04_1			BkZn 02_1		

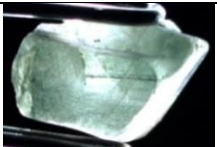
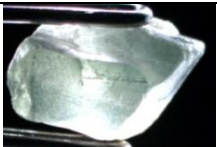
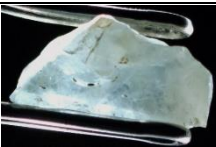
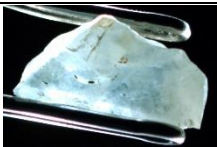
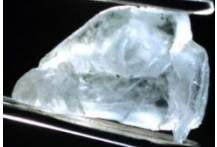
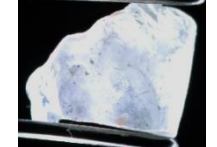
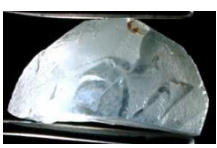
ตารางที่ 4-19 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียว ลดลง และเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
BkZn 03_1			BkZn 11_1		
BkZn 04_1			BkZn 12_1		
BkZn 05_1			BkZn 13_1		
BkZn 06_1			BkZn 14_1		
BkZn 07_1			BkZn 15_1		
BkZn 08_1			BkZn 16_1		
BkZn 09_1			BkZn 17_1		
BkZn 10_1			BkZn 18_1		

ตารางที่ 4-20 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียว ลดลง และเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น

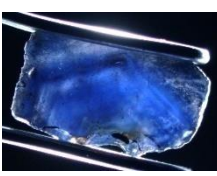
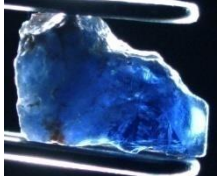
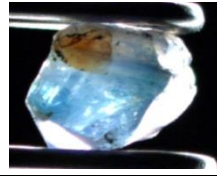
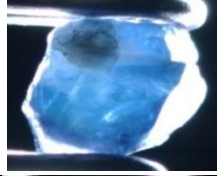
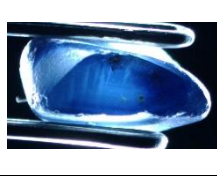
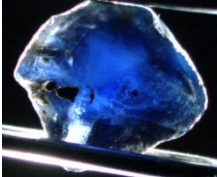
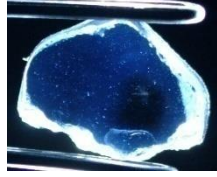
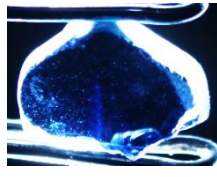
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
BkZn 19_1			BkZn 27_1		
BkZn 20_1			BkZn 28_1		
BkZn 21_1			TpDkC 01_1		
BkZn 22_1			TpDkC 02_1		
BkZn 23_1			TpZn 03_1		
BkZn 24_1			TpZn 04_1		
BkZn 25_1			TpSlZn 01_1		
BkZn 26_1			TpSlZn 02_1		

ตารางที่ 4-21 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีเขียว ลดลงและเห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้น

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
TpPt 02_1			KcPt 03_1		
KcPt 01_1			KcPt 05_1		
KcPt 02_1			KcPt 07_1		

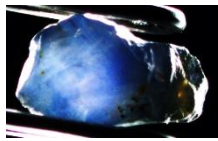
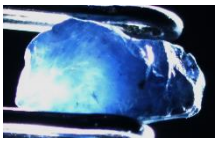
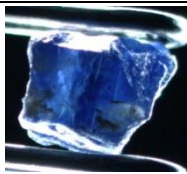
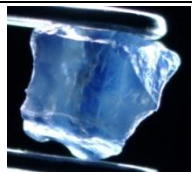
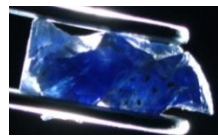
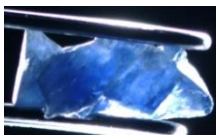
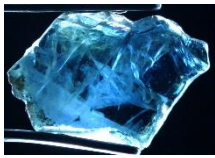
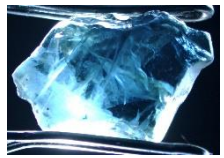
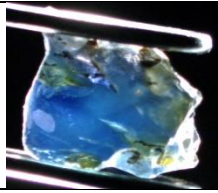
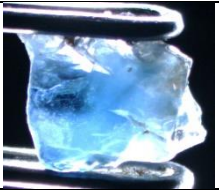
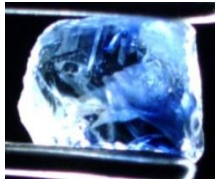
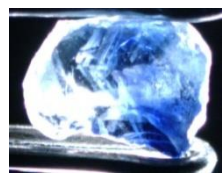
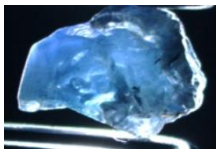
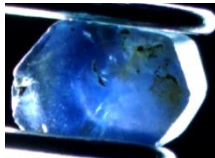
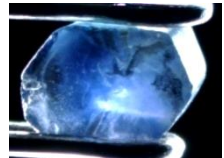
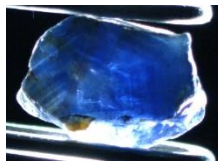
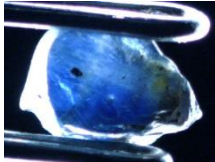
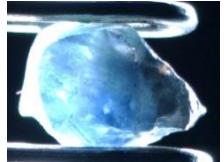
ลักษณะที่ 3 สีน้ำเงินเข้มขึ้น หย่อมสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด เนื่องจากแร่รูไทล์ที่แทรกอยู่ สลายตัวออกมา และจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 6 ตัวอย่างจาก 90 ตัวอย่าง คิดเป็น 6.66% ได้แก่ PhrZn 01_1, TpDkB 02_1, TpDkB 06_1, TpDkB 09_1, TpZn 01_1 และ TpZn 05_1 ดังตารางที่ 4-22

ตารางที่ 4-22 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้นหย่อมสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
PhrZn 01_1			TpDkB 09_1		
TpDkB 02_1			TpZn 01_1		
TpDkB 06_1			TpZn 05_1		

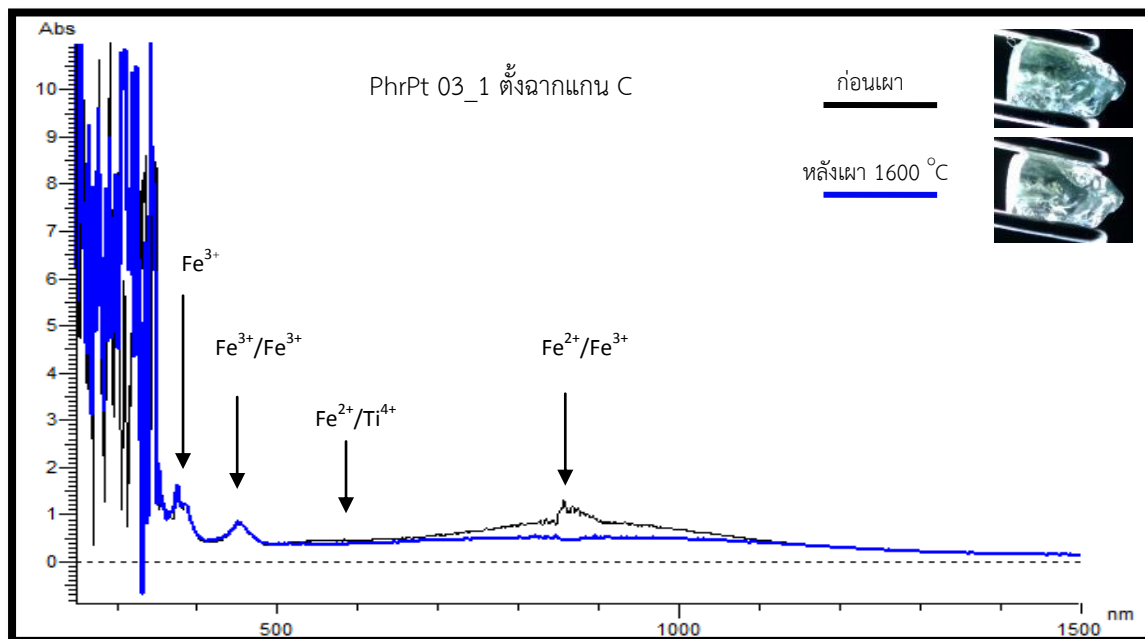
ลักษณะที่ 4 สีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง ตัวอย่างที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้มีทั้งหมด 10 ตัวอย่างจาก 90 ตัวอย่าง คิดเป็น 11.11% ได้แก่ตัวอย่าง TpDkB 03_1, TpDkB 04_1, TpDkB 05_1, TpDkB 07_1, TpDkB 08_1, TpDkC 03_1, TpZn 02_1, TpZn 06_1, TpPt 05_1 และ TpPt 06_1 ดังตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 เปรียบเทียบตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน ตัวอย่างชุดนี้มีสีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1600 °C
TpDkB 03_1			TpDkC 03_1		
TpDkB 04_1			TpZn 02_1		
TpDkB 05_1			TpZn 06_1		
TpDkB 07_1			TpPt 05_1		
TpDkB 08_1			TpPt 06_1		

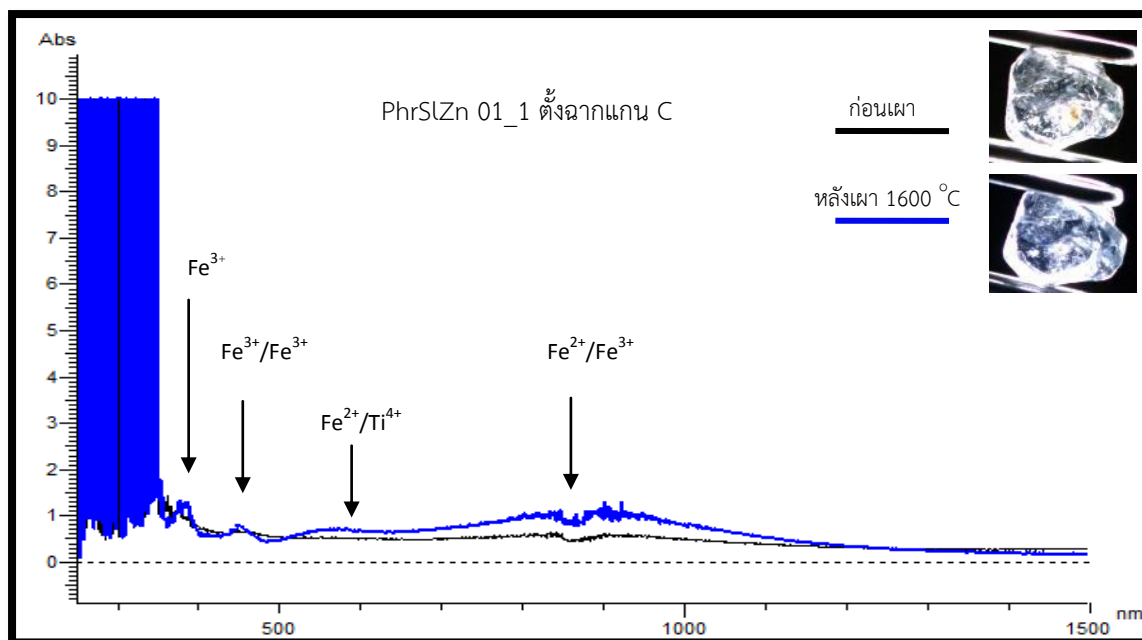
การเปรียบเทียบ Absorption spectrum ของตัวอย่างแซปไฟร์หลังการทดลองเผาชุดที่ 1

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างก่อนเผา แสดง absorption spectrum ของ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 380 นาโนเมตร $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร และของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่า absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ลดลง ดังรูปที่ 4-68



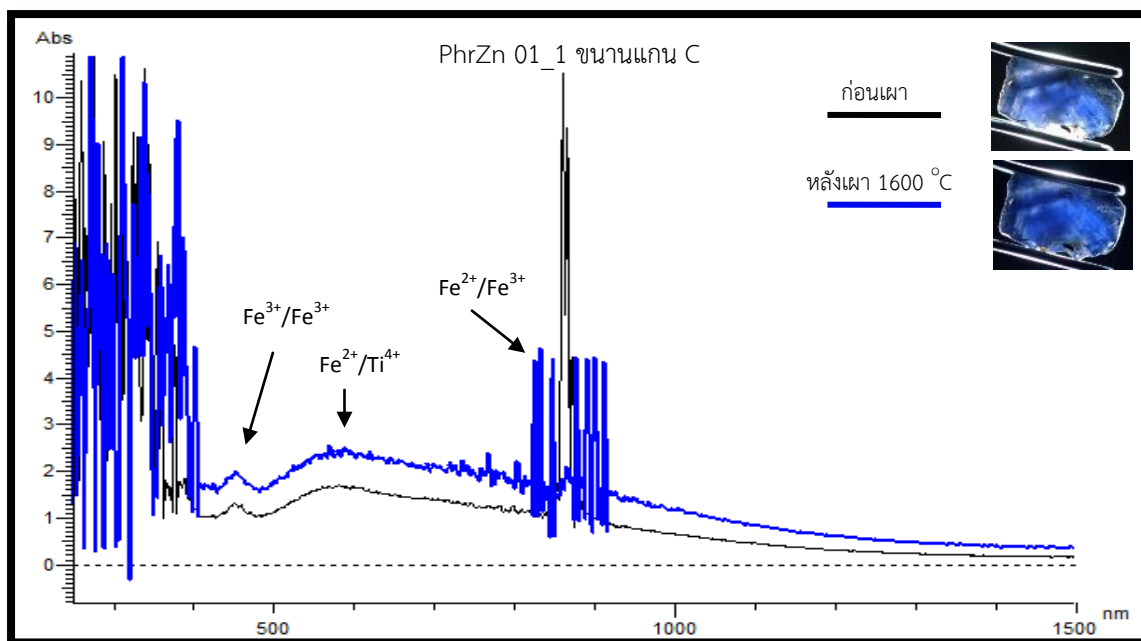
รูปที่ 4-68 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrPt 03_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างก่อนเผา แสดง absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบ absorption spectrum ใหม่อีก 2 ตำแหน่งคือ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งประมาณ 380 นาโนเมตร และของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร ส่วน peak ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 4-69

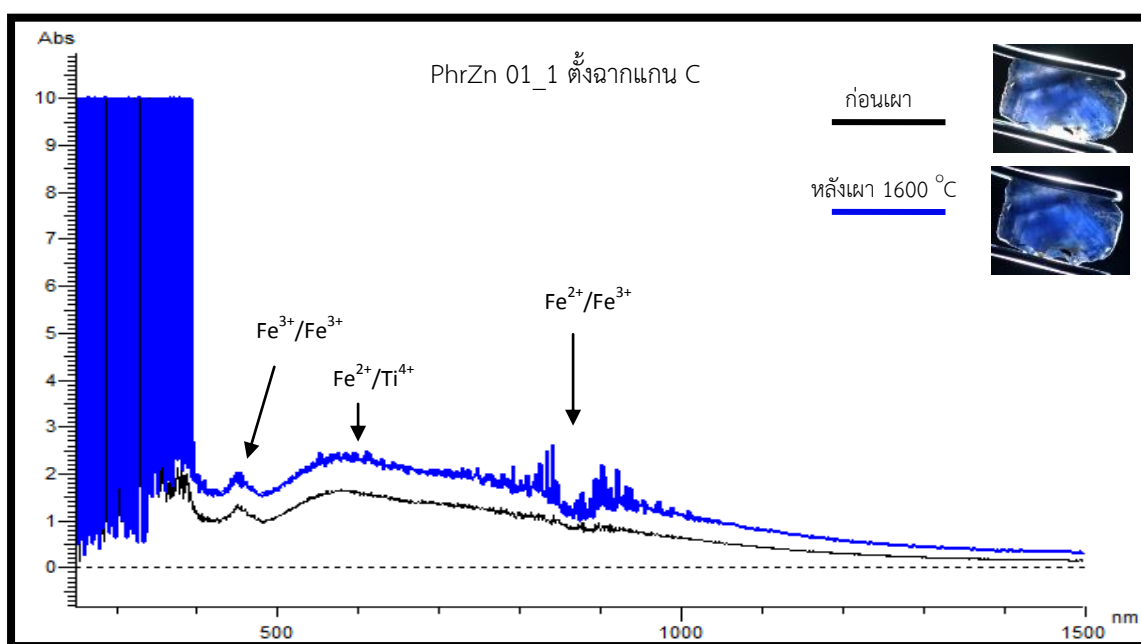


รูปที่ 4-69 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrSLZn 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ลักษณะที่ 3 ตัวอย่างก่อนเผา แสดง absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตรและของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่า absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตรและของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-70 และ 4-71



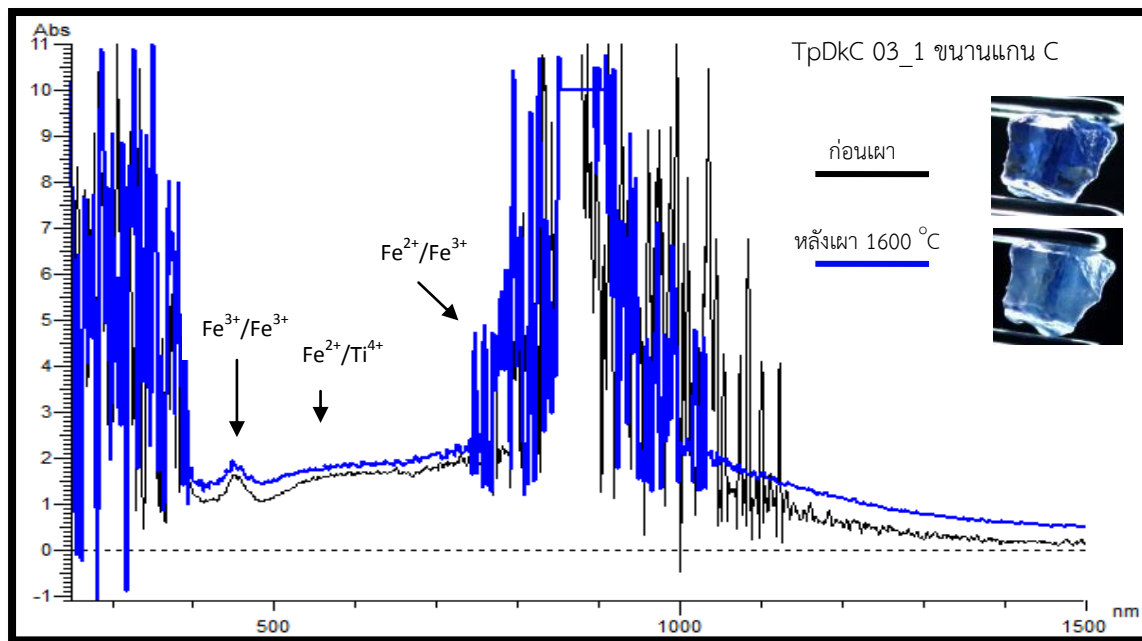
รูปที่ 4-70 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrZn 01_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน



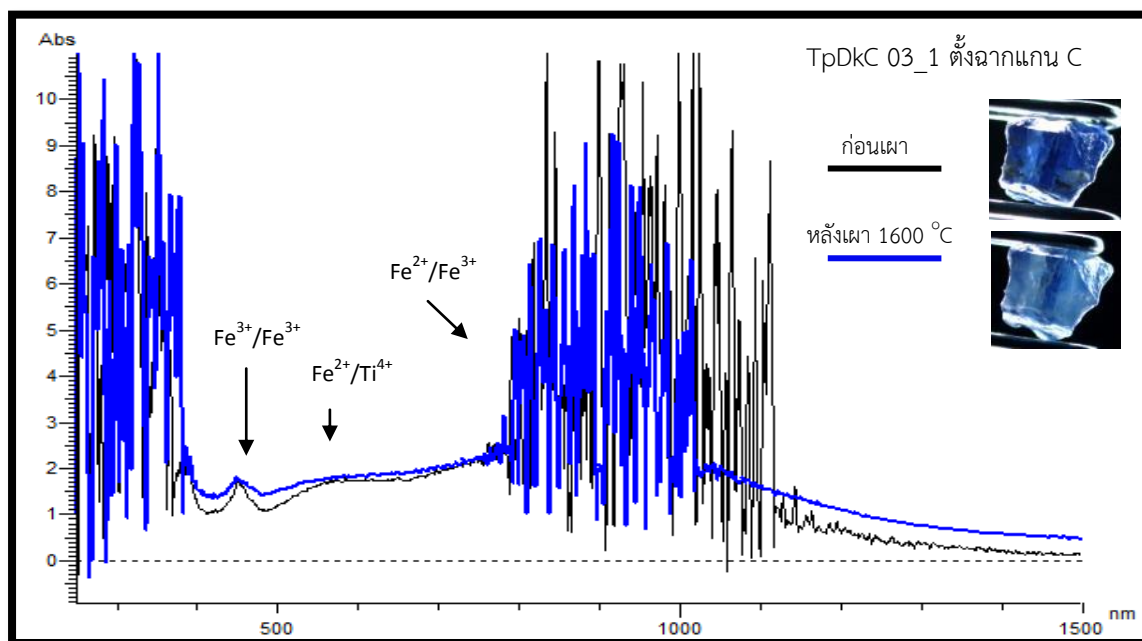
รูปที่ 4-71 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง PhrZn 01_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน

การเปลี่ยนแปลง absorption spectrum ลักษณะที่ 4 ตัวอย่างก่อนเผา แสดง absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร ของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตรและของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร ภายหลังการเผาพบว่า

absorption spectrum ของ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 450 นาโนเมตร $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ตำแหน่งประมาณ 550 - 700 นาโนเมตรและของ $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ที่ ตำแหน่งประมาณ 800 - 1000 นาโนเมตร เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4-72 และ 4-73



รูปที่ 4-72 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkC 03_1 ในทิศทางขนานกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน



รูปที่ 4-73 Absorption spectra ของแซปไฟร์ รหัสตัวอย่าง TpDkC 03_1 ในทิศทางตั้งฉากกับแกนแสง เปรียบเทียบระหว่างก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ด้วยเตาน้ำมัน

ตารางที่ 4-24 สรุปกิจกรรมการทดลองเผาตัวอย่าง blue sapphire ในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วย กิจกรรมทดลองเผา 3 ครั้งหลักด้วยกัน

ตารางที่ 4-24 สรุปกิจกรรมการทดลองเผาตัวอย่างพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวในการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งประกอบด้วยกิจกรรมทดลองเผา 3 ครั้งหลักด้วยกัน

การเผา ครั้งที่	เตาและ setting					จำนวนตัวอย่างและแหล่ง				
	เตา	สภาวะ	อุณหภูมิ สูงสุด	เวลายืน อุณหภูมิ	หมายเหตุ	Phr	Tp	Bk	Kc	รวม
1. การเผาด้วยเตาไฟฟ้า										
1.1	ไฟฟ้า	Oxidize	1200- 1750	5	เผา ยก 4 ครั้ง เพิ่ม T ครึ่งละ 200 °C	8	-	-	1	9
1.2	ไฟฟ้า	Oxidize	1750	5	เผา ยก	12	-	-	-	12
2. การเผาด้วยเตาแก๊ส										
2.1	แก๊ส	Oxidize	1900	3	เผา ยก	10	-	-	1	11
3. การเผาด้วยเตาน้ำมัน										
3.1	น้ำมัน	Reduced	1700	-	เผา อบ	10	30	42	8	90
รวม						40	30	42	10	122

4.4 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

4.4.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของพลอยจากแหล่งต่างๆ

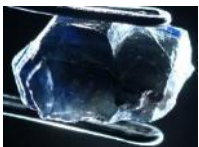
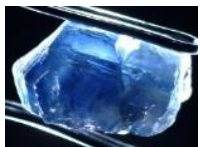
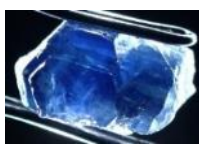
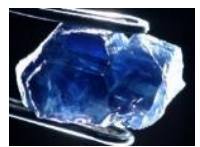
จากการตรวจสอบรายงานการวิจัย ได้แสดงให้เห็นว่าการเกิดคอร์นดัมในประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มักเกิดร่วมกับหินบะซอลต์ (Basalt) ยุค Cenozoic และได้แบ่งภูมิภาคนี้ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า Shan-Thai Block และ Indochina Block (รูปที่ 2-13) ซึ่งมีความแตกต่างในเรื่องของการกำเนิดของบริเวณทั้ง 2 นี้ ทำให้คุณลักษณะของหินบะซอลต์ของทั้ง 2 บริเวณนี้แตกต่างกัน องค์ประกอบของพลอยคอร์นดัมทั้ง 2 บริเวณนี้จึงแตกต่างกันไปด้วย [8] ในงานวิจัยนี้พลอยที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพลอยในเขต Shan-Thai Block จึงมีคุณสมบัติโดยรวมที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะการมีปริมาณของเหล็กเป็นธาตุร่องรอยสูง ส่งผลให้พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินมีสีค่อนข้างเข้ม-ค่อนข้างทึบแสง ด้วยเหตุนี้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจึงไม่ได้นำเรื่องแหล่งกำเนิดของพลอยมาเป็นตัวกำหนด แต่ได้ใช้คุณลักษณะที่มองเห็นได้ของพลอยมาเป็นตัวกำหนด ซึ่งได้แบ่งพลอยออกเป็น 7 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4-8 ผลการเปลี่ยนแปลงของพลอยแต่ละกลุ่มสรุปได้ดังนี้

ก. กลุ่มพลอยลักษณะทึบแสง (Opaque)

● การเผาซ้ำหลายครั้งด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize

การเปลี่ยนแปลงภายหลังการเผาของตัวอย่างชนิด Op ที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง ทำให้เห็นสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น เป็นผลเนื่องจาก Fe^{2+} (FeO) บางส่วนเปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} (Fe_2O_3) ในสภาวะ oxidize ลดการเกิดสีน้ำเงินที่เกิดจาก $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT (การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างเหล็กและไทเทเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสีน้ำเงินใน blue sapphire) และทำให้สีน้ำเงินจางลง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและสีน้ำตาลลดลง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น และเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1750 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมากจนเกือบทึบแสง คล้ายกับตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการเผา เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO_2) ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในพลอยเริ่มสลายตัวออกมา และจับตัวกับ Fe^{2+} ที่ยังคงมีอยู่ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้แร่รูไทล์สลายตัวออกมามากขึ้นและเกิดเป็นสีน้ำเงินเข้มมากยิ่งขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มทึบแสง (Opaque) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ

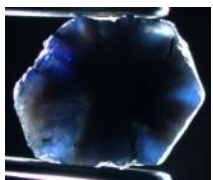
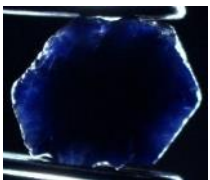
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1200 °C	หลังเผา 1400 °C	หลังเผา 1600 °C	หลังเผา 1750 °C
KcOp 01_1					

●การเผาครั้งแรกด้วยเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C ในสภาวะ oxidize

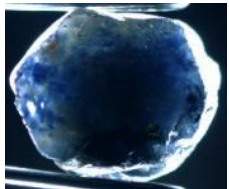
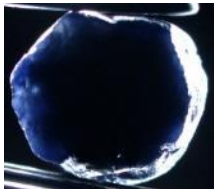
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-26 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด ลักษณะแกนของ Trapiche จางลงหรือหายไปแต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างในรูปของ core หรือ Trapiche สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง มลทินบางส่วนลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่าง สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4-26 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มทึบแสง (Opaque) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
KcOp 02_1		

ลักษณะที่ 2

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrOp 01_1		

●การยิงด้วยลำไอออน

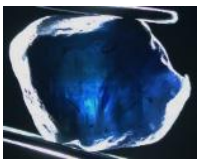
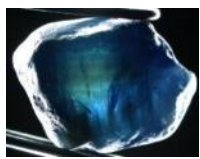
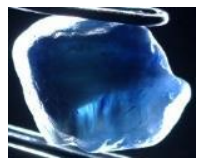
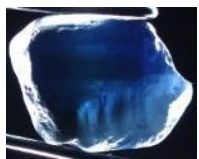
ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน พลอยกลุ่มนี้มองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากพลอยทึบแสงมาก แต่จะมีความโปร่งแสงขึ้นเล็กน้อย สีน้ำเงินจางลงเล็กน้อย ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน พลอยจะมีความโปร่งใสขึ้น สีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในการยิงไอออนทั้ง 2 แบบ ลักษณะแกนของ Trapiche จางลงเล็กน้อย

ข. กลุ่มพลอยสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark Blue)

● การเผาซ้ำหลายครั้งด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize

การเปลี่ยนแปลงภายหลังการเผาของตัวอย่างชนิด Op และ DkB มีลักษณะที่คล้ายกันคือ ที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง ทำให้เห็นสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น เป็นผลเนื่องจาก Fe^{2+} (FeO) บางส่วนเปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} (Fe_2O_3) ในสภาวะ oxidize ลดการเกิดสีน้ำเงินที่เกิดจาก $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT (การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างเหล็กและไทเทเนียม ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสีน้ำเงินใน blue sapphire) และทำให้สีน้ำเงินจางลง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและสีน้ำตาลลดลง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น และเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1750 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมากจนเกือบทึบแสงคล้ายกับตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการเผา เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO₂) ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างเริ่มสลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ที่ยังคงมีอยู่ในโครงสร้าง เกิดเป็น $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้แร่รูไทล์สลายตัวออกมามากขึ้นและเกิดเป็นสีน้ำเงินเข้มมากยิ่งขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-27

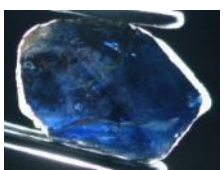
ตารางที่ 4-27 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1200 °C	หลังเผา 1400 °C	หลังเผา 1600 °C	หลังเผา 1750 °C
PhrDkB 02_1					

● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C สภาวะ oxidize

ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด เห็น zoning ชัดเจนขึ้น สีน้ำตาลลดลง มลทินบางส่วนลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่าง สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $\text{Fe}^{2+}-\text{Ti}^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-28

ตารางที่ 4-28 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C

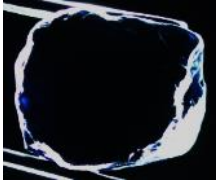
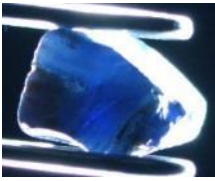
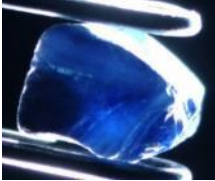
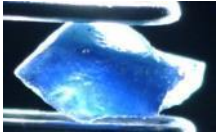
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkB 01_1		

●การเผาครั้งแรกด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1700 °C สภาวะ reduce

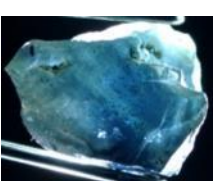
พบการเปลี่ยนแปลงใน 4 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-29 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผา สีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ลักษณะที่ 3 สีน้ำเงินเข้มขึ้น หย่อมสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด เนื่องจากแร่รูไทล์ที่แทรกอยู่สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 4 สีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง

ตารางที่ 4-29 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark blue) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

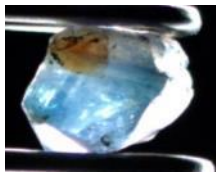
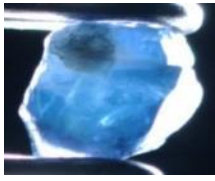
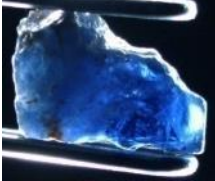
ลักษณะที่ 1

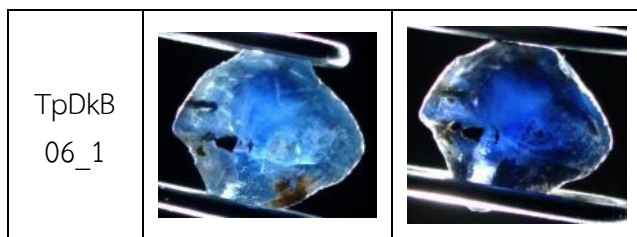
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
PhrDkB 03_1			TpDkB 10_1		
TpDkB 01_1			TpDkB 11_1		

ลักษณะที่ 2

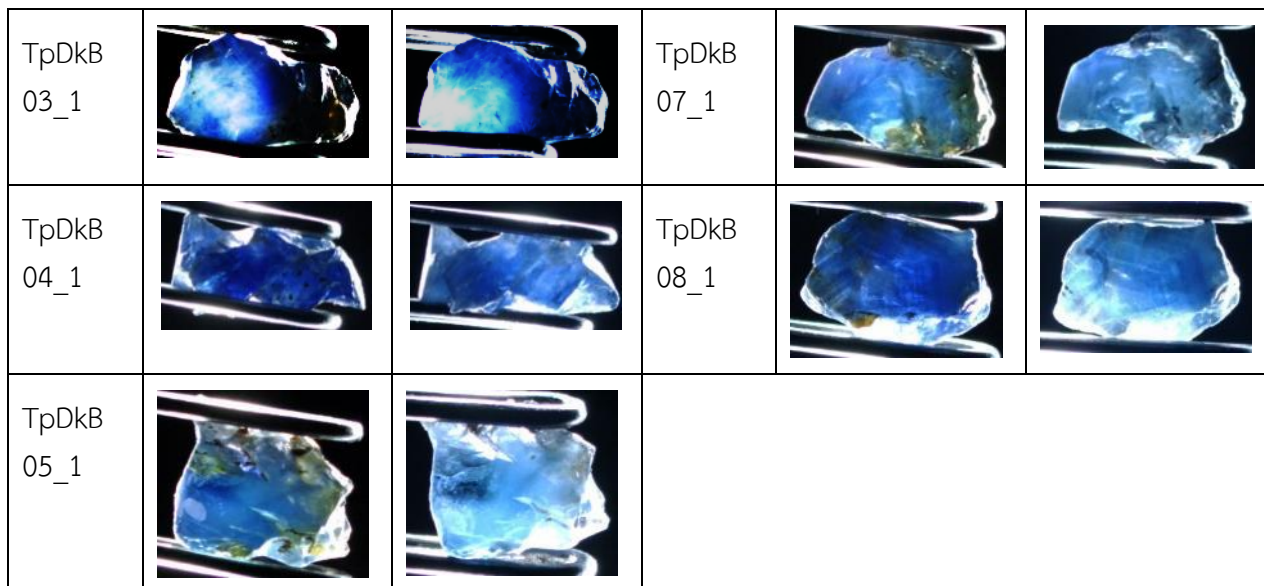
BkDkB 01_1			BkDkB 02_1		
---------------	---	---	---------------	--	---

ลักษณะที่ 3

TpDkB 02_1			TpDkB 09_1		
---------------	---	---	---------------	--	---



ลักษณะที่ 4



● การยิงด้วยลำไอออน

ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน พลอยกลุ่มนี้มองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงมากนัก เนื่องจากพลอยทึบแสงมาก แต่จะมีความโปร่งแสงขึ้นเล็กน้อย สีน้ำเงินจางลงเล็กน้อย ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน พลอยจะมีความโปร่งแสงขึ้น สีเขียวลดลง สีน้ำเงินเข้มขึ้น หย่อมสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด คราบสีเหลืองหายไป

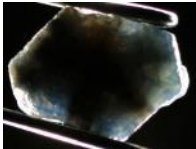
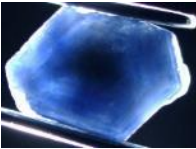
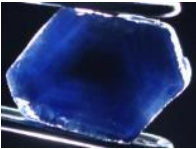
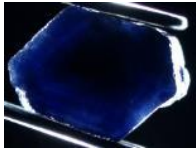
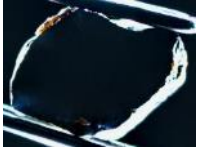
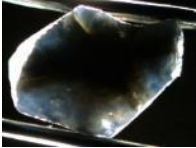
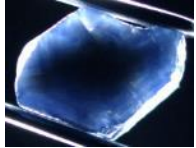
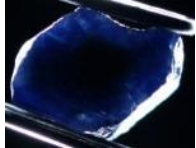
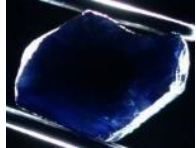
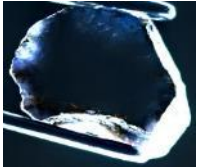
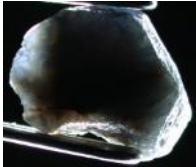
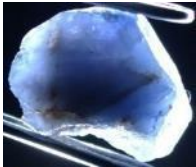
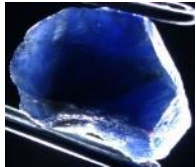
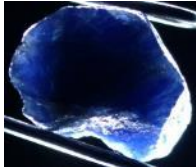
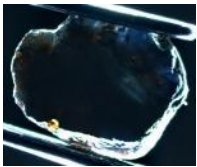
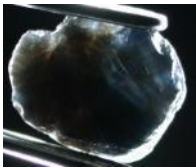
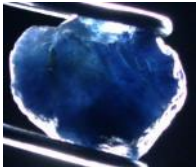
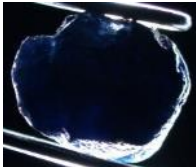
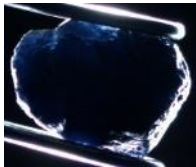
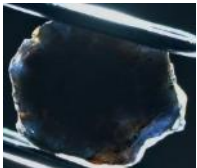
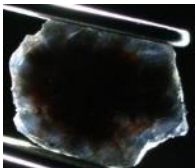
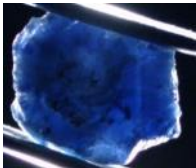
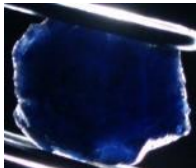
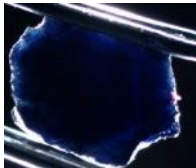
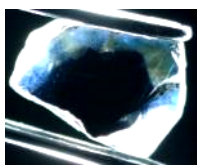
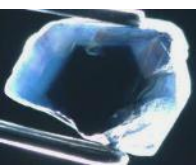
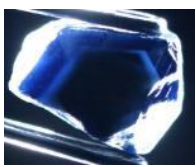
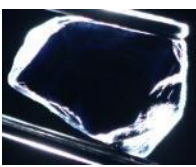
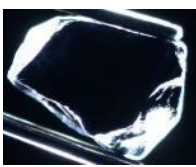
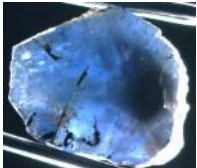
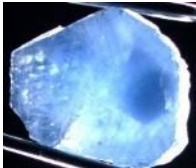
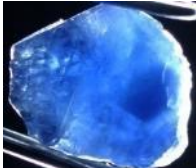
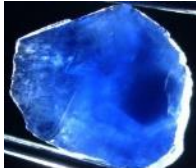
ค. กลุ่มพลอยตัวอย่างแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core)

● การเผาซ้ำหลายครั้งด้วยเตาไฟฟ้าในสถานะ oxidize

การเปลี่ยนแปลงภายหลังการเผาของตัวอย่างชนิด DKC ที่อุณหภูมิ 1200 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินลดลง ทำให้เห็นสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น เป็นผลเนื่องจาก Fe^{2+} (FeO) บางส่วนเปลี่ยนไปเป็น Fe^{3+} (Fe_2O_3) ในสถานะ oxidize ลดการเกิดสีน้ำเงินที่เกิดจาก $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT (การแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนระหว่างเหล็กและไทเทเนียมซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดสีน้ำเงินใน blue sapphire) และทำให้สีน้ำเงินจางลง เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1400 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและสีน้ำตาลลดลง เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1600 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มมากขึ้น และเมื่อเผาถึงอุณหภูมิ 1750 °C ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเข้มขึ้นมากจนเกือบทึบแสงคล้ายกับตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการเผา เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO_2) ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างเริ่มสลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ที่ยังคงมีอยู่ใน

โครงสร้าง เกิดเป็น $\text{Fe}^{2+}\text{-Ti}^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน เมื่อเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้แร่ธาตุสลายตัวออกมามากขึ้นและเกิดเป็นสีน้ำเงินเข้มมากยิ่งขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-30

ตารางที่ 4-30 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาเตาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิต่างๆ

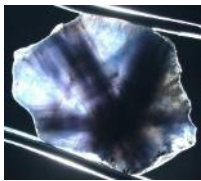
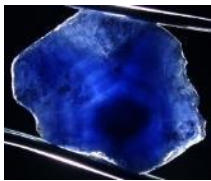
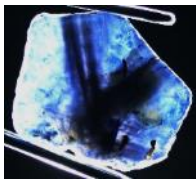
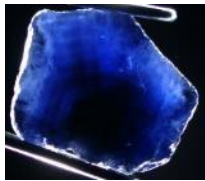
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1200 °C	หลังเผา 1400 °C	หลังเผา 1600 °C	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 08_1					
PhrDkC 10_1					
PhrDkC 11_1					
PhrDkC 13_1					
PhrDkC 14_1					
PhrDkC 09_1					
PhrDkC 12_1					

●การเผาครั้งแรกที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้าสภาวะ oxidize

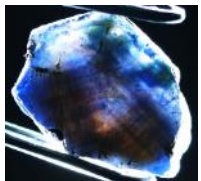
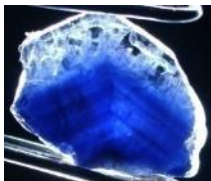
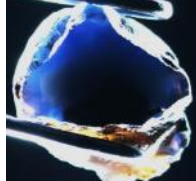
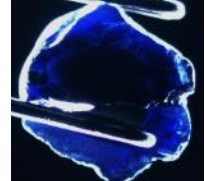
พบการเปลี่ยนแปลงใน 4 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-31 ลักษณะที่ 1 มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด ลักษณะแกนของ Trapiche จางลงหรือหายไป แต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่ เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO₂) ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างในรูปของ core หรือ Trapiche สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe²⁺ ในโครงสร้าง เกิดเป็น Fe²⁺-Ti⁴⁺ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเด่นชัดและกระจายมากขึ้น สีน้ำตาลลดลง มลทินบางส่วนลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่าง สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe²⁺ ในโครงสร้าง เกิดเป็น Fe²⁺-Ti⁴⁺ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 3 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นชัดเจน บริเวณแกนกลางสีเข้มมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ มลทินสีเหลืองลดลง ทำให้ตัวอย่างมีความใสมากขึ้น ส่วน core สีเทานั้นอาจเกิดจากการที่ Fe²⁺ เข้าจับกับ Al₂O₃ กลายเป็น Hercynite (FeAl₂O₄) มีลักษณะเป็นมลทินสีเทาและเผาแก้ได้ยาก มีตัวอย่างเดียวได้แก่ PhrDkC 18_1 ลักษณะที่ 4 ตัวอย่างก่อนเผาแสดงแกนกลางสีน้ำเงินเข้มขนาดใหญ่ มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหลังเผา

ตารางที่ 4-31 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

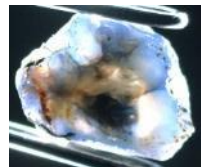
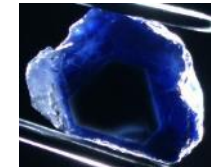
ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 15_1			PhrDkC 16_1		

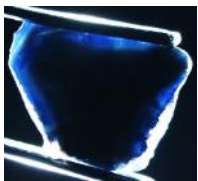
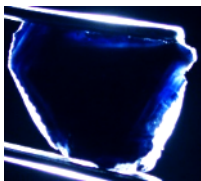
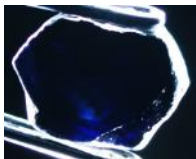
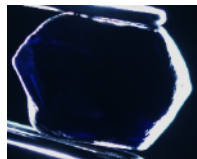
ลักษณะที่ 2

PhrDkC 17_1			PhrDkC 20_1		
-------------	---	---	-------------	--	---

ลักษณะที่ 3

PhrDkC 18_1		
-------------	---	---

ลักษณะที่ 4

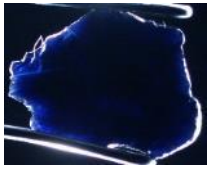
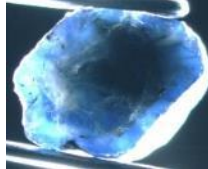
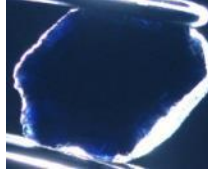
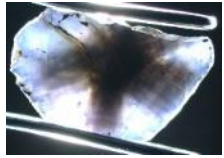
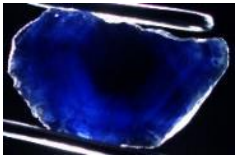
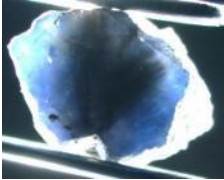
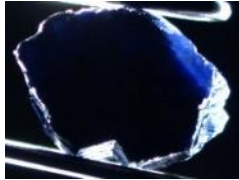
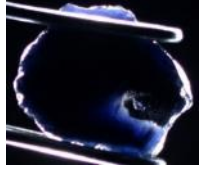
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrDkC 19_1			PhrDkC 22_1		

● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C สภาวะ oxidize

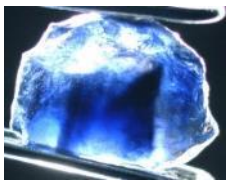
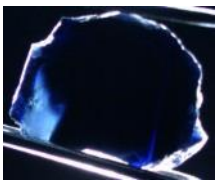
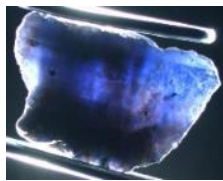
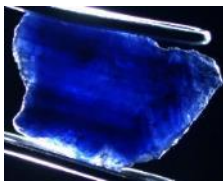
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-32 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด ลักษณะแขนของ Trapiche จางลงหรือหายไปแต่ยังคงเห็นแกนกลางอยู่เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างในรูปของ core หรือ Trapiche สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นและกระจายทั่วทั้งเม็ด สีน้ำตาลลดลง มลทินบางส่วนลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่าง สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน

ตารางที่ 4-32 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (Dark core) เมื่อเผาด้วยเตาแก๊สในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkC 01_1			PhrDkC 02_1		
PhrDkC 03_1			PhrDkC 07_1		
PhrDkC 05_1					

ลักษณะที่ 2

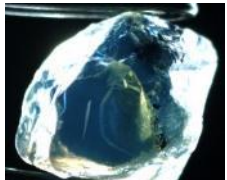
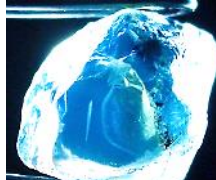
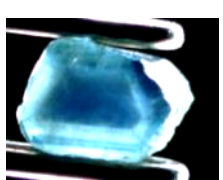
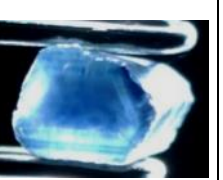
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrDkC 04_1			PhrDkC 06_1		

● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1700 °C สภาวะ reduce

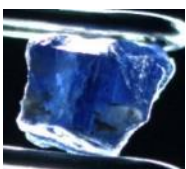
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-33 ลักษณะที่ 1 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กัน กลายเป็น $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ลักษณะที่ 2 สีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง

ตารางที่ 4-33 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (Dark core) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
TpDkC 01_1			TpDkC 02_1		

ลักษณะที่ 2

TpDkC 03_1		
---------------	---	---

●การยิงด้วยลำไอออน

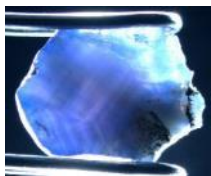
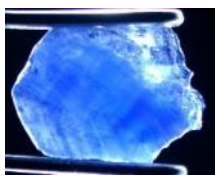
ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน ตัวอย่างโปร่งแสงมากขึ้น สีนํ้าเงินจางลง แต่กระจายมากขึ้น ลักษณะแขนของ Trapiche จางลง ลักษณะแกนกลางจางลง สีนํ้าตาลหายไป ในการยิงด้วยไนโตรเจน สีเขียวลดลง สีนํ้าเงินเข้มขึ้น จนดูเหมือนเป็นสีฟ้า การกระจายสีดีขึ้น คราบสีเหลืองหายไป พลอยดูโปร่งแสงขึ้น

ง. พลอยกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (White core)

●การเผาครั้งเดียวที่อุณหภูมิ 1750 °C โดยใช้สภาวะ oxidize

การเปลี่ยนแปลงภายหลังการเผาของตัวอย่างชนิด WtC สีนํ้าตาลจางลง สีนํ้าเงินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ลักษณะ core จางลงหรือหายไป เนื่องจากแร่รูไทล์หรือหมา (TiO₂) ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่างในรูปของ core สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe²⁺ ในโครงสร้าง เกิดเป็น Fe²⁺-Ti⁴⁺ IVCT มีผลให้เกิดสีนํ้าเงิน ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-34

ตารางที่ 4-34 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (White core) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C ด้วยเตาไฟฟ้า

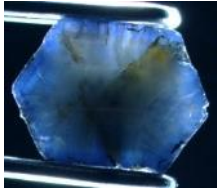
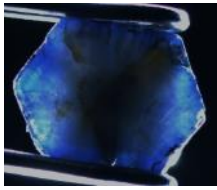
ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1750 °C
PhrWtC 03_1		

●การเผาครั้งเดียวด้วยเตานํ้ามันที่อุณหภูมิ 1700 °C สภาวะ reduce

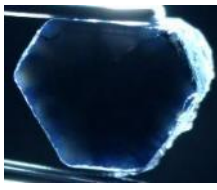
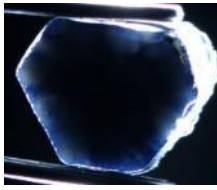
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-35 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe³⁺ เกิดเป็น IVCT กับ Fe³⁺ ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น Fe³⁺/Fe³⁺ IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe³⁺ กลายเป็น Fe²⁺ ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง

ตารางที่ 4-35 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแกนกลางสีขาวขุ่น (White core) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมัน ในสถานะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
PhrWtC 02_1		

ลักษณะที่ 2

PhrWtC 01_1		
----------------	---	---

● การยิงด้วยลำไอออน

ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน ในส่วน core จางลง พลอยดูโปร่งแสงขึ้น สีน้ำเงินจางลง ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน สีเขียวลดลง สีน้ำเงินเข้มขึ้น คราบสีเหลืองหายไป พลอยดูโปร่งแสงขึ้น อย่างไรก็ตาม ตัวอย่างในกลุ่มนี้มีค่อนข้างน้อย ทำให้เปรียบเทียบค่อนข้างยาก

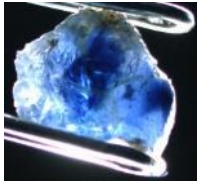
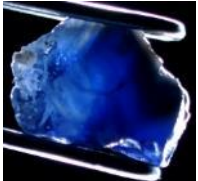
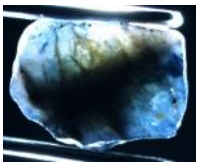
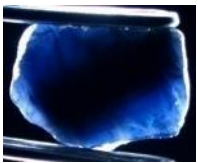
จ. พลอยกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch)

● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1750 °C โดยใช้สถานะ oxidize

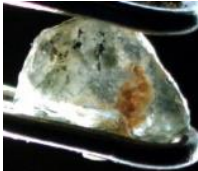
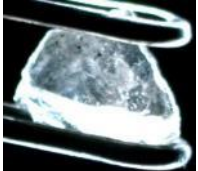
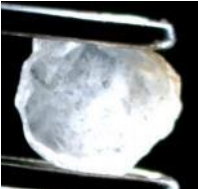
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-36 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเด่นชัดและกระจายมากขึ้น สีน้ำตาลลดลง มลทินบางส่วนลดลง เนื่องจากแร่รูไทล์ ที่แทรกเป็นมลทินอยู่ในตัวอย่าง สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $Fe^{2+}-Ti^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 2 ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง อาจเกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กัน กลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสีเขียวหายไปเพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง

ตารางที่ 4-36 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาด้วยเตาไฟฟ้าในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1750 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrPt 21_1			PhrPt 08_1		

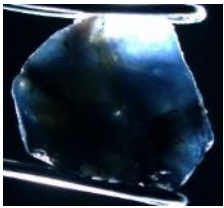
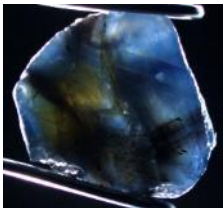
ลักษณะที่ 2

PhrPt 02_1			PhrPt 04_1		
---------------	---	---	---------------	--	---

● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C สภาวะ oxidize

ตัวอย่างมีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย สีกระจายมากขึ้นและเห็นสีน้ำตาลชัดเจนขึ้น เนื่องจากตัวอย่างมีความใสมากขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-37

ตารางที่ 4-37 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาในสภาวะ oxidize ที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเตาแก๊ส

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1900 °C
PhrPt 07_1		

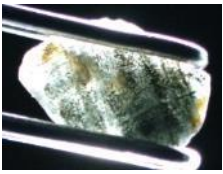
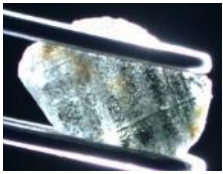
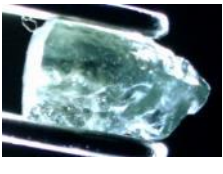
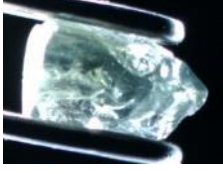
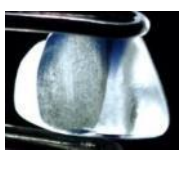
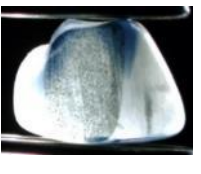
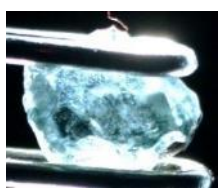
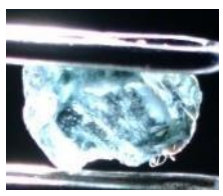
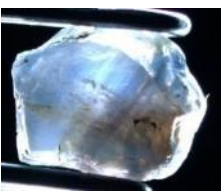
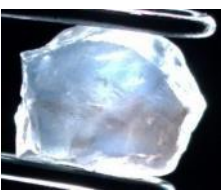
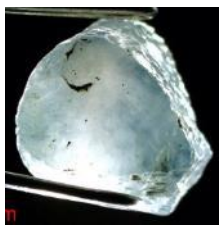
● การเผาครั้งเดียวด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1700 °C สภาวะ reduce

พบการเปลี่ยนแปลงใน 3 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-38 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผาสี

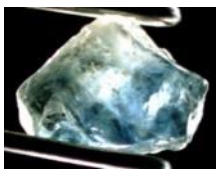
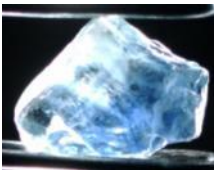
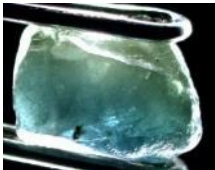
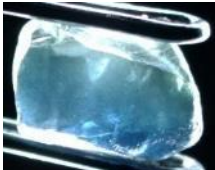
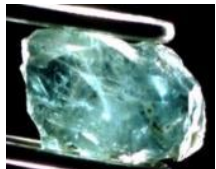
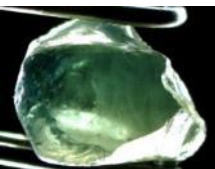
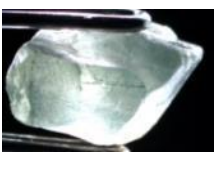
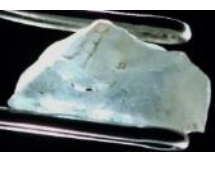
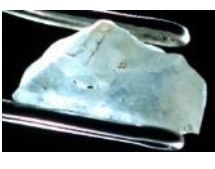
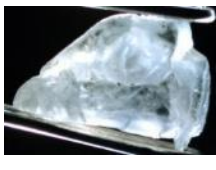
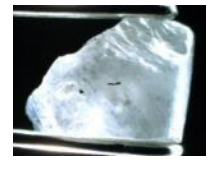
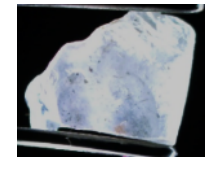
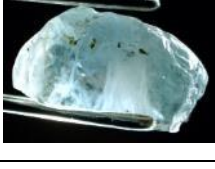
เขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ลักษณะที่ 3 สีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง

ตารางที่ 4-38 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ (Patch) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

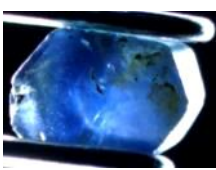
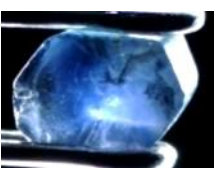
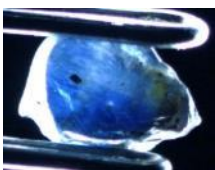
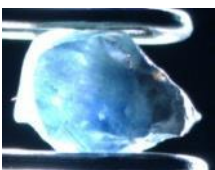
ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
PhrPt 01_1			TpPt 01_1		
PhrPt 03_1			TpPt 03_1		
PhrPt 05_1			TpPt 04_1		
PhrPt 06_1			TpPt 07_1		
KcPt 04_1			KcPt 08_1		
KcPt 06_1					

ลักษณะที่ 2

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
BkPt 01_1			BkPt 02_1		
BkPt 03_1			BkPt 04_1		
TpPt 02_1			KcPt 03_1		
KcPt 01_1			KcPt 05_1		
KcPt 02_1			KcPt 07_1		

ลักษณะที่ 3

TpPt 05_1			TpPt 06_1		
-----------	---	---	-----------	--	---

● การยิงด้วยลำไอออน

ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน พลอยดูโปร่งแสงขึ้น สีน้ำเงินกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น แต่สีดูจางลง ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน สีเขียวลดลง สีน้ำเงินเข้มขึ้น คราบสีเหลืองหายไป พลอยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีฟ้า และดูโปร่งแสงขึ้น

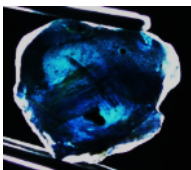
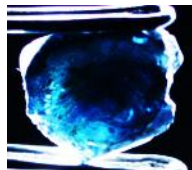
ฉ. พลอยกลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (Zoning)

- ทำการเผาครั้งเดียวด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1700°C สภาวะ reduce

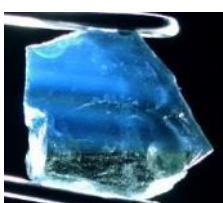
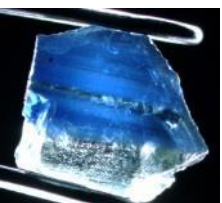
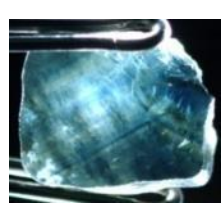
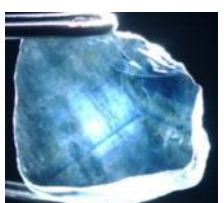
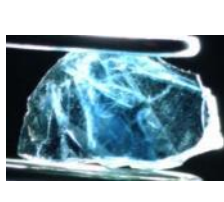
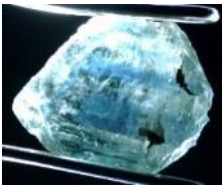
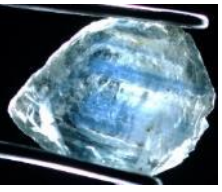
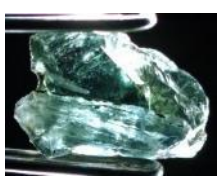
พบการเปลี่ยนแปลงใน 4 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-39 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผา สีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง ลักษณะที่ 3 สีน้ำเงินเข้มขึ้น หย่อมสีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด เนื่องจากแร่ธาตุที่แทรกอยู่สลายตัวออกมาและจับตัวกับ Fe^{2+} ในโครงสร้าง เกิดเป็น $\text{Fe}^{2+}\text{-Ti}^{4+}$ IVCT มีผลให้เกิดสีน้ำเงิน ลักษณะที่ 4 สีน้ำเงินลดลง คราบสีเหลืองลดลง

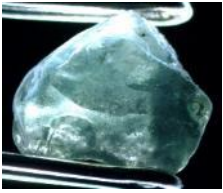
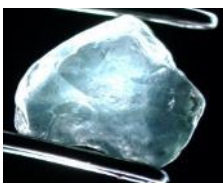
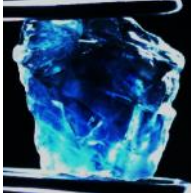
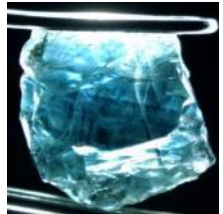
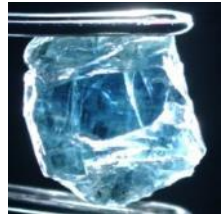
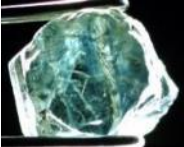
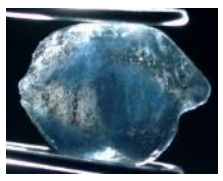
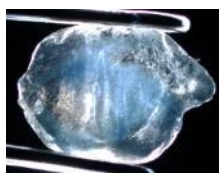
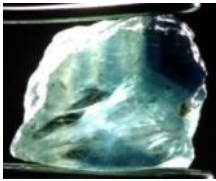
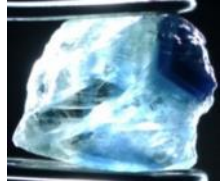
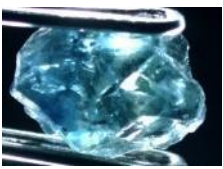
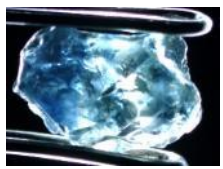
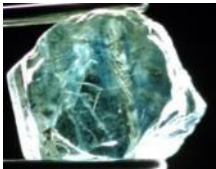
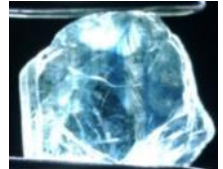
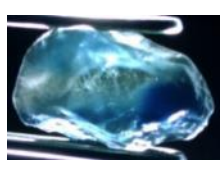
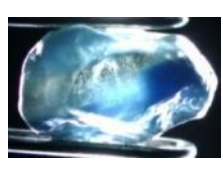
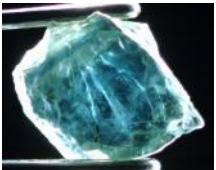
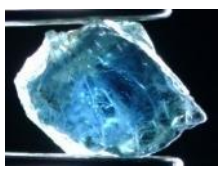
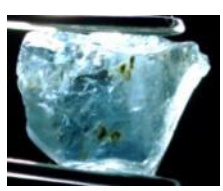
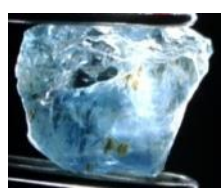
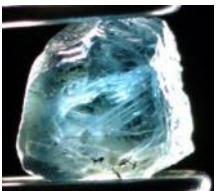
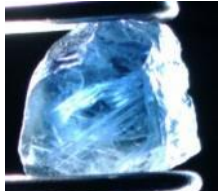
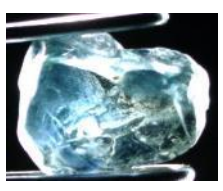
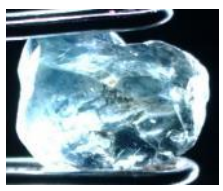
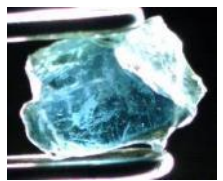
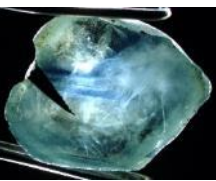
ตารางที่ 4-39 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (Zoning) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

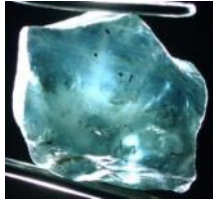
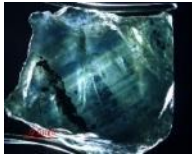
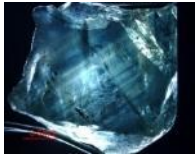
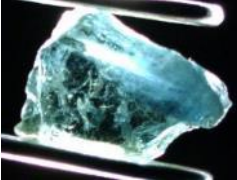
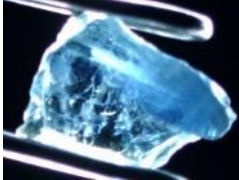
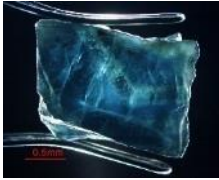
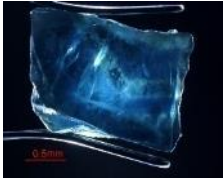
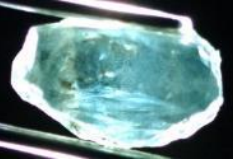
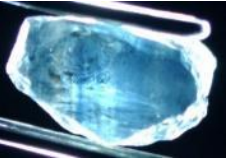
ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
PhrZn 02_1			BkZn 01_1		

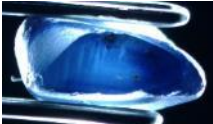
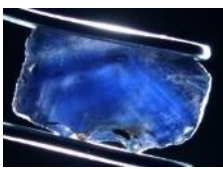
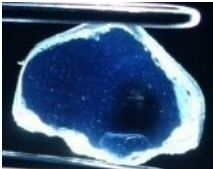
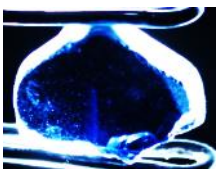
ลักษณะที่ 2

BkZn 02_1			BkZn 11_1		
BkZn 03_1			BkZn 12_1		
BkZn 04_1			BkZn 13_1		

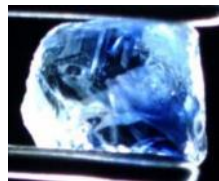
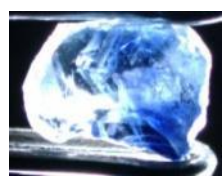
BkZn 05_1			BkZn 14_1		
BkZn 06_1			BkZn 15_1		
BkZn 07_1			BkZn 16_1		
BkZn 08_1			BkZn 17_1		
BkZn 09_1			BkZn 18_1		
BkZn 10_1			BkZn 19_1		
BkZn 20_1			BkZn 25_1		
BkZn 21_1			BkZn 26_1		

BkZn 22_1			BkZn 27_1		
BkZn 23_1			BkZn 28_1		
BkZn 24_1					

ลักษณะที่ 3

TpZn 01_1			PhrZn 01_1		
TpZn 05_1					

ลักษณะที่ 4

TpZn 02_1			TpZn 06_1		
--------------	---	---	--------------	--	---

● การยิงด้วยลำไอออน

ในการยิงด้วยไอออนออกซิเจน พลอยดูโปร่งแสงขึ้น แถบสีจางลง สีนํ้าเงินกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น แต่สีพลอยดูจางลง ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน Zone ที่เป็นสีเขียวหายไป สีนํ้าเงินเข้มขึ้น พลอยดูโปร่งแสงขึ้น คราบสีเหลืองหายไป พลอยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีฟ้า

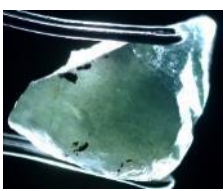
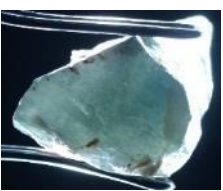
ข. พลอยกลุ่มแถบสีน้ำเงินไม่เด่นชัด (Slightly zoning)

- การเผาครั้งเดียวด้วยเตาน้ำมันที่อุณหภูมิ 1700 °C สภาวะ reduce

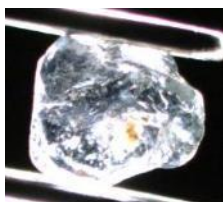
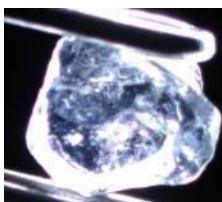
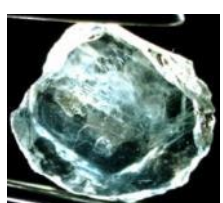
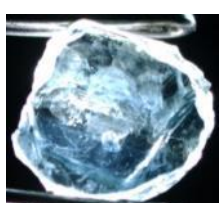
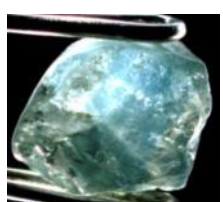
พบการเปลี่ยนแปลงใน 2 ลักษณะ ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 4-40 ลักษณะที่ 1 ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลง หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ลักษณะที่ 2 สีเขียวลดลง สีฟ้าเข้มขึ้น ตัวอย่างก่อนเผามีสีฟ้าอ่อนอมเขียว มีคราบสีเหลือง เกิดจาก Fe^{3+} เกิดเป็น IVCT กับ Fe^{3+} ที่อยู่ใกล้กันกลายเป็น Fe^{3+}/Fe^{3+} IVCT ทำให้เกิดสีเหลือง หลังเผา สีเขียวหายไป เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{3+} กลายเป็น Fe^{2+} ลดการเกิดสีเหลือง ทำให้เห็นสีฟ้าชัดเจนขึ้นและสีเหลืองลดลง

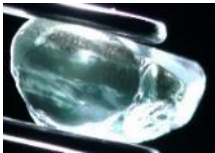
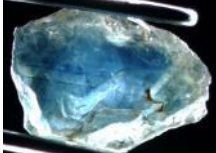
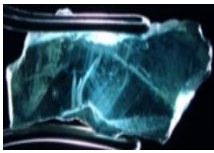
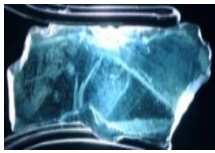
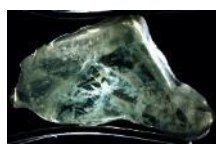
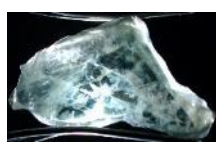
ตารางที่ 4-40 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างในกลุ่มแถบสีน้ำเงินไม่เด่นชัด (Slight zoning) เมื่อเผาด้วยเตาน้ำมันในสภาวะ reduce ที่อุณหภูมิ 1700 °C

ลักษณะที่ 1

ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C	ตัวอย่าง	ก่อนเผา	หลังเผา 1700 °C
TpSLZn 03_1			BkSLZn 08_1		

ลักษณะที่ 2

PhrSLZn 01_1			BkSLZn 04_1		
BkSLZn 01_1			BkSLZn 05_1		
BkSLZn 02_1			BkSLZn 06_1		

BkSLZn 03_1			BkSLZn 07_1		
TpSLZn 01_1			TpSLZn 02_1		

●การยิงด้วยลำไอออน

ในการยิงด้วยไอออนนอกซิเจน พลอยดูโปร่งแสงขึ้น แถบสีจางลงจนหายไป สีนํ้าเงินกระจายสม่ำเสมอมากขึ้น แต่สีพลอยดูจางลง ในการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน Zone ที่เป็นสีเขียวหายไป สีนํ้าเงินเข้มขึ้น พลอยดูโปร่งแสงขึ้น พลอยเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีฟ้า

4.4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้เทคนิคให้ความร้อนและการใช้ลำไอออน

พลอยชนิดต่างๆที่เกิดตามธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีสิ่งเจือปนที่เรียกว่า “หม่า” ในภาษาอังกฤษ เรียกว่า “อินคลูชัน (inclusion)” ฝังอยู่ในเนื้อพลอย [7] ในทางธรณีวิทยาแบ่งออกเป็นสามประเภทคือ อินคลูชันที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับในคอรันดัม อินคลูชันที่เป็นของแข็ง ได้แก่ แร่ที่เป็นสารประกอบต่างๆ เช่น แร่อะพาไทต์ [Apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, OH, Cl})_2$] แร่อัลแมนดีน (Almandine, $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) แร่ไพไรโรไทต์ (Pyrrhotite) ฯลฯ ในพลอยสกุคอรันดัมที่พบในประเทศไทย อินคลูชันที่เป็นของเหลว มักจะเป็นน้ำที่ละลายเกลือบางชนิด เช่น NaCl , NH_4Cl โดยมีรูปร่างต่างๆกัน เช่น เป็นรูปไข่ หรือออกเป็นแขนงคล้ายกิ่งไม้ หรือ เป็นรูปขนนก อินคลูชันที่เป็นก๊าซ มักเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) มีลักษณะเป็นฟองอากาศที่มีรูปร่างต่างๆกัน

พลอยที่มีอินคลูชันมาก จะทำให้ขุนมัว ไม่สวยงาม การให้ความร้อน ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม อาจทำให้อินคลูชันสลายตัวไป โดยเฉพาะอินคลูชันที่เป็นของเหลวและก๊าซ ความร้อนจะทำให้เกิดการแปรสภาพไปเป็นรูปแบบต่างๆ โดยอาจแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอรันดัม ทำให้พลอยโปร่งใสขึ้น ส่วนอินคลูชันที่เป็นของแข็ง การเผาอาจทำให้หลอมละลายและกระจายตัวออก อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีสลายตัวและแพร่เข้าสู่โครงสร้างผลึก แต่ก็อาจไม่ช่วยทำให้สีพลอยสดใสขึ้นมากนัก แต่ในบางกรณีอินคลูชันของแข็งที่เป็นฝุ่นผงขนาดเล็กกระจายอยู่ในเนื้อพลอยบางบริเวณ ทำให้เห็นเป็นสีเข้มของกลุ่มมลทินขนาดเล็กมากเกินไป การให้ความร้อนจะทำให้บริเวณที่เป็นสีเข้มมีความโปร่งใสมากขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพไปของฝุ่นผงขนาดเล็กเมื่อให้ความร้อน เช่นผงแร่ฮีมาไทต์ (Hematite, Fe_2O_3) หรือโครไมต์ (Chromite, FeCr_2O_3) ในพลอยสกุคอรันดัม เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1500-1700 °C ทำให้ผงเหล่านี้สลายตัว ไอออน Fe^{2+} หรือ Cr^{3+} ที่เป็นองค์ประกอบของอินคลูชัน สามารถแพร่เข้าไปแทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของพลอย ทำให้พลอยมีความโปร่งใสมากขึ้น เปลี่ยนจากสีเข้มเป็นสีจางลง หรือ เปลี่ยนจากสีจางเป็นสีเข้มขึ้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของธาตุให้สี การที่พลอยต่างๆมีสีได้นั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างของพลอยมีไอออนของธาตุทรานซิชัน เช่น Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{4+} , Zr^{4+} หรือมีไอออนของธาตุในกลุ่มชาโคเจนไนด์

(Chalcogenide) เช่น S^{2-} และ Se^{2-} ถ้าธาตุทำให้เกิดสีเป็นส่วนประกอบทางเคมีที่จะขาดไม่ได้ (Idiochromatic) เช่น โกเมนประเภทอัลแมนดิน ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$) และพลอยมาลาโคต์ ($CuCo_3(OH)_2$) สีของพลอยกลุ่มนี้ยากที่จะเผาให้สีเปลี่ยนแปลงได้ แต่พลอยบางชนิดหากบริสุทธิ์แล้วจะโปร่งใส ไม่มีสี แต่ที่พบเห็นสีได้เพราะมีธาตุที่ทำให้เกิดสีแทรกอยู่ในโครงสร้างของโครงผลึก เช่น พลอยทับทิม (Al_2O_3) มีสีแดงเพราะมี Cr^{3+} มรกต ($Be_3Al_2Si_6O_{18}$) มีสีเขียวเพราะมี Cr^{3+} และอาจมีธาตุให้สีชนิดอื่นปะปนอยู่ด้วย ทำให้ได้สีหลากหลาย โทนสี สีของพลอยที่มีธาตุแทรกอยู่ในโครงสร้างในลักษณะนี้สามารถเผาให้สีเข้มขึ้นหรือจางลงได้ เมื่อเผาในภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถเปลี่ยนจากสีหนึ่งเป็นอีกสีหนึ่งได้อีกด้วย

พลอยบางชนิดที่มีสีสันไม่เป็นที่ต้องการ สามารถนำมาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อให้เปลี่ยนสีให้เป็นสีที่ดีได้ กลไกที่ทำให้พลอยเปลี่ยนสีสันนิษฐานว่าเกิดได้ 2 ลักษณะคือ โดยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้เกิดการแพร่ของออกซิเจน (diffusion of oxygen gas) ในโครงสร้างของพลอยสกุลคอรันดัมที่มี Cr^{3+} , Fe^{3+} หรือ Fe^{2+} แทรกแทนที่ Al^{3+} ในกรณีที่ Cr^{3+} แทรกอยู่ทำให้พลอยมีสีแดงคือทับทิม แต่ในกรณีที่ Fe^{2+} แทรกอยู่พลอยจะไม่มีสี เมื่อนำมาเผาในบรรยากาศของออกซิเจนเป็นเวลานานพอสมควร อะตอมของออกซิเจนที่แทรกเข้าไปในเนื้อพลอยและทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน โดยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอน (electron transferation) ในพลอยสกุลคอรันดัม ที่มี Ti^{4+} และ Fe^{2+} แทนที่ Al^{3+} ในโครงสร้างของ Al_2O_3 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน ทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่าง Ti^{4+} และ Fe^{2+} จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงผลึกที่ล้อมรอบ Ti^{3+} และ Fe^{3+} ส่งผลให้เกิดสีน้ำเงิน ไอออนของธาตุไทเทเนียม (Ti^{4+}) เข้าแทนที่ (substitutional) Al^{3+} ในโครงสร้างของ Al_2O_3 เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 800-1500 °C เป็นเวลานานพอสมควร จะทำให้ไอออนของธาตุไทเทเนียมแยกตัวออกมาทำปฏิกิริยากับอะตอมของธาตุออกซิเจน กลายเป็น TiO_2 (exsolution) หากมีอะตอมของธาตุไทเทเนียมมากพอ ทำให้ TiO_2 ที่เกิดขึ้นรวมตัวกันเป็นผลึกที่มีลักษณะเป็นรูเข็ม แทรกอยู่ระหว่างเส้นแบ่งครั้งของรูปผลึกของพลอยตระกูลคอรันดัม ในธรรมชาติพลอยแต่ละชนิดจะมีไอออนของธาตุที่ทำให้เกิดสีหลายชนิดแทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้พลอยที่ผ่านการเผา อาจจะมีสีและความเข้มแตกต่างกันออกไป [5]

ในการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยของงานวิจัยนี้ ได้ทดลองใช้การเผาทั้งในแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 – 1750 °C และเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเทคนิคแบบเผายก และการเผาแบบรีดักชันในเตาน้ำมันดีเซล อุณหภูมิ 1900 °C ด้วยเทคนิคแบบเผาอบ การพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยเป็นเสมือนการพัฒนาเทคนิคการเปลี่ยนสภาพของเชื้อสีซึ่งเป็นธาตุเจือในคอรันดัม ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันของธาตุเจือเหล่านั้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่อยู่ของธาตุเจือและการแปรสภาพของผลึกขนาดเล็ก ให้เกิดการแพร่แทนที่เข้าสู่โครงสร้างของคอรันดัม เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความสะอาดของคอรันดัมได้ โดยเทคนิคเหล่านี้จะมีเงื่อนไขตัวแปรหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแหล่งพลังงานในการเผา อุณหภูมิในการเผาและอุณหภูมิสูงสุดในการเผา จำนวนครั้งที่เผา บรรยากาศในขณะที่ทำการเผา ความแรงของการเพิ่มและการลดอุณหภูมิในการเผา และสารเคมีที่ใช้ร่วมกับการเผา เป็นต้น โดยผลจากการทดลองพบว่า การเผาแบบออกซิเดชันช่วยให้พลอยที่มีสีเข้ม-มืดและขุ่นมัว ให้มีสีอ่อนลงและใสขึ้น ส่วนการเผาแบบรีดักชัน ช่วยให้พลอยที่มีสีอ่อน ให้เข้มขึ้น และช่วยให้สีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด นอกจากนั้น ยังช่วยกำจัดเหลือบสีเขียวด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยลำไอออนซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ในการทดลองยิงพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจนในสถานะสุญญากาศ พบว่ามีความน่าสนใจคือไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างไนโตรเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ไนโตรเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อ

พลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวซึ่งมีสีเหลืองจากสีของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้าง หลังการยิงไอออนไนโตรเจนสีเหลืองจางลงจนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ เกิดจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจากเฟอร์ริกไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์ันดัม ผลที่ได้คือจะทำให้สีเขียวจางลงหรือหายไป

ในกรณีของการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจน พบว่าพลอยสีน้ำเงินเข้มทึบแสงหลังการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจนส่งผลให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้นและทำให้เห็นสีน้ำเงินสดเข้มขึ้นด้วย กระบวนการสร้างออกซิเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ออกซิเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี โดยจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตรงข้ามกับการทดลองยิงด้วยลำไนโตรเจน ออกซิเจนไอออนที่ฝังเข้าไปในคอร์ันดัมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ทั้งที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้างและที่เป็นมลทินขนาดเล็กในคอร์ันดัม เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นการลดธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินลงและเพิ่มสีเหลืองในพลอยคอร์ันดัม ส่งผลให้สีน้ำเงินทึบแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะของสีน้ำเงินที่มีความทึบแสงลดลงและมีสีน้ำเงินที่สว่างขึ้น

นอกจากนี้มลทินขนาดเล็กที่สามารถพบได้ทั่วไปในพลอยคอร์ันดัมธรรมชาติ มักเกิดร่วมกับธาตุหลักและไทเทเนียม ทำให้สามารถพบแร่มลทินที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ในเนื้อพลอยคอร์ันดัม เช่น แร่อิลมีไนต์ (Ilmenite; FeTiO_3) แร่รูไทต์ (Rutile; TiO_2) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) แร่ไดแอสปอร์ (Diaspore; AlOOH) เป็นต้น โดยมลทินขนาดเล็กเหล่านี้จะส่งผลให้พลอยมีลักษณะขุ่นมัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมลทินและขนาดของมลทินด้วย เมื่อมีการยิงลำไอออนของออกซิเจนสู่พลอยคอร์ันดัมที่มีมลทินขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จะทำให้เกิดการออกซิไดส์เกิดขึ้นในเนื้อพลอย มลทินขนาดเล็กเหล่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์ันดัมในรูปของ Fe: Al_2O_3 , และ Ti: Al_2O_3 [37] ทำให้มลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยแปรสภาพไปโดยอาจมีขนาดที่เล็กลงหรืออาจแพร่หายไปในการยิงได้ ส่งผลให้พลอยคอร์ันดัมมีความสะอาดเพิ่มขึ้นหลังการยิงพลอยคอร์ันดัมด้วยออกซิเจนไอออน

ดังนั้นผลจากการเผาพลอยที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการยิงตัวอย่างพลอยด้วยลำไอออน จะพบว่ามีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก โดยทั้งสองวิธีจะมีตัวแปรที่สำคัญคือบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชันในการปรับปรุงคุณภาพพลอย โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของเหล็กที่จะส่งผลให้มีสีของพลอยคอร์ันดัมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของมลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยได้เช่นเดียวกัน แต่ในการยิงลำไอออนจะเป็นการเปลี่ยนสภาพของธาตุเจือให้สีโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของมลทินที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามจะพบว่าด้วยพลังงานของลำไอออนหรือจำนวนโดสที่ใช้ในการทดลอง ยังไม่มากเพียงพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของธาตุเจือให้สีที่เด่นชัดเท่ากับการเผาด้วยความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ที่สำคัญของการยิงไอออน คือ ค่าพลังงานไอออนซึ่งจะควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุ ค่ากระแสไอออนและค่าโดสซึ่งจะควบคุมอัตราและปริมาณการเปลี่ยนแปลง รวมไปถึงอุณหภูมิในระหว่างการยิงไอออนที่จะควบคุมอัตราการแลกเปลี่ยนประจุ และอุณหภูมิในการอบหลังยิงไอออนที่จะช่วยให้เกิดการรวมตัวระหว่างไอออนที่ฝังเข้าไปและอะตอมของวัสดุ หากมีการพัฒนาเครื่องเร่งลำ

ไอออนให้สมบูรณ์มากขึ้น และพัฒนาเทคนิคระหว่างยิงไอออนและหลังยิงไอออนได้เหมาะสมยิ่งขึ้น จะสามารถปรับปรุงคุณภาพสีของฟลอยคอรันดัมให้เทียบเท่าการเผาได้

อย่างไรก็ตาม ในแผนงานวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการยิงไอออนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น อีกทั้งให้มีการเพิ่มช่องใส่ไนโตรเจนเหลวด้วยในระบบ ด้วยจุดประสงค์ให้มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของฟลอย เพื่อช่วยลดความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและเพิ่มสถานะการเป็นอสัณฐาน (amorphous phase) ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสง เช่น โปร่งแสงมากขึ้น เป็นต้น ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์สำหรับงานวิจัยในเชิงลึกต่อไป

4.4.3 การทดลองในกลุ่มตัวอย่างที่มากขึ้นเพื่อหาข้อสรุปเชิงสถิติ

จากผลการศึกษาวิจัย พบว่า ฟลอยในลักษณะสีน้ำเงินเข้มมาก-ทึบแสงมาก มักจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากนัก ส่วนฟลอยในกลุ่มที่ค่อนข้างโปร่ง จะให้ผลการเปลี่ยนแปลงมากกว่า ตัวอย่างเช่น ฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวจากแหล่งบางกะจะจะให้ผลการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด โดยที่การเผาในสภาวะรีดักชัน หรือ การยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะสามารถเปลี่ยนหย่อมสีเขียวให้เป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงินได้ หรือแม้แต่ทำให้สีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีฟ้าหรือสีน้ำเงินทั้งเม็ดได้ จึงมีความน่าสนใจในการดำเนินการทางธุรกิจ

สำหรับการทดลองในกลุ่มตัวอย่างที่มากขึ้น คณะผู้วิจัยได้คัดเลือกฟลอยแชปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียวที่มีลักษณะสีน้ำเงินไม่เข้มมากและไม่ทึบแสงมาก รวมทั้งฟลอยแชปไฟร์ที่มีหย่อมสีเขียวหรือมีหย่อมสีน้ำตาลที่ค่อนข้างโปร่ง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคลำไอออน โดยใช้ conditions ที่ได้จากงานวิจัยจำนวนรวมทั้งสิ้นประมาณ 500 เม็ด เม็ดละประมาณ 0.5 – 1.5 กระรัต ไปยิงฝังด้วยไอออนไนโตรเจน ซึ่งพบว่าหลังยิงไอออนให้ผลในลักษณะเดียวกัน คือ มีความโปร่งใสเพิ่มมากขึ้น สีน้ำเงินลดลงเล็กน้อย หย่อมสีเขียว และหย่อมสีน้ำตาลลดลง จนเกือบหมด หลังจากนั้น ได้ส่งมอบให้กับโครงการย่อยที่ 2 เพื่อจัดทำเป็นเครื่องประดับเพื่อดูความเป็นไปได้ทางธุรกิจ

ในโครงการย่อยที่ 2 ได้นำเสนอกระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับแบบใหม่ เรียกว่า กระบวนการฝังพร้อมหล่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือการที่มีอัญมณีในตัวเรือนพร้อมเสร็จหลังจากการหล่อและสามารถขัดชุบได้ทันที การหล่อมีพื้นฐานเหมือนการหล่อโดยทั่วไป แต่มีส่วนที่จะแตกต่างคือ มีการการฝังอัญมณีลงบนเทียนก่อนที่จะทำการหล่อ จุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าฟลอยที่ผ่านกระบวนการยิงฝังด้วยไอออน สามารถผ่านกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงในระหว่างหล่อได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ ผลผลิตที่ได้คือสินค้าสำหรับนิชมาร์เก็ต เพื่อใช้เป็นของขวัญหรือของรางวัลที่มีความงดงามเชิงศิลป์ ในที่นี้ได้แก่พญาอินทรี ที่เป็นสัญลักษณ์ของการเป็นผู้นำ ความยิ่งใหญ่ ความสง่างามอย่างแท้จริง มีวิสัยทัศน์กว้างไกล และมองการณ์ไกล

4.4.4 การประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัย

(ก) มูลค่าจากการใช้ประโยชน์ (use value) จากงานวิจัยโดยตรง (direct use value)

เมื่อพิจารณาในแง่ของต้นทุนจากเครื่องมือ ราคาเตาเผาฟลอยคุณภาพดีจะอยู่ที่ประมาณ 1 ล้านบาท ซึ่งใช้เผาได้ในแบบใดแบบหนึ่ง หากต้องการเปลี่ยนสถานะการเผาจะต้องมีเตาหลายแบบ ในกรณีของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ หากสามารถสร้างเครื่องได้ในมูลค่าประมาณ 5 ล้านบาท แต่สามารถยิงไอออนได้หลายชนิด จะนับได้ว่ามูลค่าของเครื่องมือทั้ง 2 แบบ ไม่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาในแง่ของมูลค่าพลอย โดยคิดแยกกลุ่มน้ำหนักและแหล่งพลอย ใช้ต้นทุนราคาพลอย รวมกับค่าเช่าเหมาใช้เครื่องโอออนอิมพลานเตอร์วันละ 8,500 บาท เทียบกับมูลค่าพลอยหลังทดลอง โดยที่การยิงพลอยขนาด 1-2 กระรัต จะยังได้ประมาณวันละ 100 เม็ด หากสามารถเพิ่มมูลค่าพลอยได้ 2 เท่า ราคาพลอยตั้งต้นควรอยู่ที่กระรัตละ 100 บาท จึงจะคุ้มทุน

(ข) มูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ (non-use value)

หากพิจารณามูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่น มูลค่าจากการศึกษาพัฒนานักวิจัย มูลค่าจากการสร้างเทคโนโลยีใหม่ รวมทั้งมูลค่าจากการสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะพบว่ามีมูลค่าสูงจนไม่อาจประเมินได้ เทคโนโลยีนี้ จึงน่าจะได้รับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

(ค) มูลค่าเผื่อที่จะใช้ประโยชน์ (option value)

เป็นมูลค่าของการเป็นทางเลือกของผู้ประกอบการที่เป็นทางเลือก หากพลอยไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพแบบอื่นได้หรือจะเก็บไว้ใช้ในอนาคต ในความเป็นจริงมีพลอยเป็นจำนวนมากที่ผู้ประกอบการเก็บไว้ เนื่องจากคุณภาพยังไม่พอที่จะทำเป็นเครื่องประดับได้โดยตรง ซึ่งหากไม่มีทางเลือกอื่น และมีความคุ้มทุนทางเศรษฐกิจ ผู้ประกอบการย่อมเลือกที่จะเข้าสู่เทคโนโลยีใหม่มากกว่าการเก็บไว้ต่อไป

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

เป็นที่ทราบกันดีว่าการที่พลอยสีน้ำเงินที่มีสีเหลืองปน จนทำให้เห็นพลอยเป็นสีน้ำเงินอมเขียว นั้น จัดเป็นพลอยที่ตลาดไม่ให้ความนิยม จึงมีการนำเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความใสสะอาด (clarity) มาปรับปรุงคุณภาพพลอยให้เป็นสีน้ำเงินสด ทำให้พลอยมีมูลค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีปัจจุบันยังทำไม่ได้ ส่วนใหญ่มักจะการใช้การเผาโดยเติมสารเบริลเลียม (Be) เพื่อให้ได้เป็นสีเหลือง เทคนิคนี้นอกจากจะใช้อุณหภูมิสูง และอาศัยความชำนาญของผู้เผา เพื่อให้พลอยเปลี่ยนแปลงไปตามที่ต้องการอย่างสมบูรณ์แล้ว ยังมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการเผาพลอย เช่น สภาวะบรรยากาศของการเผา อุณหภูมิสูงสุดในการเผาระยะเวลาที่ใช้ อัตราการให้ความร้อนในแต่ละช่วงอุณหภูมิ อัตราการเย็นตัวในแต่ละช่วงอุณหภูมิ และการคงระดับความร้อน ณ อุณหภูมิใดๆ รวมทั้งธรรมชาติของวัตถุหรือสารเคมีที่สัมผัสกับเม็ดพลอย ซึ่งผู้ประกอบการจะมีความเสี่ยงที่เผาแล้วไม่ได้ผลตามที่คาดสูงเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากการเผาเป็นการให้พลังงานในรูปของความร้อนและต้องใช้เวลาาน ผลคือพลอยจะได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอทั้งเม็ด หรืออาจทำให้พลอยแตกร้าว หรือกลายเป็นหินได้ ดังนั้น การพัฒนาเทคนิคการเผาแบบดั้งเดิม และการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ได้แก่การนำเทคโนโลยีลำไอออน มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว (blue greenish sapphire) จึงมีความสำคัญ และเป็นการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพคุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณี ให้ประเทศไทยยังคงเป็นศูนย์กลางการปรับปรุงคุณภาพอัญมณีที่สำคัญของโลกต่อไป

ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษา มาจากแหล่งพลอยที่มีความสำคัญในตลาดอัญมณี ประกอบด้วยพลอยจากแหล่งในประเทศไทย ทั้งสิ้น 4 แหล่ง จาก 3 จังหวัด ได้แก่ แพร่ กาญจนบุรี และ จันทบุรี และมีแหล่งจากต่างประเทศ เพื่อนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ออสเตรเลีย และ มาดากัสการ์ ซึ่งเป็นแหล่งที่มีปริมาณธาตุหลักสูง ที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ โดยใช้จำนวนตัวอย่างจำนวนมากต่อแหล่ง เพื่อดูความเป็นไปได้ในเชิงสถิติ ในการทดลองได้แบ่งตัดพลอยแต่ละเม็ดออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำไปเผาด้วยเทคนิคต่างๆ และส่วนที่ 2 นำไปยิงด้วยไอออนชนิดต่างๆ ผลการทดลองทั้ง 2 ส่วน นำมาเปรียบเทียบกันเพื่อดูความคุ้มค่าในทางเศรษฐกิจอีกด้วย

โดยปกติคอร์ันดัมซึ่งมีสูตรเคมีเป็น Al_2O_3 ในระบบผลึกไตรโกนอล (Trigonal) เป็นแร่ที่มีสีใสไม่มีสี การเกิดสีของคอร์ันดัมจะมีลักษณะการเกิดแบบ “Allochromatic” ซึ่งเกิดจากธาตุร่องรอยที่เจืออยู่ในเนื้อพลอยในปริมาณเล็กน้อย โดยธาตุแต่ละชนิดที่เจือจะให้สีแตกต่างกัน และธาตุบางชนิดเมื่อมีเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ที่แตกต่างกันก็จะให้สีที่ต่างกัน ธาตุเจือเหล่านี้สามารถพบได้ในคอร์ันดัมหลายรูปแบบ เช่น อาจพบได้ในรูปแบบของการแทนที่ในโครงสร้างของคอร์ันดัม ซึ่งหากธาตุร่องรอยเหล่านั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับอลูมิเนียม (Al^{3+}) ก็จะสามารถเข้าแทนที่ในโครงสร้างได้ ซึ่งการเจือในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคอร์ันดัม ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุเจือที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดสีแดง และคู่ธาตุเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ในโครงสร้างของคอร์ันดัมซึ่งให้สีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังอาจ

พบธาตุเจอร์เมเนียมในรูปแบบของมลทิน ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ระดับนาโนเมตรซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จนถึงระดับมิลลิเมตรซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลกับความใสสะอาดของคอร์นดัม [3] ธาตุเจอร์เมเนียมเป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดสีต่างๆในแร่คอร์นดัม

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองได้ทำการวิเคราะห์และทดสอบด้วยเครื่องมือต่างๆดังนี้ (1) การวัดสีเทียบกับตัวอย่างมาตรฐานโดยเครื่องวิเคราะห์สี (colorimeter) (2) การศึกษาการดูดกลืนแสงโดยเครื่อง UV-Visible spectroscopy (3) การใช้เครื่อง EDXRF เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณมลทินออกไซด์ของโลหะต่างๆเช่น Al_2O_3 FeO และ TiO_2 (4) การทดลองให้ความร้อนในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนเปรียบเทียบกับอุณหภูมิต่างๆ (5) การทดลองใช้กระบวนการทางลำไอออนในสภาวะต่างๆ เพื่อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว โดยหาความสัมพันธ์ของปริมาณมลทินต่อโครงสร้างพลอยและปริมาณของธาตุร่องรอย เพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงแสงที่เหมาะสมกับความต้องการของตลาดพลอย เช่น ความสดของสี ความใส-สะอาด มลทินน้อย มีประกายหรือมีการเรืองแสงภายใต้แสงชนิดต่างๆ (6) ทำฐานข้อมูลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงแสงของแหล่งพลอยต่างๆ เพื่อพัฒนาพลอยให้มีคุณภาพดีขึ้น เพิ่มมูลค่าของพลอยคุณภาพต่ำได้

ในการพัฒนาเทคนิคการเผาพลอย ได้ทดลองใช้การเผาทั้งในแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $1200 - 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเตาแก๊สที่อุณหภูมิ $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้เทคนิคแบบเผายก และการเผาแบบบริดจ์ขึ้นในเตาน้ำมันดีเซลอุณหภูมิ $1900\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยใช้เทคนิคแบบเผาอบ การพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยเป็นเสมือนการพัฒนาเทคนิคการเปลี่ยนสภาพของเชื้อสีซึ่งเป็นธาตุเจอร์เมเนียมในคอร์นดัม ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันของธาตุเจอร์เมเนียม รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่อยู่ของธาตุเจอร์เมเนียมและการแปรสภาพของมลทินขนาดเล็ก ให้เกิดการแพร่แทนที่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์นดัม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความสะอาดของคอร์นดัมได้ โดยเทคนิคเหล่านี้จะมีเงื่อนไขตัวแปรหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแหล่งพลังงานในการเผา อุณหภูมิในการเผาและอุณหภูมิสูงสุดในการเผา จำนวนครั้งที่เผา บรรยากาศในขณะทำการเผา ความแรงของการเพิ่มและการลดอุณหภูมิในการเผา และสารเคมีที่ใช้ร่วมกับการเผา เป็นต้น โดยผลจากการทดลองพบว่า การเผาแบบออกซิเดชันช่วยให้พลอยที่มีสีเข้ม-มืด และขุ่นมัว ให้มีสีอ่อนลงและใสขึ้น ส่วนการเผาแบบบริดจ์ขึ้น ช่วยให้พลอยที่มีสีอ่อน ให้เข้มขึ้น และช่วยให้สีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด นอกจากนี้ ยังช่วยกำจัดเกลือสีเขียวด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยลำไอออนซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

ในการทดลองยิงพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจนในสภาวะสุญญากาศ พบว่ามีความน่าสนใจคือไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างไนโตรเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ไนโตรเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวซึ่งมีสีเหลืองจากสีของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่เป็นธาตุเจอร์เมเนียมในโครงสร้าง หลังการยิงไอออนไนโตรเจนสีเหลืองจางลงจนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ เกิดจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจากเฟอร์ริกไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์นดัม ผลที่ได้คือจะทำให้สีเขียวเจือจางลงหรือหายไป

ในกรณีของการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจน พบว่าพลอยน้ำเงินเข้มทึบแสงหลังการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจนส่งผลให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้นและทำให้เห็นสีน้ำเงินสดเข้มขึ้นด้วย กระบวนการสร้างออกซิเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ออกซิเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและ

ถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสภาวะออกซิเดชันได้รวดเร็วแม้ในสภาวะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี โดยจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตรงข้ามกับการทดลองยิ่งด้วยลำโนโตรเจน ออกซิเจนไอออนที่ฝังเข้าไปในคอร์นดัมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ทั้งที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้างและที่เป็นมลทินขนาดเล็กในคอร์นดัม เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้น้ำเงินในพลอยคอร์นดัม ส่งผลให้น้ำเงินที่บดแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะของสีที่น้ำเงินที่สว่างขึ้น

นอกจากนี้มลทินขนาดเล็กที่สามารถพบได้ทั่วไปในพลอยคอร์นดัมธรรมชาติ ซึ่งมักเกิดร่วมกับธาตุหลักและไทเทเนียม ทำให้สามารถพบแร่มลทินที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ในเนื้อพลอยคอร์นดัม เช่น แร่อิลมีไนต์ (Ilmenite; FeTiO_3) แร่รูไทต์ (Rutile; TiO_2) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) แร่ไดแอสปอร์ (Diaspore; AlOOH) เป็นต้น โดยมลทินขนาดเล็กเหล่านี้จะส่งผลให้พลอยมีลักษณะขุ่นมัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมลทินและขนาดของมลทินด้วย เมื่อมีการยิงลำไอออนของออกซิเจนสู่พลอยคอร์นดัมที่มีมลทินขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จะทำให้เกิดการออกซิไดส์เกิดขึ้นในเนื้อพลอย มลทินขนาดเล็กเหล่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์นดัมในรูปของ $\text{Fe: Al}_2\text{O}_3$, และ $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ [37] ทำให้มลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยแปรสภาพไปโดยอาจมีขนาดที่เล็กลงหรืออาจแพร่หายไปในการสร้างได้ ส่งผลให้พลอยคอร์นดัมมีความสะอาดเพิ่มขึ้นหลังการยิงพลอยคอร์นดัมด้วยออกซิเจนไอออน

ดังนั้นผลจากการเผาพลอยที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการยิงตัวอย่างพลอยด้วยลำไอออน จะพบว่ามีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก โดยทั้งสองวิธีจะมีตัวแปรที่สำคัญคือบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชันในการปรับปรุงคุณภาพพลอย โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของเหล็กที่จะส่งผลให้มีสีของพลอยคอร์นดัมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของมลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยได้เช่นเดียวกัน แต่ในการยิงลำไอออนจะเป็นการเปลี่ยนสภาพของธาตุเจือให้สีโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่จะพบว่าด้วยพลังงานของลำไอออนหรือจำนวนโดสที่ใช้ในการทดลองยังไม่มากเพียงพอจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของธาตุเจือให้สีที่เด่นชัดเท่ากับการเผาด้วยความร้อน หากมีการพัฒนาเครื่องเร่งลำไอออนให้สมบูรณ์มากขึ้น และเลือกค่าพลังงานหรือจำนวนโดสที่เหมาะสมกว่านี้ น่าจะสามารถปรับปรุงคุณภาพสีของพลอยคอร์นดัมให้เทียบเท่าการเผาได้

ในงานวิจัยนี้ยังได้มีการพัฒนากระบวนการยิงไอออนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนประจุได้มากขึ้น อีกทั้งให้มีการเพิ่มช่องใส่โนโตรเจนเหลวด้วยในระบบ ด้วยจุดประสงค์ให้มีการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของพลอยเพื่อลดความเป็นระเบียบในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและเพิ่มสภาวะการเป็นอสัณฐาน (amorphous phase) ส่งผลต่อสมบัติเชิงแสง เช่น โปร่งแสงมากขึ้น เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการเปรียบเทียบระหว่างการเผาและการยิงด้วยลำไอออน พบว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยที่พลอยกลุ่มที่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงสูง เป็นพลอยในกลุ่มที่ค่อนข้างโปร่ง ข้อดี-ข้อเสียของทั้งสองเทคนิค ที่เปรียบเทียบกันโดยตรง คือ เตาเผาพลอยมีราคาที่ถูกกว่าเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ แต่การเผาทำให้พลอยเปลี่ยนสภาพเนื่องจากความร้อนสูง ในขณะที่การยิงด้วยไอออนในสภาวะอุณหภูมิต่ำ ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว การเลือกเทคโนโลยี จึงต้องขึ้นอยู่กับคุณภาพของพลอยเป็นหลัก เมื่อประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัย โดยพิจารณาจากมูลค่าจากการใช้ประโยชน์ (use value) จากงานวิจัยโดยตรง (direct use value) โดยคิดแยกกลุ่มน้ำหนักและแหล่งพลอย ใช้ต้นทุนราคาพลอย รวมกับค่าเช่าเหมาใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์วันละ 8,500 บาท เทียบกับมูลค่าพลอยหลังทดลอง รวมกับมูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ (non-use value) เช่น มูลค่าจากการศึกษาพัฒนานักวิจัย การสร้างเทคโนโลยีใหม่ การสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และมูลค่าเผื่อที่จะใช้ประโยชน์ (option value) โดยเป็นมูลค่าของการเป็นทางเลือกของผู้ประกอบการ หากพลอยไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพแบบอื่นได้ซึ่งจะต้องเก็บไว้ใช้ในอนาคต จะเห็นว่ามีความน่าสนใจที่พัฒนาเทคโนโลยีนี้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wangcharoen, private communication, August, 2014.
- C. Rukkhajinda, private communication, September, 2014.
- [2] R.W. Hughes, *“Ruby & Sapphire”*, White Lotus, Bangkok, 1991, p. 136.
- [3] T. Themelis, *“The Heat Treatment of Ruby and Sapphire”*, Word Graphics, Inc., USA. 1992.
- [4] R.W. Hughes, *“Corundum”*, Courier International Ltd., England, 1990, p.314.
- [5] K. Nassau, *“The Physics and Chemistry of Color”*, 2nd Ed., John Wiley & sons, Inc., New York, 2001.
- [6] *“Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry”*, available online <<http://www.gly.uga.edu/railsback/FundamentalsIndex.html>>.
- [7] Z. Li, *“Study on inclusions in natural and synthetic gems”*, Chinese Journal of Geochemistry, 20 (2001) 324.
- [8] T.F. Yui, C.M. Wu, P. Limtrakun, W. Sricharn, A. Boonsoong, *“Oxygen isotope studies on placer sapphire and ruby in the Chanthaburi-Trat alkali basaltic gemfield, Thailand”*, Lithos 86 (2006) 197– 211.
- [9] C. Sutthirat, P. Charusiri, E. Farrar, A.H. Clark, *“New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and characteristics of some Cenozoic basalts in Thailand”*, Proceedings of international symposium on stratigraphic correlation of Southeast Asia, Bangkok, Thailand, 1994.
- [10] S. Saminpanya, *“Mineralogy and Origin of Gem Corundum Associated with Basalt in Thailand”*, Ph.D. Thesis, University of Manchester, United Kingdom, 2000.
- [11] S.M. Barr, A.S. MacDonald, *“Geochemistry and geochronology of late Cenozoic basalts of Southeast Asia-part II”*, Geological Society of American Bulletin 92 (1981) 1069-1142.
- [12] P. Vichit, *“Gemstones in Thailand: Proceedings of the National Conference on Geologic Resources of Thailand: Potential for Future Development”*, C. Piencharoen (ed. in chief), Published by the Department of Mineral Resources, Bangkok, Thailand, 1992.
- [13] P.T. Townsend, P.J. Chandler and L. Zhang, *“Optical effects of ion implantation”*, Cambridge University Press: Cambridge, 1994.
- [14] *“Ion implantation”*, available from <<http://www.n2bio.com/surface-modification-technology/ion-implantation.php>>.

- [15] J.F. Gibbons, *"Historical perspectives on ion implantation"*, Nucl. Instrum. Meth. B 21 (1987) 83-89.
- [16] G. Dearnaley, *"Adhesive and abrasive wear mechanisms in ion implanted metals"*, Nucl. Instrum. Meth. B 7 (1985) 158-165.
- [17] Y. Saito, H. Horie, S. Suganomata, *"X-ray photoelectron spectrum of Co implanted into sapphire"*, Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy 38 (3) (1991) 407-410.
- [18] S. Intarasiri, D. Bootkul, L.D. Yu, T. Kamwanna, S. Singkarat, T. Vilaithong, *"Gemological modification of local natural gemstones by ion beams"*, Surf. & Coat. Tech. 203 (2009) 2788-2792.
- [19] D. Suwannakachorn, D. Boonyawan, J.P. Green, S. Aumkaew, C. Thongleurm, P. Vichaisirimongkol, T. Vilaithong, *"A heavy ion implanting facility at the Chiang Mai University"*, Nucl. Instr. Meth. B 89 (1-4) (1994) 354-356.
- [20] S. Davydov, L.D. Yu, B. Yotsombat, S. Intarasiri, C. Thongleurm, V. A-no, T. Vilaithong, M.W. Rhodes, *"Applied high-current N-ion-beam surface engineering of metals and industrial tools at Chiang Mai University"*, Surf. & Coat. Tech. 131 (2000) 558-562.
- [21] L.D. Yu, T. Vilaithong, D. Suwannakachorn, S. Intarasiri, S. Thongtem, *"Ion implantation modification of special steels in Thailand"*, Nucl. Instr. Meth. B 127/128 (1997) 954-960.
- [22] L.D. Yu, T. Vilaithong, B. Yotsombat, S. Thongtem, J. G. Han and J. S. Lee, *"Surface modification of tool steels by combined Cr-and N-ion implantation"*, Surf. & Coat. Tech. 103-104 (1998) 328-333.
- [23] B. Phanchaisri, R. Chandet, L. D. Yu, T. Vilaithong, S. Jamjod and S. Anuntalabhochai, *"Low-energy ion beam-induced mutation in Thai jasmine rice (Oryza sativa L. cv. KDML 105)"*, Surf. & Coat. Tech. 201 (19-20) (2007) 8024-8028.
- [24] S. Mahadtanapuk, W. Teraarusiri, B. Phanchaisri, L.D. Yu, S. Anuntalabhochai, *"Breeding for blast-disease-resistant and high-yield Thai jasmine rice (Oryza sativa L. cv. KDML 105) mutants using low-energy ion beams"*, Nucl. Instr. Meth. B 307 (2013) 229-234.
- [25] A. Wijaikhum, *"Development of 100-kV Compact Ion Implanter"*, MS thesis, Chiang Mai University, 2013.
- [26] S. Intarasiri, A. Wijaikhum, D. Bootkul, D. Suwannakachorn, L.D. Yu, U. Tippawan, S. Singkarat, *"Development of vertical compact ion implanter for gemstones application"*, Applied Surface Science 310 (2014) 94-99.
- [27] K. Nassau, *"The origins of color in minerals"*, American Mineralogist 63 (1978) 219-229.

- [28] Y. Wang, M. Nastasi, *“Handbook of Modern Ion Beam Materials Analysis”*, Cambridge University Press, 2010.
- [29] *“Electron probe micro-analyzer (EPMA)”*, available from [http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/EPMA.html]
- [30] A. Primer, *“Fundamentals of UV-visible Spectroscopy”*, Hewlett-Packard publication, Germany, 1996.
- [31] C.P. Smith, *“Inside sapphires”*, Rapaport Diamond Report (2010) 123–132.
- [32] E. Smith, G. Dent, *“Modern Raman spectroscopy: a practical approach”*, John Wiley & Sons, Chichester, West Sussex, England, 2005.
- [33] J.R. Ferraro, K. Nakamoto, C.W. Brown, *“Introductory Raman Spectroscopy”*, 2nd edn, Academic press, San Diego, CA, 2003.
- [34] J. Lewis, D. Schwarzenbach, H.D. Flack, *“Electric field gradients and charge density in corundum, Al₂O₃”*, Crystal Physics, Diffraction, Theoretical and General Crystallography 38 (5) (1982) 7394.
- [35] M. I. Aroyo, A. Kirov, C. Capillas, J. M. Perez-Mato and H. Wondratschek, *“Bilbao Crystallographic Server II: Representations of crystallographic point groups and space groups”*, Acta Crystallographica A 62 (2006) 115-128.
- [36] S.P.S. Porto, R.S. Krishnan, *“Raman Effect of Corundum”*, the Journal of Chemical Physics 47 (2004) 1009.
- [37] L.D. Morpeth, J.C. McCallum, and K.W. Nugent. *“Synthesis of Titanium Sapphire by Ion Implantation”* Proceedings of the 10th Australian Conference on Nuclear Techniques of Analysis. Vol. 29 (2) (1998) 48-50.
- [38] S. Wiriyaichailoek, N. Naungkaew, P. Peerapisalpol, *“The ion implanted technique application for color enhancement of greenish Blue sapphire”*, B.S. Thesis, Srinakharinwirot University, 2014.
- [39] M. Khumpitak, C. Nilsithsathaporn, A. Romlamduan, *“The study of inclusion changing in Den chai blue sapphire, Phrae Province after stone in place casting technique”*, B.S. Thesis, Srinakharinwirot University, 2014.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

ก-1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของธาตุมลทินในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ที่มีต่อสมบัติการเปล่งแสง (luminescence) และการดูดกลืนแสง (absorption) ของพลอยชนิดนี้
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงคุณภาพสี ความโปร่งใส และลดตำหนิในพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคลำไอออน
- 3) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพกับวิธีการเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในปัจจุบัน
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาดผิว และปรับปรุงคุณภาพผิวพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ด้วยเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมา
- 5) เพื่อศึกษาวิธีการนำพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอออนแล้ว มาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ

ก-2 กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ แสดงดังในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 กิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

เดือนที่	กิจกรรม	ผลที่ได้รับ
6 เดือนที่ 1	- การตรวจและวิเคราะห์พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคต่างๆ	- ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดตำหนิภายในปริมาณธาตุเจือ และปริมาณแร่มลทินที่มีต่อสมบัติเชิงแสงและสมบัติเชิงกายภาพของพลอย
	- การเชื่อมโยงข้อมูลสมบัติเชิงแสง และลักษณะภายนอกที่สังเกตได้เพื่อจัดกลุ่มพลอย	-สามารถแบ่งพลอยออกเป็นกลุ่มๆ ตามคุณภาพเบื้องต้น ที่สามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพได้
	- การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยความร้อนแบบสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน	-ได้ผลการเปลี่ยนแปลงของพลอยจากการใช้ความร้อนสูงในสภาวะมีออกซิเจน (ออกซิเดชั่น) และสภาวะไร้ออกซิเจน (รีดักชั่น)
	- การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคลำไอออน ด้วยไอออนออกซิเจน และไนโตรเจน	- ได้ผลการเปลี่ยนแปลงของพลอยหลังจากยิงด้วยไอออนออกซิเจน และไนโตรเจน นำไปสู่ขั้นตอนที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้เทคนิคลำไอออนกับพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว
	- การปรับปรุงคุณภาพผิวของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมา	- ได้เรียนรู้ขั้นตอนที่เหมาะสมในการนำเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมาไปประยุกต์ใช้กับพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว
6 เดือนที่ 2	- การตรวจและวิเคราะห์พลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวเปรียบเทียบผลการทดลองหลังการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 เทคนิค	- ได้ผลเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวด้วยเทคนิคลำไอออน และเทคนิคทางความร้อน
	- การทดลองขึ้นรูปพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวที่ผ่านการยิงด้วยลำไอออน ให้เป็นเครื่องประดับ	- ได้ข้อมูลของพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวที่ผ่านการยิงด้วยลำไอออน เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับได้
	- ขั้นตอนการสรุปและเผยแพร่งานวิจัย	- ได้ข้อมูลสำหรับผู้ประกอบการ ให้สามารถนำไปต่อยอดเชิงธุรกิจได้ - ได้ผลการประเมิน ประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของงานวิจัย

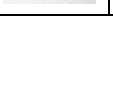
ภาคผนวก ข.

ข้อมูลพื้นฐานของพลอยจากแหล่งต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มสีน้ำเงินเข้มเกือบทั้งเม็ด (PhrDkB) จำนวน 6 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง		ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrDkB 01_1		Stp	bV 5/5	1.38	3.86	1.762-1.770	Colour zoning
PhrDkB 01_2		Stp	bV 5/5	1.63	3.86	1.770-1.774	Colour zoning
PhrDkB 02_1		Trl	V 6/5	2.16	3.96	1.763-1.771	Fingerprint
PhrDkB 02_2		Trl	B 8/3	2.56	3.96	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
PhrDkB 03_1		STrl	bV 6/5	2.11	3.698	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
PhrDkB 03_2		STrl	bV 6/5	3.14	3.95	1.762-1.770	Fingerprint

ตารางที่ ข-2 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มมีแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (PhrDkC) จำนวน 44 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง		ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrDkC 01_1		STp	Body bV 5/4	1.27	3.97	1.762-1.770	Fracture
PhrDkC 01_2		STp	Trapiche V 8/1	0.80		1.767-1.774	Fingerprint
PhrDkC 02_1		Opa	bV 5/5	1.28	3.97	1.762-1.768	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 02_2		Opa		1.15		1.770-1.774	Colour zoning
PhrDkC 03_1		Opa	Body bV 5/5	0.96	4.00	1.762-1.770	Colour zoning
PhrDkC 03_2		STp	Trapiche V 8/1	0.88		1.761-1.769	Fingerprint
PhrDkC 04_1		STp	bV 6/4	0.96	3.98	1.764-1.772	Rhombohedral Parting
PhrDkC 04_2		STp		0.82		1.762-1.770	Fingerprint
PhrDkC 05_1		STrl	vB 4/3	0.90	3.68	1.762-1.769	Fingerprint
PhrDkC 05_2		STrl		0.62		1.773-1.778	Bubble, Fingerprint
PhrDkC 06_1		STp	bV 5/4	0.75	3.93	1.762-1.770	Fingerprint
PhrDkC 06_2		Tp		0.29		1.773-1.778	Colour zoning
PhrDkC 07_1		STrl	vB 5/3	0.67	4.00	1.764-1.772	Colour zoning
PhrDkC 07_2		STrl		0.48		1.767-1.774	Colour zoning
PhrDkC 08_1		STrl	bV 6/4	1.12	3.97	1.763-1.771	Fingerprint
PhrDkC 08_2		STrl	bV 6/4	0.60		1.767-1.774	Colour zoning
PhrDkC 9_1		STrl	B 3/4	1.12	3.86	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 9_2		Trl	B 3/4	0.55		1.773-1.778	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 10_1		STrl	V 8/1	1.43	3.87	1.762-1.770	Colour zoning
PhrDkC 10_2		STrl	V 8/1	0.81		1.773-1.778	Colour zoning, fingerprint

รหัสตัวอย่าง		ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrDkC 11_1		STrl	B 8/3	2.40	3.96	1.762-1.770	Fingerprint
PhrDkC 11_2		STrl	B 8/3	1.50		1.770-1.774	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 12_1		STrl	B 6/6	0.81	3.92	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 12_2		STrl	B 7/4	0.80		1.773-1.778	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 13_1		STrl	B 8/1	0.72	3.98	1.767-1.772	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 13_2		STrl	B 8/1	0.51		1.770-1.774	Fingerprint
PhrDkC 14_1		STrl	B 8/3	1.20	3.82	1.762-1.770	Fingerprint
PhrDkC 14_2		STrl	B 8/3	1.18		1.767-1.774	Bubble
PhrDkC 15_1		STrl	Body B 7/4	1.54	3.98	1.762-1.770	Negative crystal
PhrDkC 15_2		STrl	Yrapiche Opa	1.47		1.767-1.774	Negative crystal
PhrDkC 16_1		STp	V 8/2	1.60	3.94	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 16_2		STp	V 8/2	1.07		1.773-1.778	Fingerprint
PhrDkC 17_1		STp	Body vB 4/6	0.85	3.96	1.763-1.771	Rhombohedral parting
PhrDkC 17_2		Trl	Zoning B 6/6	0.90		1.770-1.774	Fingerprint
PhrDkC 18_1		Trl	Body vB 4/3	1.18	3.93	1.763-1.771	Colour zoning
PhrDkC 18_2		Trl	Core gB 8/1	1.03		1.767-1.774	Colour zoning
PhrDkC 19_1		STrl	Body vB 5/3	0.71	3.93	1.760-1.768	Colour zoning
PhrDkC 19_2		STrl	Zoning bV 5/5	0.66		1.773-1.778	Colour zoning
PhrDkC 20_1		STrl	vB 5/3	1.38	3.86	1.760-1.768	Colour zoning
PhrDkC 20_2		STrl	vB 5/3	0.84		1.767-1.774	Colour zoning

รหัสตัวอย่าง		ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrDkC 21_1		STp	Body bV 5/5	0.69	3.82	1.763-1.771	Colour zoning
PhrDkC 21_2		STp	Core B 6/6	0.51		1.770-1.774	Colour zoning, fingerprint
PhrDkC 22_1		STrl	bV 6/5	4.285	3.97	1.768-1.775	Fingerprint
PhrDkC 22_2		STrl	bV 6/5	1.99	3.98	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint

ตารางที่ ข-3 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (PhrZn) จำนวน 2 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง		ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrZn 01_1		STp	Body B 4/6	0.80	4.02	1.762-1.770	Colour zoning
PhrZn 01_2		Tp	Zoning B 6/2	0.73		1.770-1.774	Colour zoning
PhrZn 02_1		Tp	B 6/2	1.35	3.96	1.767-1.773	Colour zoning
PhrZn 02_2		Tp	GB 5/3	0.66		1.770-1.774	Colour zoning

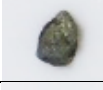
ตารางที่ ข-4 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มแถบสีน้ำเงิน แต่ไม่เด่นชัด (PhrSLZn) จำนวน 2 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	สี	น้ำหนัก ct	SG	1.767-1.774	มลทินภายใน
PhrSLZn 01_1		Tp	B 5/3	0.194	4.04	1.763-1.771	Fingerprint
PhrSLZn 01_2		Tp	yG 2/3	0.204	4.00	1.767-1.774	Fingerprint

ตารางที่ ข-5 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มมีแกนกลางสีขาวขุ่น (PhrWtC) จำนวน 6 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrWtC 01_1		Opa	vB 4/3	1.02	3.97	1.760-1.768	
PhrWtC 01_2		Opa	vB 4/3	1.05		1.773-1.778	
PhrWtC 02_1		Opa	Body vB 3/3	1.30	3.94	1.762-1.770	
PhrWtC 02_2		Opa	V 8/1	1.14		1.768-1.772	
PhrWtC 03_1		Opa	vB 4/3	1.20	3.96	1.768-1.775	
PhrWtC 03_2		Opa	vB 4/3	0.72		1.767-1.774	

ตารางที่ ข-6 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มพลอยมีสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน (PhrPt) จำนวน 16 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง		ความโปร่งแสง	สี	น้ำหนัก ct	SG	R.I.	มลทินภายใน
PhrPt 01_1		STp	yG 2/3	0.164	3.80	1.762-1.770	Fingerprint
PhrPt 01_2		Trl	styG 2/3	0.215	3.91	1.767-1.774	Fingerprint
PhrPt 02_1		Tp	yG 2/3	0.152	4.00	1.762-1.768	Colour zoning, Fingerprint
PhrPt 02_2		STp	yG 2/3	0.132	4.00	1.770-1.774	Fingerprint
PhrPt 03_1		Tp	G 3/1	0.182	4.00	1.762-1.770	Fingerprint
PhrPt 03_2		Tp	G 3/1	0.163	4.18	1.761-1.769	Fingerprint
PhrPt 04_1		Tp	yG 2/3	0.137	3.91	1.764-1.772	Colour zoning, Fingerprint

รหัสตัวอย่าง		ความ โปร่งแสง	สี	น้ำหนัก ct	SG	R.I.	มลทินภายใน
PhrPt 04_2		STp	G 3/1	0.208	4.16	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
PhrPt 05_1		STp	vstgB 2/3	0.484	4.00	1.762-1.769	Fingerprint
PhrPt 05_2		Tp	vslgB 6/3	0.120	4.13	1.773-1.778	Colour zoning, Fingerprint
PhrPt 06_1		Tp	vstgB 3/2	0.152	4.00	1.762-1.770	Fingerprint
PhrPt 06_2		Tp	vstgB 2/3	0.191	4.15	1.773-1.778	Fingerprint
PhrPt 07_1		Trl	Body B 6/2	2.00	3.92	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
PhrPt 07_2		Trl	Trapiche bv 5/4	0.92	3.92	1.773-1.778	Colour zoning, Fingerprint
PhrPt 08_1		STrl	vB 4/3	1.16	3.99	1.762-1.770	Color zoning
PhrPt 08_2		STrl	vB 4/3	0.78	3.99	1.762-1.770	Color zoning

ตารางที่ ข-7 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งอำเภอเด่นชัย จังหวัดแพร่ กลุ่มพลอยมีลักษณะทึบแสง (PhrOp) จำนวน 2 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง		ความใส	สี	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
PhrOp 01_1		Opa	GB 5/3	1.59	3.94	1.762-1.770	
PhrOp 01_2		Opa	vB 5/3	0.85	3.94	1.773-1.778	

ตารางที่ ข-8 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งกาญจนบุรี กลุ่มพลอยมีสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน (KcPt) จำนวน 16 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
KcPt 01_1		STp	gB 2/2	1.12	3.87	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
KcPt 01_2		Trl	gB 2/2	1.53	3.92	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
KcPt 02_1		STp	gB 2/2	1.57	3.92	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
KcPt 02_2		Trl	gB 2/2	1.59	3.97	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
KcPt 03_1		STp	vB 3/3	2.19	3.98	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
KcPt 03_2		STp	vB 3/3	1.92	3.92	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
KcPt 04_1		Trl	B 3/3	3.45	3.97	1.763-1.771	Mineral inclusion
KcPt 04_2		STp	B 3/3	1.77	4.02	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
KcPt 05_1		Trl	gB 2/2	1.25	4.03	1.760-1.768	Fingerprint
KcPt 05_2		Trl	gB 2/2	1.78	3.96	1.770-1.772	Fingerprint
KcPt 06_1		STp	gB 2/2	2.15	3.98	1.760-1.768	Fingerprint
KcPt 06_2		Trl	gB 2/2	1.44	4.00	1.770-1.772	Fingerprint
KcPt 07_1		STp	vslgB 3/3	1.34	3.94	1.763-1.771	Fingerprint
KcPt 07_2		STp	vslgB 3/3	1.18	3.93	1.768-1.775	Fingerprint
KcPt 08_1		Trl	gB 2/2	1.38	3.94	1.760-1.768	Fingerprint
KcPt 08_2		Trl	gB 2/2	1.05	4.04	1.770-1.772	Fingerprint

ตารางที่ ข-9 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งกาญจนบุรี กลุ่มพลอยทึบแสง (KcOp) จำนวน 4 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
KcOp 01_1		Opa	B 8/3	2.46	3.98	1.762-1.770	Parting
KcOp 01_2		Opa	B 8/3	1.39	3.86	1.768-1.775	Colour zoning
KcOp 02_1		Opa	bV 6/4	1.50	3.95	1.768-1.775	Colour zoning
KcOp 02_2		Opa	bV 6/4	1.60	4.00	1.768-1.775	Colour zoning

ตารางที่ ข-10 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งตกรพรม จันทบุรี กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทั่วทั้งเม็ด (TpDkB) จำนวน 22 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpDkB 01_1		Strl	bV 8/3	0.36	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 01_2		Trl	vB 6/5	0.45	4.09	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 02_1		Trl	gB 5/2	0.36	4.00	1.762-1.770	Negative crystal
TpDkB 02_2		Trl	gB 4/3	0.42	3.81	1.760-1.768	Fingerprint
TpDkB 03_1		Strl	B 6/2	0.49	4.08	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 03_2		Strl	B 5/2	0.43	3.91	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 04_1		Trl	bV 6/5	0.50	3.87	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 04_2		Trl	B 6/5	0.74	3.90	1.768-1.775	Fingerprint

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpDkB 05_1		Trl	gB 3/3	0.35	3.87	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 05_2		Trl	vB 6/5	0.55	3.83	1.768-1.775	Colour zoning
TpDkB 06_1		Stp	vB 6/5	0.41	3.87	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 06_2		Stp	B 8/3	0.40	3.93	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 07_1		Opa	vslgB 5/4	0.31	4.10	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 07_2		Opa	vB 4/6	0.39	4.00	1.767-1.770	Negative crystal
TpDkB 08_1		Opa	bV 6/5	0.60	3.88	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 08_2		Opa	bV 6/5	0.50	3.90	1.767-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 09_1		Trl	vB 6/5	0.46	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 09_2		Opa	bV 6/5	0.34	3.87	1.767-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 10_1		Opa	B 8/3	0.21	3.83	1.768-1.775	Mineral inclusion
TpDkB 10_2		Trl	B 8/3	0.47	3.78	1.767-1.770	Fingerprint
TpDkB 11_1		STp	B 5/3	0.63	4.20	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkB 11_2		Trl	vB 4/4	0.63	3.92	1.768-1.775	Colour zoning, fingerprint

ตารางที่ ข-11 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งตกรพรม จันทบุรี กลุ่มแกนกลางสีน้ำเงินเข้ม (TpDkC) จำนวน 6 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	Colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpDkC 01_1		Opa	gB 7/4	2.37	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkC 01_2		Opa	gB 7/4	1.94	3.99	1.760-1.768	Negative crystal
TpDkC 02_1		Trl	B 5/4	0.35	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkC 02_2		STrl	B 5/4	0.35	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpDkC 03_1		Opa	vslgB 5/4	0.63	3.94	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpDkC 03_2		Opa	vB 4/6	0.63	3.94	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint

ตารางที่ ข-12 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งตกรพรม จันทบุรี กลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้ม (TpZn) จำนวน 12 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpZn 01_1		Opa	B 6/6	1.03	4.00	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpZn 01_2		Tp	gB 3/3	2.15	3.99	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpZn 02_1		Trl	gB 3/3	3.45	4.00	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpZn 02_2		STp	G 2/2	3.02	4.02	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpZn 03_1		STp	gB 4/3	1.75	4.01	1.760-1.768	Fingerprint
TpZn 03_2		STp	gB 4/3	1.25	4.01	1.760-1.768	Fingerprint

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpZn 04_1		STp	vslgB 4/4	1.24	4.01	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpZn 04_2		STp	vslgB 4/4	0.97	4.01	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpZn 05_1		Tp	vB 6/4	1.13	3.98	1.763-1.771	Fingerprint
TpZn 05_2		Tp	vB 6/4	0.82	4.00	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpZn 06_1		STp	bV 6/5	0.30	3.99	1.760-1.768	Colour zoning, fingerprint
TpZn 06_2		STrl	bV 7/4	0.41	4.02	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint

ตารางที่ ข-13 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งตกรพรม จันทบุรี กลุ่มแถบสีน้ำเงิน ไม่เด่นชัด (TpSlZn) จำนวน 6 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpSlZn 01_1		Tp	gB 3/3	2.67	4.01	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpSlZn 01_2		Tp	gB 3/3	2.24	3.99	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpSlZn 02_1		STp	vslgB 3/3	3.52	4.01	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpSlZn 02_2		STp	G 2/2	1.00	3.97	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpSlZn 03_1		STp	bV 2/3	0.31	3.97	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpSlZn 03_2		Tp	bV 2/3	0.25	3.98	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint

ตารางที่ ข-14 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งตกรพรม จันทบุรี กลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางส่วน (TpPt) จำนวน 14 ตัวอย่าง

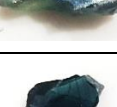
รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
TpPt 01_1		STp	vslgB 3/3	1.01	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpPt 01_2		STp	vslgB 3/3	0.43	4.02	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpPt 02_1		Trl	G 3/3	1.07	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, fingerprint
TpPt 02_2		STp	G 3/3	0.78	4.00	1.768-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpPt 03_1		Trl	B 6/5	0.64	4.00	1.763-1.771	Fingerprint
TpPt 03_2		Trl	B 6/5	0.48	4.00	1.768-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpPt 04_1		STp	yG 3/3	1.02	4.00	1.763-1.771	Colour zoning, fingerprint
TpPt 04_2		STp	yG 3/3	0.52	4.00	1.770-1.772	Colour zoning, fingerprint
TpPt 05_1		STrl	gB 5/5	0.35	3.89	1.760-1.768	Fingerprint
TpPt 05_2		STrl	gB 7/4	0.51	3.92	1.768-1.772	Fingerprint
TpPt 06_1		STp	vB 4/6	0.32	4.00	1.760-1.768	Fingerprint
TpPt 06_2		STrl	vB 4/6	0.31	3.88	1.770-1.772	Fingerprint
TpPt 07_1		Trl	B 2/2	0.52	4.00	1.760-1.768	Fingerprint
TpPt 07_2		Trl	B 4/2	0.95	3.96	1.768-1.772	Fingerprint

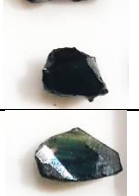
ตารางที่ ข-15 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งบางกะจะ จันทบุรี กลุ่มสีน้ำเงินเข้มทั่วทั้งเม็ด (BkDkB) จำนวน 4 ตัวอย่าง

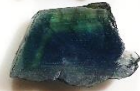
รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkDkB 01_1		STp	B 4/2	1.30	4.06	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkDkB 01_2		STp	vslgB 4/4	0.86	3.91	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkDkB 02_1		Trl	vstgB 8/3	2.5	3.98	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkDkB 02_2		STp	vslgB 3/3	0.85	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint

ตารางที่ ข-16 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งบางกะจะ จันทบุรี กลุ่มแถบสีน้ำเงินเข้มเด่นชัด (BkZn) จำนวน 56 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	Colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkZn 01_1		Tpr	vslgB 4/2	1.17	4.03	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 01_2		Tpr	GB 4/2	1.07	3.96	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 02_1		Tpr	B ¾	0.82	3.90	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 02_2		Tpr	B 3/3	1.06	4.08	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 03_1		Tpr	B 3/3	1.39	3.97	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 03_2		Tpr	GB 4/2	1.28	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 04_1		Tpr	G 3/1	1.58	3.95	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 04_2		Tpr	GB 4/2	0.82	3.90	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 05_1		Trl	bG 3/3	1.23	3.97	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 05_2		Trl	bG 3/3	1.96	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	Colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkZn 06_1		Trl	GB 6/1	2.33	3.98	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 06_2		Trl	GB 7/2	2.08	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 07_1		Trl	G 2/2	0.84	4.00	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 07_2		Trl	vslbG 2/3	1.38	3.94	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 08_1		Trl	G 3/1	0.89	3.87	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 08_2		Trl	vslbG 2/3	0.47	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 09_1		Trl	B 4/6	0.93	4.04	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 09_2		Trl	G 3/1	1.28	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 10_1		Stpr	vslgB 4/2	1.40	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 10_2		Stpr	G 3/1	0.48	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 11_1		Stpr	gB 5/2	2.13	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 11_2		Stpr	gB 5/2	1.87	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 12_1		Stpr	gB 5/2	0.41	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 12_2		Stpr	gB 5/2	1.04	3.96	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 13_1		Trl	gB 5/2	1.20	3.98	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 13_2		Trl	gB 5/2	0.86	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkZn 14_1		Trl	gB 5/2	1.16	3.99	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 14_2		Trl	gB 5/2	0.71	3.97	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 15_1		Trl	vstgB 2/3	0.91	3.97	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 15_2		Trl	vstgB 2/3	1.07	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 16_1		Trl	vstgB 2/3	1.67	3.98	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 16_2		Trl	vstgB 2/3	1.34	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 17_1		Trl	bV 8/3	1.92	4.01	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 17_2		Trl	gB 5/2	1.11	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 18_1		Trl	gB 4/3	1.17	3.99	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 18_2		Trl	gB 4/3	1.30	3.97	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 19_1		Trl	5/3	0.42	3.99	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 19_2		Trl	5/3	0.41	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 20_1		Trl	gB 5/2	0.87	3.98	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 20_2		Trl	gB 5/2	0.45	3.97	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 21_1		Trl	vstgB 2/3	0.59	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 21_2		Trl	vstgB 2/3	0.59	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 22_1		Stpr	vstgB 2/3	3.83	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 22_2		Stpr	vstgB 2/3	1.48	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkZn 23_1		Stpr	vstgB 2/3	0.57	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 23_2		Stpr	vstgB 2/3	0.54	4.01	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 24_1		Stpr	vstgB 2/3	1.52	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 24_2		Stpr	vstgB 2/3	1.47	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 25_1		Trl	gb 5/2	1.93	4.01	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 25_2		Trl	gb 5/2	1.79	4.01	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 26_1		Stpr	vB 7/5	3.48	4.00	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 26_2		Stpr	B 4/5	2.81	4.01	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 27_1		Stpr	vB 6/5	15.27	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 27_2		Stpr	vB 6/4	7.89	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 28_1		Trl	vstgB 7/2	9.06	3.99	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint
BkZn 28_2		Trl	vslbG 2/3	5.26	3.98	1.768-1.775	Colour zoning, Fingerprint

ตารางที่ ข-17 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งบางกะจะ จันทบุรี กลุ่มแถบสีน้ำเงิน ไม่เด่นชัด (BkSlZn) จำนวน 16 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkSlZn 01_1		Stpr	B 3/3	1.07	3.96	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 01_2		Stpr	GB 4/2	1.35	3.97	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 02_1		Stpr	B 3/3	1.04	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 02_2		Stpr	G 3/1	0.84	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 03_1		Stpr	G 2/2	1.11	3.99	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 03_2		Stpr	bG 2/3	1.27	3.96	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 04_1		Stpr	vslbG 2/3	1.53	3.92	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 04_2		Stpr	G 2/2	1.19	3.97	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 05_1		Stpr	vslgB 3/3	0.52	3.97	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 05_2		Stpr	bG 2/3	0.48	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 06_1		Stpr	vstgB 2/3	0.71	3.99	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 06_2		Stpr	vstgB 2/3	0.81	4.00	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 07_1		Stpr	gB 4/3	0.88	3.96	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 07_2		Stpr	gB 4/3	1.15	3.99	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 08_1		Trl	yG 2/3	7.80	4.00	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkSlZn 08_2		Trl	yG 3/3	8.39	4.06	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint

ตารางที่ ข-18 ข้อมูล ความโปร่งแสง สี น้ำหนัก ค่า ถ.พ. ค่าดัชนีหักเห และมลทินภายในของตัวอย่างแซฟไฟร์จากแหล่งบางกะจะ จันทบุรี กลุ่มสีไม่สม่ำเสมอ มีหย่อมสีน้ำเงินบางแห่ง (BkPt) จำนวน 8 ตัวอย่าง

รหัสตัวอย่าง	รูปแสดง	ความใส	colour	น้ำหนัก ct	SG	RI	มลทิน
BkPt 01_1		Stpr	B 4/2	0.54	3.86	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 01_2		Stpr	B4/2	1.07	4.11	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 02_1		Stpr	bG 3/3	1.17	4.03	1.762-1.770	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 02_2		Stpr	G 2/2	1.08	4.00	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 03_1		Stpr	bG 2/3	0.57	4.07	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 03_2		Stpr	vslgB 4/2	0.46	3.95	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 04_1		Trl	gB 3/3	0.84	4.00	1.763-1.771	Colour zoning, Fingerprint
BkPt 04_2		Trl	gB 3/3	1.06	3.97	1.760-1.768	Colour zoning, Fingerprint