



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว
สำหรับทดแทนอัญมณีคล้ายเพชรโดยใช้เทคนิคลำไอออน

The modification of natural white sapphire
for diamond substitute by ion beam techniques

โดย ดร. ดวงแข บุตรกุล และคณะ

ธันวาคม 2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว
สำหรับทดแทนอัญมณีคล้ายเพชรโดยใช้เทคนิคลำไออน

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ดวงแข บุตกรกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2. เสวต อินทศิริ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. ภูวดล วรรณะชัยแสง	มหาวิทยาลัยบูรพา
4. อุดมรัตน์ ทิพวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
5. นายสุธี กุลเมธา	เจ้าของกิจการอัญมณี

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 นายชัยพัฒน์ แผง เกษร และ นางสาวธัญพร เต็งชัยศรี สำหรับการช่วยบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลพลอยคอร์ันดัม ขอขอบคุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 จากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และจาก ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ขอขอบคุณ ผู้ประกอบการด้านการนำเข้าส่งออกพลอย การปรับปรุงคุณภาพพลอย ผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับทุกท่าน ที่กรุณาให้ข้อมูลสำหรับแนวทางการปรับปรุงคุณสมบัติและให้ความสนใจเทคโนโลยีลำอนุภาคเพื่อเพิ่มมูลค่าและปรับปรุงสมบัติพลอยธรรมชาติ

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัย ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ สำนักงานคณะกรรมการสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับงบประมาณสนับสนุนในการดำเนินงานโครงการวิจัย

คณะผู้วิจัย

ธันวาคม 2558

แบบสรุปผู้บริหาร [Executive Summary]

1. รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการ

1.1 ชื่อเรื่อง การปรับปรุงคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีขาวสำหรับทดแทนอัญมณีคล้ายเพชร โดยใช้เทคนิคลำไอออน

1.2 รายชื่อคณะทำงาน

ที่ปรึกษาโครงการ	รศ. ดร. อธิวัฒน์ บุญญวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
หัวหน้าโครงการ	อ. ดร. ดวงแข บุตรกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ร่วมโครงการ	ดร. เสวต อินทศิริ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
	อ. ดร. ภูวดล วรรณะชัยแสง	มหาวิทยาลัยบูรพา
	ผศ. ดร. อุดมรัตน์ ทิพวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

หน่วยงานที่เสนอโครงการ

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขา อัญมณีและเครื่องประดับ

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

114 ถ.สุขุมวิท ซอย 23 เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

โทรศัพท์ 02-664100 ต่อ 18652 โทรสาร 02-2681068

ผู้ประกอบการร่วมวิจัย นายสุธี กุลเมธา เจ้าของกิจการอัญมณี

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำโครงการ

ได้รับงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 รวมงบประมาณทั้งสิ้น 1,597,820.- บาท

[งบประมาณที่ได้รับจาก สกว. 1,337,820.- บาท และงบประมาณจากผู้ร่วมให้ทุน 260,000.- บาท]

ระยะเวลาดำเนินการ ตั้งแต่ กันยายน 2557 ถึง ตุลาคม 2558

2. สรุปโครงการ

เพชรธรรมชาติเป็นอัญมณีที่ตลาดอัญมณีและเครื่องประดับมีความต้องการเป็นอย่างมาก รวมถึงตลาดการค้าเพชรและเครื่องประดับเพชรมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเร็วมาก คุณภาพเพชรตามมาตรฐานสากลสีที่ดีที่สุดคือไม่มีสี (colorless) นอกจากนั้นจะจัดเป็นเพชรแฟนซี (Fancy Colored Diamond) กลุ่มเพชรที่มีคุณภาพดีราคาแพงเป็นกลุ่มสีขาวมาก (Very White) แต่มีราคาสูงเกินไป ดังนั้นเพชรที่ขายดีและได้รับความนิยมมากในตลาดจีนจึงเป็นเกรดขาว (White) ทำให้ในปัจจุบันมีปัญหาเรื่องวัสดุหายากมากขึ้นและราคาสูง โดยเฉพาะเพชรขนาดใหญ่ (จำนวนกะรัตมาก) สี สะอาด ไร้มลทิน อย่างไรก็ตามมีการนำวัสดุอื่นมาใช้ทดแทนเพชรธรรมชาติ เช่น พลอยสังเคราะห์ คิวบิกเซอร์เนีย Cubic Zirconia (ZrO_2) มอยส์ซาไนส์ แก้วเซรามิก อีกกลุ่มคือพลอยธรรมชาติสีขาว เช่น โทพาซ เซอร์คอน สปิเนล เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของตลาดอัญมณีและเครื่องประดับ และที่กำลังนิยมมากที่สุดในขณะนี้คือ พลอยเนื้อแข็งในตระกูลคอร์รันดัม ประเภทไร้สี (Colorless) เรียกว่าพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีขาว (natural white sapphire) แต่คุณภาพตามที่ต้องการ เช่น เนื้อแก้วใส ไม่มีมลทิน ไม่มีสีตลอดทั้งเม็ด มักจะเป็นพลอยที่มีขนาดเล็ก และพบได้น้อย ทำให้ราคาสูง ที่พบมากส่วนใหญ่จะเป็นพลอยขนาดใหญ่ มีมลทินมากเนื้อขุ่น ค่อนข้างทึบ ราคาถูกกว่าแม้ว่าขนาดใหญ่ ทำให้ในตลาดอัญมณี ยังจำเป็นต้องซื้อพลอยแซฟไฟร์สีขาวขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ เพราะน้ำหนัก เนื้อสวยกว่า

ดังนั้นหากการนำพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติขนาดใหญ่มาทดแทนเพชรธรรมชาติ จำเป็นต้องใช้พลอยที่มีเกรดชั้นดีนั้นจะหายากมากทีเดียว หรือต้องผ่านขั้นตอนกระบวนการปรับปรุงพลอยด้วยเทคนิคต่างๆ การเผาอุณหภูมิสูงแล้วให้พลอยเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อให้พลอยมีเนื้อใส สะอาด แต่ปัญหาที่พบคือพลอยจะแตกร้าว เกิดความสูญเสียมาก แต่พลอยแซฟไฟร์สีขาว (white sapphire) มีความน่าสนใจเพื่อใช้เป็นอัญมณีแทนการใช้เพชร เนื่องจากเป็นพลอยในตระกูล corundum มีความแข็งสูงเป็น 9 ตามสเกลของโมห์รองจากความแข็งเพชรเท่านั้น จึงเหมาะสมที่จะนำมาทำเครื่องประดับ เพราะโอกาสที่จะถูกขีดขีดให้ขุ่นมัวมีน้อย มีประกายแวววาวจากดัชนีหักเหสูง เมื่อผ่านการเจียรไนและตกแต่งเป็นเครื่องประดับจะมีคุณค่าสูงมาก หากสามารถลดมลทินในพลอยหรือเพิ่มความสะอาด (clarity) สภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันเป็นดังนี้

○ ในกลุ่มพลอยสีซีดจางมาก (near colorless) ส่วนใหญ่จะกึ่งโปร่งแสง แต่การกระจายตัวของสีไม่สม่ำเสมอ มีมลทินชนิดเส้นเข็ม และกลุ่มแร่สีดำ หรือสีน้ำตาล พลอยตัวอย่างขนาด 5-8 มิลลิเมตร จากแหล่งอำเภอเด่นชัยจังหวัดแพร่ เวียดนาม ศรีลังกา ดิโอมากากัสการ์ หลังการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันร่วมกับการอบอ่อน 150 องศา พบว่าจะเพิ่มการส่องผ่านให้กับพลอยมากขึ้นร้อยละ 30-40 เป็นผลจากพลังงานไอออนที่มีความเร็วสูงและความร้อนที่เกิดขึ้นทำให้มีผลต่อการสลายอินคลูชันขนาดเล็ก (micro inclusions) ซึ่งมักเกิดร่วมกับธาตุเหล็กและไทเทเนียม ทำให้สามารถพบแร่มลทินที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ในเนื้อพลอยคอร์ันดัม เช่น แร่อีลิมนต์ (Ilmenite; FeTiO_3) แร่รูไทต์ (Rutile; TiO_2) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) แร่ไดแอสปอร์ (Diaspore; AlOOH) เป็นต้น โดยมีมลทินขนาดเล็กเหล่านี้จะส่งผลให้พลอยมีลักษณะขุ่นมัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมลทินและขนาดของมลทินด้วย เมื่อมีการยิงลำไอออนสู่พลอยคอร์ันดัมที่มีมลทินขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรในเนื้อพลอย มลทินขนาดเล็กเหล่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์ันดัมในรูปของ $\text{Fe:Al}_2\text{O}_3$ และ $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ ทำให้มลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยแปรสภาพไปโดยอาจมีขนาดที่เล็กลงหรืออาจแพร่หายไปไนโครงสร้างได้ ส่งผลให้พลอยคอร์ันดัมมีความสะอาดเพิ่มขึ้นหลังการยิงพลอยคอร์ันดัมด้วยไอออน อีกทั้งมีผลต่อธาตุเจือปนพลอยโดยตรง เนื่องจากยังคงมีปริมาณธาตุที่ให้สีเจือปนซึ่งแม้มีปริมาณน้อยในโครงสร้างสอดคล้องกับการวัดด้วยเทคนิค PIXE และ EDXRF สีน้ำเงินเข้มขึ้นในพลอยสีฟ้าอ่อน เนื่องจากมีไอออนของธาตุเหล็ก (Fe^{2+}) และ ไทเทเนียม (Ti^{4+}) หรือสีเขียวจากเหล็ก (Fe^{3+}) และ ธาตุแกลเลียม (Ga^{3+}) พลังงานที่เหมาะสมกับพลอยทำให้เกิดการออกซิเดชันและรีดักชันในธาตุให้สี จึงมีผลต่อสีที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง เช่น ไนโตรเจนไอออนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนประจุของเหล็กจาก Fe^{3+} ไปเป็น Fe^{2+} ในทางกลับกัน เมื่อใช้ไอออนออกซิเจนสำหรับพลอยที่มีเหล็กเป็นธาตุให้สี อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจาก Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ได้ และทำให้มีการเปลี่ยนสีของพลอยเกิดขึ้น ดังนั้นจึงมีความสัมพันธ์กับการปรับปรุงคุณภาพแซฟไฟร์ด้วยเทคนิคการฝังไอออนซึ่งสีเกิดจากอิทธิพลจากเหล็ก โดยสาเหตุการเกิดสีน้ำเงินเกิดจาก Intervalence charge transfer ของ $\text{Fe}^{2+} - \text{Ti}^{4+}$ และ $\text{Fe}^{2+} - \text{Fe}^{3+}$ การฝังไอออนซึ่งมีโอกาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของ oxidation state ของเหล็กในแซฟไฟร์กลุ่มที่มีสีฟ้าและสีเขียว แต่โดยปกติคอร์ันดัมมักมีธาตุร่องรอยเจือปนอยู่ ซึ่งธาตุให้สีในพลอยคอร์ันดัมประกอบด้วยธาตุโครเมียม ธาตุเหล็ก และธาตุไทเทเนียม เป็นหลัก อาจมีธาตุแมกนีเซียม วาเนเดียม และเบริลเลียมปะปนอยู่ได้ โดยธาตุเหล่านี้จะไปแทนที่ตำแหน่งของอลูมิเนียมซึ่งเป็นแคตไอออนในองค์ประกอบเคมีหลักของคอร์ันดัม การแทนที่ของธาตุร่องรอยส่งผลให้มีข้อบกพร่องทางโครงสร้างของคอร์ันดัมทำให้เกิดการดูดกลืนแสงขึ้น โดยธาตุแต่ละชนิดซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ต่างกัน จะส่งผลให้เกิดความบกพร่องทางโครงสร้างที่ต่างกัน การดูดกลืนแสงที่ได้จึงต่างกันไปด้วยซึ่งในการทดลองจะพบว่าจะมีผลต่อการให้สีเหลืองที่มีสาเหตุมาจากข้อบกพร่องทางโครงสร้าง (color center)

○ ในกลุ่มพลอยตัวอย่างไร้สี (colorless) ในกลุ่มนี้พบว่าเมื่อตรวจสอบปริมาณธาตุต่างๆ พบว่าจะไม่มีธาตุร่องรอยอยู่ในองค์ประกอบของพลอยจึงไม่มีสี เมื่อแยกกลุ่มพลอยตามลักษณะมลทิน สำหรับกลุ่มที่มีมลทินเป็นผลึกแร่ขนาดใหญ่ เช่น เฟลด์สปาร์ รูไทน์ เซอร์คอน พบว่าไม่สามารถสลایมลทินกลุ่มนี้ได้ เช่น ในแหล่งพลอยมาบิล่าประเทศไนจีเรียได้ ส่วนแหล่งพลอยที่มีมลทินขนาดเล็ก มีความเหมาะสมกับการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันร่วมกับการอบอ่อน 150 องศา คือ แหล่งจากจังหวัดแพร่ พลอย gueda จากศรีลังกา และแหล่งพลอยเวียดนาม ที่มีมลทินขนาดเล็ก เช่น minute particle ที่สามารถพบได้ทั่วไปในพลอยคอร์ันดัมธรรมชาติ สามารถเปลี่ยนพลอยที่มีสมบัติการส่องผ่านของแสง จากกึ่งโปร่งแสงจนถึงทึบแสง ให้มีความใส สะอาด ลดความขุ่นมัว เพิ่มการส่องผ่านของแสงให้กับพลอยมากขึ้นร้อยละ 40-60 หลังการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำไปเจียรระโนแล้วทำให้มีความสดใส แวววาวมากขึ้น ในการทดลองนำไปขึ้นรูปด้วยการหล่อพร้อมฝัง ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดขั้นตอนการ “ฝังพลอย” ให้มีความง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากกระบวนการฝังพร้อมหล่อนั้นเป็นกระบวนการฝังพลอยลงในเทียน ซึ่งมีความสะดวกและง่ายกว่าการฝังพลอยลงในโลหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากเทียนมีความยืดหยุ่นและความอ่อนนุ่มสูงกว่าโลหะมาก โดยเฉพาะในแบบที่มีความซับซ้อน ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือระดับสูงในขั้นตอนนี้ และสามารถฝังพลอยได้เร็วขึ้นกว่าการฝังพลอยในโลหะเป็นอย่างมาก อีกทั้งลดต้นทุนเมื่อเทียบกับการหล่อโลหะแล้วจึงฝังพลอยในการขึ้นรูปปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการหล่อพร้อมฝังจะต้องใช้อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ทำให้พลอยมักเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายและสูญเสียพลอย เนื่องจากพลอยอาจมีรอยแตกเนื่องจากความร้อนได้ นอกจากนั้น ยังไม่สามารถทำได้กับพลอยทุกชนิด ในขั้นตอนนี้ได้ทดสอบการหล่อพร้อมฝังของพลอยจากแหล่งอำเภอเด่นชัยจังหวัดแพร่ พบว่า หลังหล่อพร้อมฝัง สีของพลอยไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำไปสู่กระบวนการผลิตเป็นเครื่องประดับ เช่น การชุบ การล้างด้วยสารเคมี สีพลอยจะคงเดิม สรุปได้ว่าพลอยหลังไอออนอิมพลานเตชันจะไม่เกิดการแตกร้าวเสียหายเมื่อนำมาหล่อพร้อมฝังและการขึ้นรูปในแบบต่างๆ

3. การประเมินผลความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัย

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

หากพิจารณาในด้านของมูลค่าพลอย โดยคิดแยกกลุ่มน้ำหนักและแหล่งพลอย ใช้ต้นทุนราคาพลอยรวมกับค่าเช่าเหมาใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์วันละ 8,500 บาท เทียบกับมูลค่าพลอยหลังทดลอง โดยที่การยิงพลอยขนาด 3-5 กะรัต จะยิงได้ประมาณวันละ 80-100 เม็ด หากสามารถเพิ่มมูลค่าพลอยได้ 3 เท่าขึ้นไป หรือราคาส่วนต่างของพลอยเทียบกับพลอยตั้งต้นควรเพิ่มขึ้นกะรัตละ 50 บาทขึ้นไป จึงจะคุ้มค่าการลงทุน

(ข) มูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ (non-use value)

หากพิจารณามูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ เช่น มูลค่าจากการศึกษาพัฒนานักวิจัย การศึกษาสมบัติเชิงแสงของวัสดุ มูลค่าจากการสร้างเทคโนโลยีใหม่ รวมทั้งมูลค่าจากการสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะพบว่ามีมูลค่าสูงจนไม่อาจประเมินได้ เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ไม่ได้ก่อให้เกิดมลพิษหรือสารตกค้างในพลอยไม่มีอันตรายต่อผู้ใช้งาน และประยุกต์ใช้กับการศึกษาสมบัติเชิงแสงของวัสดุพลอยชนิดอื่นด้วย จึงน่าจะได้รับการศึกษาและพัฒนาต่อไป

(ค) มูลค่าเผื่อที่จะใช้ประโยชน์ (option value)

เป็นมูลค่าของการเป็นทางเลือกของผู้ประกอบการ หากพลอยที่มีมลทินหรือข้อบกพร่องที่ไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพแบบอื่นได้หรือจะเก็บไว้ใช้ในอนาคต ในความเป็นจริงมีพลอยเป็นจำนวนมากที่ผู้ประกอบการเก็บไว้ เนื่องจากคุณภาพยังไม่พอที่จะทำเป็นเครื่องประดับได้โดยตรง ซึ่งหากไม่มีทางเลือกอื่น และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ผู้ประกอบการย่อมเลือกที่จะเข้าสู่เทคโนโลยีใหม่มากกว่าการเก็บไว้ต่อไป

บทคัดย่อ

แม้ว่าพลอยคอร์นดัมจะถูกขุดพบตามแหล่งใหม่ๆ ในโลกอยู่เสมอ แต่พลอยที่ถูกพบจากแหล่งใหม่ รวมกับจากแหล่งเดิมๆ ที่ถูกขุดพบใหม่ ยังคงไม่พอเพียงต่อความต้องการของผู้ใช้ อันเนื่องมาจากแหล่งของพลอยที่ได้รับการยอมรับว่ามีพลอยคุณภาพดีมีจำนวนจำกัด พลอยจากแหล่งใหม่ๆ มักมีคุณภาพต่ำ มนุษย์จึงหาวิธีที่จะปรับปรุงคุณภาพพลอยเหล่านี้ให้สวยงาม เหมาะสมกับความต้องการของตลาด การเผาพลอยเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด ซึ่งทำให้สีของคอร์นดัมดีขึ้นและอยู่คงทนถาวร แต่การเผาจะทำให้พลอยเปลี่ยนแปลงสภาพ มีร่องรอยการเปลี่ยนแปลงจากผลของความร้อนสูง สามารถบอกได้จากลักษณะการเปลี่ยนแปลงของมลทินภายในพลอย นอกจากนั้น 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

พลอยคอร์นดัมธรรมชาติที่ปราศจากธาตุเจือปนที่มีส่วนทำให้เกิดสี ผู้ประกอบการเรียกว่าพลอยขาว สามารถขุดพบได้ในทุกแหล่งที่ขุดพบพลอยคอร์นดัมสีอื่นๆ แต่คุณภาพตามที่ต้องการเพื่อทดแทนเพชร ต้องเป็นเนื้อแก้ว โปร่งใส และเข้าข่ายไม่มีสี ถือเป็นพลอยคอร์นดัมที่บริสุทธิ์ที่สุด และหายากที่สุด เพราะพลอยในตระกูลคอร์นดัมมีความแข็งสูง 9 ตามสเกลของโมห์ โอกาสที่จะถูกขุดขีดให้ขุนมัวมีน้อย มีประกายแวววาวจากค่าดัชนีหักเหสูง เมื่อผ่านการเจียรระไนและตกแต่งเป็นเครื่องประดับจะมีมูลค่าสูงมาก แต่ที่พบมักจะเป็นพลอยที่มีขนาดเล็ก และพบได้น้อยทำให้ราคาสูง หรือที่พบมากขนาดใหญ่ จะมีมลทินมาก เนื้อขุ่น ค่อนข้างทึบ ราคาถูกกว่า ทำให้ในตลาดอัญมณียังต้องการซื้อพลอยแซฟไฟร์สีขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ เพราะน้ำสวยกว่า เหมาะสมที่ใช้ทดแทนเพชร งานวิจัยนี้ จึงเป็นการพัฒนาคุณภาพพลอยคอร์นดัมขนาด 2 กะรัตขึ้นไป จากกลุ่มไม่มีเชื้อสี หรือพลอยสีจาง เนื้อขุ่น และปริมาณธาตุเจือปนน้อย ซึ่งไม่สามารถเพิ่มสีโดยขบวนการทางความร้อนได้ ผู้ประกอบการมักจะคัดแยกออกจำหน่ายในราคาต่อกะรัตถูกกว่าพลอยที่มีเชื้อสีมาก จากแหล่งต่างๆ เช่น ศรีลังกา พม่า ไทย โดยใช้เทคนิคลำไอออน ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน โดยระบบเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดิม ขนาด 1.7 MV เพื่อศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ความขุ่นที่มาจากธาตุมลทินต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้พลอยมีคุณภาพต่ำ และใช้เทคนิคการยิงฝังพลอยด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ชนิดคอมแพ็ค และการอบอ่อน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย เช่น เพิ่มความใส สะอาด และมีประกาย ด้วยการสลายสารมลทิน โดยไม่เกิดการทำลายเนื้อพลอย พลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพได้นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์การดูดกลืนแสง เทคนิครามาน จนได้ข้อสรุปทางวิทยาศาสตร์ถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการยิงฝังด้วยไอออน

ท้ายที่สุด โครงการนี้ ได้แสดงแนวคิดหนึ่งในการใช้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น ผลิตสินค้านำสำหรับนิชมาร์เก็ตเพื่อใช้เป็นของขวัญหรือของรางวัลที่มีความงดงามเชิงศิลป์ พร้อมกับคู่มือราคาเพราะประดับด้วยพลอยธรรมชาติจำนวนมาก โดยใช้พลอยธรรมชาติคุณภาพต่ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน ไปประดับบนชิ้นงานประติมากรรม ด้วยเทคนิคที่คิดค้นขึ้นมาใหม่ เรียกว่า การหล่อพร้อมฝัง

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.

For white sapphire, the closer corundum comes to having no color, the more valuable it is as a colorless sapphire. It is purest form as very rare. Traces of extremely light gray, yellow, brown, and blue are common, and reduce the value. Colorless sapphires have been popular as small accent stones for diamond replacement in jewelry. The present study aims to improve the quality of dull-white sapphire and sapphire with light blue with very low quantity of trace element, from Sri Lanka, Myanmar and Thailand by ion beam technology for diamond replacement. Evidently the dull-white sapphire became transparency after ion beam treatment and the sample surface was also harder. Optical analysis using microscope, chemical analysis using PIXE and EDXRF, and absorption analysis using UV-NIR spectroscopy were applied for characterization. Conclusion have been drawn from those measurements.

Finally, the treated blue sapphires have been tested for decoration of the in-house sculpture casted by high temperature method. It is demonstrated that the invent technology was able to serve for the production of jewelry in the niche market.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
แบบสรุบบุคลากร	ง
บทคัดย่อ	ช
Abstract	ช
สารบัญ	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
สารบัญตาราง	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 พลอยคอร์ันดัม	3
2.2 เทคโนโลยีลำไอออนกับการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์ันดัม	6
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	11
3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ	11
3.1.1 การเก็บรวบรวมพลอยตัวอย่าง	11
3.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีอ่อน	13
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	13
3.2.1 เทคนิค PIXE	13
3.2.2 เทคนิค EDXRF	14
3.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงและลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม	15
3.3.1 เทคนิค FTIR	15
3.3.2 เทคนิค UV-VIS-NIR	17
3.3.3 การวัดสีพลอยด้วยเครื่องมือเชิงแสง	19
3.4 การศึกษาชนิด มลทินแร่ มลทินของไหลต่างๆภายในพลอย	20
3.4.1 เทคนิค Raman	20
3.5 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน	21
3.6 การทดลองอบอ่อน	22
3.7 การทดลองออกซิเจนพลาสมา	23
3.8 การทดลองออกซิเจนพลาสมาอบอ่อน	24
3.9 การทดลองขึ้นรูปหล่อพร้อมฝัง	24
3.10 การขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับต้นแบบ	26
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	27

	หน้า
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ	27
4.1.1 ลักษณะพลอยพื้นฐาน	27
4.1.2 นิสัยรูปผลึก	30
4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี	31
4.2.1 การตรวจวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค PIXE	31
4.2.2 การตรวจวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)	32
4.3 ศึกษารวบรวมลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม	39
4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR Spectroscopy	39
4.4 รวบรวมชนิด มลทินแร่ มลทินต่างๆ	60
4.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง Raman Spectroscopy	62
4.5 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน	63
4.6 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันแล้วทดลองอบอ่อน	65
4.7 การปรับปรุงคุณภาพผิวของพลอยแซปไฟร์สีขาวด้วยเทคนิคไอออนอบอ่อน	72
4.8 ขั้นตอนการทำตัวเรือนเครื่องประดับ	83
4.8.1 การออกแบบเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Jew Cad	84
4.8.2 การขึ้นรูปแกนโดยใช้เครื่อง Computer Numerical Control (CNC)	84
4.8.3 การขึ้นรูปเครื่องประดับโดยการหล่อด้วยโลหะทองเหลือง	85
4.8.4 นำตัวเรือนโลหะทองเหลืองไปชุบทอง	86
บทที่ 5 สรุปผล	87
5.1 อภิปรายและวิจารณ์ผล	87
5.2 การปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันอบอ่อน	88
5.3 ข้อเสนอแนะ	88

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคอร์ันดัมและตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออน (ก) มองด้านข้าง (ข) มองด้านบน	3
รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure	4
รูปที่ 2.3 เครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าแรง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์และแผ่นวาง พลอย	7
รูปที่ 2.4 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับงานพลอย โดยที่รูปด้านขวาแสดงการติดตั้งพลอย	7
รูปที่ 2.5 เครื่องเร่งอนุภาคแทนเต็มขนาดศักย์ไฟฟ้าแรง 1.7 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่รูปด้านขวา แสดงการติดตั้งพลอย และการเรียงแสงของพลอยเมื่อถูกยิงด้วยไอออน	8
รูปที่ 2.6 แชนพไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันที่โดสค่าต่างๆ มีสีใสเพิ่มมากขึ้นตามค่าโดสที่ เพิ่มขึ้น (ลูกศรชี้) เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ไอออนอิมพลานเตชัน (เม็ดขาวสุด)	8
รูปที่ 2.7 ทับทิมก่อนยิงด้วยไอออน(ซ้าย)และหลังยิง(ขวา) มีการลดลงของ microinclusion ในเนื้อ พลอย	8
รูปที่ 2.8 จากซ้ายไปขวา พลอยจากศรีลังกา ก่อนการทดลองมีสีขาวขุ่น มลทินสีดำกระจายภายในเนื้อ พลอยหลังไอออนอิมพลานเตชัน จะมีลักษณะโปร่งใส แวววาว ทำให้เพิ่มมูลค่าขึ้นได้อีก นอกจากนั้นหลังการเจียรไนสามารถใช้เป็นเครื่องประดับทางเลือกทดแทนเพชรที่มีราคาสูง กว่ามากได้	9
รูปที่ 2.9 พลอยจากศรีลังกา ก่อนการทดลองมีสีขาวขุ่น มลทินสีดำกระจายภายในเนื้อพลอย หลัง ไอออน อิมพลานเตชัน จะมีลักษณะ ใส แวววาว ทำให้เพิ่มมูลค่าขึ้นได้อีก นอกจากนั้น หลังการ เจียรไน สามารถใช้เป็นเครื่องประดับทางเลือกทดแทนเพชรที่มีราคาสูงกว่ามากได้	10
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างพลอยที่ใช้ทดลอง จาก 5 แหล่ง ก-ฉ	12
รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 1.7 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ (ข) อุ วิเคราะห์ (analysis chamber)	13
รูปที่ 3.3 สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข PA30	14
รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบ X-ray spectrometer (DX 95, บริษัทฟิลิปส์)	15
รูปที่ 3.5 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)	15
รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy	16
รูปที่ 3.7 เครื่อง FT-IR Spectroscopy	17
รูปที่ 3.8 เครื่องมือ UV-VIS-NIR spectrophotometer	18
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมเครื่องมือ UV-VIS-NIR spectrophotometer	18
รูปที่ 3.10 Optical Spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics นำมาดัดแปลงเพื่อใช้วัดสี (colorimeter) ของพลอยโดยตรง	19

รูปที่ 3.11 การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)	19
รูปที่ 3.12 กราฟ Absorbance และ Chromaticity diagram ของพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่	20
รูปที่ 3.13 เครื่อง Raman spectroscopy	21
รูปที่ 3.14 สเปกตรัมรามานของแซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข PA30	21
รูปที่ 3.15 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดและที่วางตัวอย่างพลอยตัวอย่าง	22
รูปที่ 3.16 เตาเผาขนาดเล็กอุณหภูมิสูงสุด 1,000 °C พัฒนาสำหรับนำมาอบพลอยที่อุณหภูมิต่ำ	23
รูปที่ 3.17 Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร	23
รูปที่ 3.18 เครื่องพลาสติกอบอ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	24
รูปที่ 3.19 ไดอะแกรมเครื่องพลาสติกอบอ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	24
รูปที่ 3.20 (ก) Investment mixer (ข) Furnace or Burnout oven (ค) Vacuum Pressure Casting Machine	25
รูปที่ 3.21 (ก) การนำชิ้นงานติดบนต้นเทียน (ข) ชิ้นงานหล่อเสร็จแล้ว	26
รูปที่ 4.1 ลักษณะพลอยตัวอย่างแหล่งกิวดา ศรีลังกาผ่านการให้ความร้อนสูงและลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว	27
รูปที่ 4.2 ลักษณะพลอยตัวอย่าง จากแหล่งกิวดา ศรีลังกา	27
รูปที่ 4.3 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งดิเอโก มาดากัสการ์ (ถ่ายภาพ	28
รูปที่ 4.4 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งประเทศเวียดนาม	28
รูปที่ 4.5 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งเด่นชัยประเทศไทย	28
รูปที่ 4.6 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งมาบิล่าประเทศไนจีเรีย	29
รูปที่ 4.7 แสดงแนวแกนแสงของพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติ	29
รูปที่ 4.8 พลอยแซฟไฟร์ดิบสีฟ้าอ่อนจากแหล่งอำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่ ตัวอย่างพลอยรหัส PRA03 หลังจากเจียรไนเปิดหน้าแล้ว นำมาบันทึกภาพทั้ง (ก) ด้านหน้าและ (ข) ด้านหลัง ถ่ายโดยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายต่ำ (10x)	30
รูปที่ 4.9 ลักษณะนิสัยรูปลึกของพลอยตัวอย่างจากแหล่งดิเอโก มาดากัสการ์	30
รูปที่ 4.10 ลักษณะพลอยตัวอย่างส่วนใหญ่จากแหล่งประเทศเวียดนาม	30
รูปที่ 4.11 ที่วางพลอยสำหรับวัดธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค PIXE	31
รูปที่ 4.12 สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนจากศรีลังกา SLB02	31
รูปที่ 4.13 ตัวอย่างพลอย MDB01จากแหล่งดิเอโก มาดากัสการ์	32
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDB03 จากแหล่งดิเอโก มาดากัสการ์	33
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDA04 จากแหล่งดิเอโก มาดากัสการ์	34
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไร้สีที่นำมาเจียรไนเปิดหน้า สำหรับนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางแสง	39
รูปที่ 4.17 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 1_0 จากแหล่งศรีลังกา	40
รูปที่ 4.18 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 2_0 จากแหล่งศรีลังกา	40

รูปที่ 4.19 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 3_0 จากแหล่งศรีลังกา	41
รูปที่ 4.20 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 4_0 จากแหล่งศรีลังกา	41
รูปที่ 4.21 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 5_0 จากแหล่งศรีลังกา	42
รูปที่ 4.22 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 6_0 จากแหล่งศรีลังกา	42
รูปที่ 4.23 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 1_0 จากแหล่งศรีลังกา	43
รูปที่ 4.24 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 2_0 จากแหล่งศรีลังกา	43
รูปที่ 4.25 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 3_0 จากแหล่งศรีลังกา	44
รูปที่ 4.26 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 4_0 จากแหล่งศรีลังกา	44
รูปที่ 4.27 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 5_0 จากแหล่งศรีลังกา	45
รูปที่ 4.28 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 6_0 จากแหล่งศรีลังกา	45
รูปที่ 4.29 UV-VIS–NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 7_0 จากแหล่งศรีลังกา	46
รูปที่ 4.30 ลักษณะมลทินชนิด มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ดำหนิขนนก (feather) และมลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา	60
รูปที่ 4.31 ลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ดำหนิขนนก (feather) และมลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอย แซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน จากแหล่งมาดากัสการ์	61
รูปที่ 4.32 ลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ดำหนิขนนก (feather) มลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์ สีอ่อนและแถบสี (color zoning) จากแหล่งเวียตนาม	61
รูปที่ 4.33 พลอยแหล่งมาบิล่า ประเทศไนจีเรีย แสดงลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ดำหนิขนนก (feather) มลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อน แถบสี (color zoning) และ ผลึกแร่ต่างๆ	62
รูปที่ 4.34 กราฟจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy	63

รูปที่ 4.35 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบคอมแพคพร้อมระบบบ่ออ่อนและที่วางพลอย (sample holder)	73
รูปที่ 4.36 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน ตัวอย่างศรีลังกา Gueda01	73
รูปที่ 4.37 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน ตัวอย่างศรีลังกา Gueda01	74
รูปที่ 4.38 พลอยตัวอย่าง Gueda01 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบ่ออ่อน	74
รูปที่ 4.39 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda01 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุน	75
รูปที่ 4.40 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จาก แหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda02	75
รูปที่ 4.41 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda02	76
รูปที่ 4.42 พลอยตัวอย่าง Gueda02 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบ่ออ่อน	76
รูปที่ 4.43 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda02 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส	77
รูปที่ 4.44 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน ทึบ จาก แหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda03	77
รูปที่ 4.45 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน ทึบจากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda023	78
รูปที่ 4.46 พลอยตัวอย่าง Gueda03 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุนทึบ จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบ่ออ่อน	78
รูปที่ 4.47 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda03 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุนทึบ	79
รูปที่ 4.48 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda04	79
รูปที่ 4.49 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda04	80
รูปที่ 4.50 พลอยตัวอย่าง Gueda04 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบ่ออ่อน	80
รูปที่ 4.51 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda04 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส	81
รูปที่ 4.52 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda05	81
รูปที่ 4.53 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda05	82
รูปที่ 4.54 พลอยตัวอย่าง Gueda05 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบ่ออ่อน	82

รูปที่ 4.55 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda05 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส	83
รูปที่ 4.56 รูปแบบร่างนกอินทรีด้วยโปรแกรม Jew Cad	84
รูปที่ 4.57 แสดงรูปแบบจำลองใกล้เคียงกับรูปแบบเมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว	84
รูปที่ 4.58 รูปแวชเป็นส่วนๆ บางส่วนสำหรับการทดลองหล่อพร้อมฝัง	84
รูปที่ 4.59 แบบทดลองหลังหล่อด้วยโลหะทองเหลือง	85
รูปที่ 4.60 ชิ้นส่วนโลหะทองเหลืองเมื่อมาประกอบเป็นตัวเรือน	85
รูปที่ 4.61 รูปร่างเมื่อเป็นตัวเรือน	85
รูปที่ 4.62 รูปร่างหลังชุบเป็นตัวเรือน	86
รูปที่ 4.63 พลอยที่อยู่ในตัวเรือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงมีประกายและให้สีคงเดิม	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของคอร์นดัมกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี	5
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีจากแหล่งศรีลังกาด้วยเทคนิค PIXE(%wt)	32
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน จากพลอยแหล่งดีเอโกประเทศมาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)	33
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDB03 จากพลอยแหล่งดีเอโกประเทศ มาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)	33
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDA04 จากพลอยแหล่งดีเอโกประเทศ มาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)	34
ตารางที่ 4.5 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา	35
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา	35
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา	36
ตารางที่ 4.9 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนเขียว จากแหล่งศรีลังกา	37
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนเขียว จากแหล่งศรีลังกา	37
ตารางที่ 4.11 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา	38
ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา	38
ตารางที่ 4.13 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา	46
ตารางที่ 4.14 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา	49
ตารางที่ 4.15 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนเขียว จากแหล่งศรีลังกา	53
ตารางที่ 4.16 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา	56
ตารางที่ 4.17 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันทั้งด้านหน้าพลอยและหลังพลอย	63
ตารางที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างจากแหล่งมาดากัสการ์ ที่ผ่านไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน ใช้พลังงาน 50 keV เวลา 5 ชั่วโมง ต่อ 1 ครั้ง ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง แล้วมาทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	65
ตารางที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างจากแหล่งเด่นชัย ประเทศไทย ที่ผ่านไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันใช้พลังงาน 50 keV เวลา 5 ชั่วโมง ต่อ 1 ครั้ง ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง แล้วมาทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

โดยทั่วไปผู้คนนิยมเพชรมาเพื่อผลิตประกอบในตัวเรือนเครื่องประดับ เนื่องจากเพชรมีความสวยงาม เนื้อสะอาดคุณภาพดีและมีความแข็งที่สุด เพชรที่นิยมจะเป็นกลุ่มที่มีสีขาวมาก (Very White) แต่ด้วยเพชรมีกลุ่มนี้มีราคาต่อน้ำหนักสูง ดังนั้นจึงมีการนำวัสดุอื่น เช่น เพชรสังเคราะห์และพลอยอื่นๆ ที่มีสีขาว เนื้อใส สำหรับทดแทนเพชร โดยเฉพาะการนำพลอยธรรมชาติในตระกูลคอรันดัม (Corundum) ในกลุ่มพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว (natural white sapphire) ประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) มาใช้ทดแทนเพชรเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากพลอยที่ขุดได้จากธรรมชาติที่มีสีสด ที่สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพได้ จนสามารถผลิตเป็นเครื่องประดับมีไม่เกินร้อยละ 10 ที่เหลือจากนั้นจะเป็นพลอยที่ยังมีความขุ่นมัวจากตำหนิภายในต่างๆ หรือมีสีที่ตลาดไม่ต้องการ แล้วถูกนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การให้ความร้อน การเผาชันสี เป็นต้น เพื่อให้พลอยสะอาด มีสีสด ขึ้นอยู่กับว่าพลอยมีธาตุเจือที่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดสีให้เป็นไปตามที่ตลาดต้องการ ทั้งนี้จะมีพลอยจำนวนมากที่เป็นพลอยเนื้อขุ่น มีปริมาณธาตุเจือที่ให้สีไม่เพียงพอต่อการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน ดังนั้นการนำเทคนิคอื่นๆ เช่น การปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน ซึ่งเป็นเทคนิคในการฝังไอออนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในวัสดุ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดตำหนิภายใน เช่น ข่องแข็งจากธาตุชนิดอื่น ของเหลวแก๊ส ที่สร้างความขุ่นมัวภายในเนื้อพลอย

อย่างไรก็ตามพลอยคอรันดัมธรรมชาติที่ปราศจากธาตุเจือปน (trace element) หรือธาตุอื่นที่มีส่วนทำให้เกิดสีผู้ประกอบการมักเรียกว่าพลอยขาว สามารถขุดพบได้ในทุกแหล่งที่ขุดพบพลอยคอรันดัมสีอื่นๆ และเข้าช่วยไม่มีสี (colorless) ถือเป็นพลอยที่บริสุทธิ์ที่สุด (purest) และหายากที่สุด (rarest) แต่ที่พบบ่อยจะเป็นพลอยที่มีขนาดเล็ก และพบได้น้อยทำให้ราคาสูง หรือที่พบมากขนาดใหญ่ มีมลทินมาก เนื้อขุ่น ค่อนข้างทึบ ราคาถูกกว่า ทำให้ในตลาดอัญมณียังต้องการซื้อพลอยแซปไฟร์สีขาวคุณภาพตามที่ต้องการ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานทดแทนเพชร ต้องเป็นเนื้อแก้ว โปร่งใส (semi-transparent) มักจะมีขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ เพราะใสสะอาด เนื้อดี มีความแวววาวสวยกว่า เนื่องจากพลอยในตระกูลคอรันดัมมีความแข็งสูงเป็น 9 ตามสเกลของโมห์ โอกาสที่จะถูกขูดขีดให้ขุ่นมัวมีน้อย มีประกายแวววาวจากค่าดัชนีหักเหสูง เมื่อผ่านการเจียรระไนและตกแต่งเป็นเครื่องประดับจะมีคุณค่าสูงมาก จากการสำรวจความต้องการของผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดย่อม พบว่าความต้องการของลูกค้าจำนวนมาก ต้องการพลอยธรรมชาติไร้สีที่ผ่านการเจียรระไนแล้วมีขนาดตั้งแต่ 2-5 กะรัต โดยเฉพาะพลอยใส ไม่มีสี เนื้อสะอาด มีประกายดี แวววาว ความแข็งสูง

โครงการวิจัยนี้ต้องการพัฒนาคุณภาพพลอยคอรันดัมขนาด 2 กะรัตขึ้นไป จากกลุ่มไม่มีเชื้อสี หรือประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) เนื้อขุ่น และปริมาณธาตุเจือน้อย ซึ่งไม่สามารถเพิ่มสีโดยขบวนการทางความร้อนได้ ผู้ประกอบการมักจะคัดแยกออกจำหน่ายในราคาต่อกะรัตถูกกว่าพลอยที่มีเชื้อสีมาก ในโครงการนี้ จะมีการศึกษาและพัฒนาคุณภาพของพลอยดิบดังกล่าวจากแหล่งต่างๆ เช่น ศรีลังกา มาดากัสการ์ เวียดนาม ไนจีเรีย ไทย โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ ด้วยเทคนิค

PIXE โดยเครื่องเร่งอนุภาคแทนเดิม ขนาด 1.7 MV เพื่อศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ความขุ่นที่มาจากธาตุมลทินต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้พลอยมีคุณภาพต่ำ จากนั้นจะใช้เทคนิคการอาบพลอยด้วยเครื่องไอออนอิมпланเตอ์ชนิดคอมแพ็ค และการอบอ่อนเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย เช่น เพิ่มความใส สะอาด ด้วยการสลายสารมลทินเนื่องจากมลทินในพลอยหรือเพิ่มความสะอาด (clarity) โดยไม่เกิดการทำลายเนื้อพลอย

1.2 วัตถุประสงค์

- ก) เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของมลทินในพลอยแซปไฟร์สีขาว ที่มีผลต่อสมบัติการดูดกลืนแสง (absorption) ของพลอยชนิดนี้
- ข) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติเชิงแสง ความโปร่งใส และลดมลทิน ของพลอยแซปไฟร์สีขาว ขุ่น ด้วยเทคนิคลำไอออน
- ค) เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาดผิวและปรับปรุงคุณภาพผิวพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่น ด้วยเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมา
- ง) เพื่อศึกษาวิธีการนำพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่น ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคลำไอออน แล้วนั้น มาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

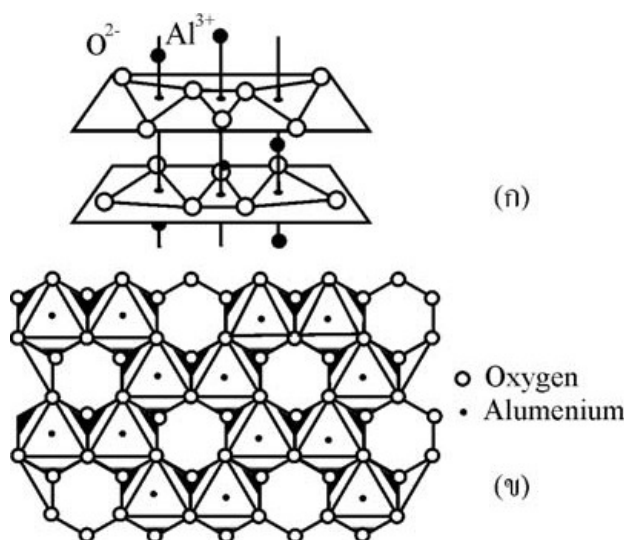
- ก) ได้ผลิตแซปไฟร์สีขาวสำหรับใช้ทดแทนเพชร
- ข) ได้เทคนิคใหม่สำหรับปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอยแซปไฟร์สีขาว
- ค) ได้องค์ความรู้ใหม่ทางวัสดุศาสตร์และเทคโนโลยีอัญมณี ที่สามารถนำไปเผยแพร่เพื่อให้เป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมอัญมณี และยังสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับของประเทศได้
- ง) ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลอยคอร์ันดัม

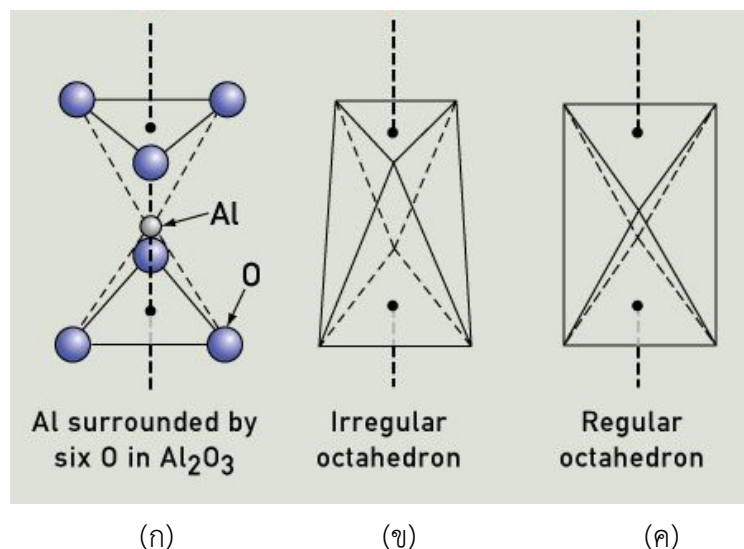
พลอยในตระกูลคอร์ันดัมหรือแร่คอร์ันดัม มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 มีโครงสร้างผลึกแบบรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ในระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) คอร์ันดัมบริสุทธิ์จะไม่มีสี แต่ในธรรมชาติมีสารอื่นที่เป็นธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย (ในหน่วย ppm) ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆกัน [1] เมื่อเป็นสีแดง จะมีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า “ruby” หรือ “ทับทิม” ในภาษาไทย และเมื่อเป็นสีอื่นๆ จะเรียกรวมๆ ในภาษาอังกฤษว่า “sapphire” ซึ่งในภาษาไทย จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามสีของแซฟไฟร์ เช่น เมื่อเป็นสีน้ำเงิน (blue sapphire) จะเรียกว่า “ไพลิน” เมื่อเป็นสีเหลือง (yellow sapphire) จะเรียกว่า “บุษราคัม” เมื่อเป็นสีเขียว (green sapphire) จะเรียกว่า “เขียวส่อง” เป็นต้น ส่วนประกอบของธาตุเจือปนแต่ละชนิดแตกต่างกันไป แล้วแต่แหล่งที่เกิดในธรรมชาติ คอร์ันดัมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างผลึกแข็งแรง ผลึกมีพันธะเคมีสองแบบคือ พันธะไอออนิก และพันธะโควาเลนต์ อะตอมอลูมิเนียมมีชั้นอิเล็กตรอนวงนอกสุด 3 ตำแหน่ง เรียงดังนี้ $3s^2, 3p^1$ อะตอมออกซิเจนมีชั้นอิเล็กตรอนวงนอกสุดคือ $2p^4$ ออกซิเจนไอออนสองลบ (O^{2-}) มีเส้นผ่านศูนย์กลางไอออน 2.8 อังสตรอม (Å) เมื่อจัดเรียงตัวออกซิเจนไอออนสองลบแบบเฮกซะโกนอล จะมีช่องว่างที่ล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออนสองลบ 6 ตัว ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างเพียงพอสำหรับอลูมิเนียมสามบวก (Al^{3+}) แต่อลูมิเนียมสามบวก จะวางตัวเพียง 2 ช่องว่างในทุกๆ ช่องว่าง 3 ช่อง [1-2] โครงสร้างของคอร์ันดัม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคอร์ันดัมและตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออน (ก) มองด้านข้าง
(ข) มองด้านบน [1]

เนื่องจากผลึกอลูมิเนียมไอออน Al^{3+} ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออนสองลบ (O^{2-}) 6 ตำแหน่ง เมื่ออยู่ท่ามกลางไอออนลบ ประจุไฟฟ้าลบของไอออนทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบๆ อลูมิเนียมไอออนของ Al^{3+} ที่อยู่ตรงกลาง ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่าสนามผลึก (crystal field) และสามารถบอกลักษณะเฉพาะใน

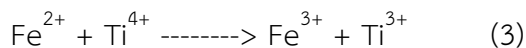
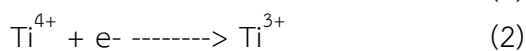
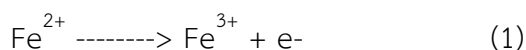
รูปแบบจำนวนสมมาตร การบิดของโครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้า รวมทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าสถิตย์ รูปที่ 2.2 (ก) แสดงถึงผลึกบริเวณที่มีอะลูมิเนียมสามบวก (Al^{3+}) เพียงตำแหน่งเดียว และถูกปิดล้อมด้วยออกซิเจนไอออน 6 ตำแหน่ง รูปที่ 2.2 (ข) อะลูมิเนียมสามบวกอยู่สูงหรือต่ำกว่าตำแหน่งปกติ คืออยู่ชิดด้านใดด้านหนึ่งของชั้นออกซิเจนไอออน ทำให้โครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้าบิดไป (distorted octahedron) รูปที่ 2.2 (ค) แสดงให้เห็นว่าอะลูมิเนียมสามบวกอยู่ประมาณกึ่งกลาง ระหว่างชั้นออกซิเจนไอออน ทำให้เกิดโครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้าแบบสมมาตรปกติ (regular octahedron) ทั้ง 3 รูปยังคงสมมาตรแบบสามแกน (three fold symmetry)



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure [3]

คอร์ันดัม เป็นพลอยชนิดอัลโลโครเมติก (Allochomatic) ซึ่งก็คือสีของพลอยที่เกิดขึ้น ไม่ได้เกิดมาจากธาตุหลัก แต่เกิดจากธาตุเจือ (trace element) ที่ไม่จำเป็นต่อโครงสร้างทางเคมีของพลอยนั้น [2] การเกิดสีจึงพิจารณาจาก [3] ธาตุเจือ เช่น ธาตุโลหะจากโครเมียมในรูป Cr^{3+} ปริมาณหนึ่งซึ่งน้อยมาก มีปนอยู่ในโครงสร้างของ Al_2O_3 เมื่อเข้าไปแทนที่อะลูมิเนียมในรูป Al^{3+} ในโครงสร้างผลึก ทำให้คอร์ันดัมมีสีแดง ซึ่งก็คือพลอยทับทิมนั่นเอง ความเข้มของสี (intense) จึงอาจเทียบได้กับปริมาณของธาตุโครเมียมว่าสามารถเข้าไปแทนที่อะลูมิเนียมได้มากน้อยเพียงไร ส่วนธาตุที่ทำให้เกิดสีน้ำเงิน ได้แก่ เหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เมื่อไทเทเนียมและเหล็กรวมกันในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ได้สีน้ำเงินเข้มทั้งดงาม ธาตุอื่นนอกจากเหล็กและไทเทเนียม จะทำให้พลอยมีสีเพี้ยนออกไปจากสีน้ำเงินหรือฟ้า สีน้ำเงินจะเข้มสดนั้นไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของธาตุเหล็กและไทเทเนียมเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับประจุไฟฟ้า (valance state) ของธาตุทั้งสองด้วย กระบวนการที่ทำให้เกิดสีในแซฟไฟร์สีน้ำเงินนั้น เกิดจากธาตุอะลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยธาตุเหล็กและไทเทเนียม โดยธาตุเหล็กอาจจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัส (Fe^{2+} - ferrous) หรือ เฟอร์ริก (Fe^{3+} - ferric) ส่วนธาตุไทเทเนียมอาจจะอยู่ในรูปของไทเทโนส (Ti^{3+} - titanous) หรือ ไทเทนิค (Ti^{4+} - titanic) ถ้าหาก Fe^{2+} และ Ti^{4+} อยู่ในพลอยร่วมกันแล้วเกิดการทำปฏิกิริยากัน โดยอิเล็กตรอนจาก Fe^{2+} กระโดดไปยัง 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 (ICVT)”

ผลึกของคอร์ันดัมมีไทเทเนียมในเปอร์เซ็นต์ที่น้อยมากทำให้ไม่มีสี แต่เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุ (charge transfer) กลไกลักษณะนี้ทำให้เกิดสีน้ำเงินในแซฟไฟร์ นั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนชั้น 3d โดยการดูดกลืนพลังงานแสง เกิดการ displacement จากไอออนของเหล็กไปยังไทเทเนียม เกิดการถ่ายเทของประจุชั้น 3d เป็นการชั่วคราว สีเข้มหรือดำก็เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เป็นตัวที่ทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุได้ การถ่ายเทของประจุเกิดขึ้นใน Ligand field สามารถทำให้เกิดสี หรือแม้แต่อิเล็กตรอนไร้คู่ ก็เป็นสาเหตุให้เกิดสี โดยกลไกการเปลี่ยนแปลง d-d และ f-f transition ตัวอย่างเช่นการเกิดสีน้ำเงินในพลอยแดง ซึ่งจะทำให้พลอยเป็นสีแดงอมม่วง เกิดจากเหล็กและไทเทเนียม เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของออลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 ทำให้ Octahedron บิดเบี้ยวไป ดังรูปที่ 2.2 (ข) ไม่มีรูปนี้ ซึ่งแสดง Octahedron 2 ลูก ที่มีหน้าร่วมกันตามแนวแกน c โดยเหล็กจะมีได้หนึ่งตัว คือ Fe^{2+} ขณะที่ไทเทเนียมมักจะอยู่ในรูป Ti^{4+} ถ้า Fe^{2+} อยู่ใกล้ชิดกับตำแหน่งของ Al แล้ว Fe และ Ti จะอยู่ห่างกัน 2.65 Å และมีการเคลื่อนที่ระหว่าง d_z^2 ออบิตอล ทำให้อิเล็กตรอนผ่านจากไอออนหนึ่งไปอีกไอออนหนึ่งได้ โดย Fe^{2+} อิเล็กตรอนหายไป 1 ตัว กลายเป็น Fe^{3+} และ Ti^{4+} ได้รับอิเล็กตรอนมากกลายเป็น Ti^{3+} ดังสมการ [3]



นอกจากกระบวนการดังกล่าวนี้ ยังมีกระบวนการอื่นๆที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินของแซฟไฟร์สีน้ำเงิน ได้แก่ กระบวนการ $\text{Fe}^{3+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$ และ Fe^{3+} pair ($\text{Fe}^{3+} - \text{O} - \text{Fe}^{3+}$) สาเหตุการเกิดสีในกรณีนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีธาตุเหล็กมาก แต่ไทเทเนียมมีน้อยมากหรือไม่มีเลย กรณีนี้สีน้ำเงินที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับจำนวนของ valance state ของธาตุเหล็ก ความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับการดูดกลืนพลังงานของอะตอม Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่จะเปลี่ยนพลังงานให้เป็นสี ยังมีพลังงานสูงเท่าไร สีของแซฟไฟร์สีน้ำเงินก็จะเข้มขึ้นเท่านั้น และหากมีกระบวนการ $\text{Fe}^{2+} - \text{O} - \text{Ti}^{4+}$ IVCT เกิดขึ้นร่วมด้วย จะทำให้น้ำเงินเข้มขึ้นอีก

ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสีในคอร์ันดัมแสดงดังตารางที่ 2.1 [3]

ตารางที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของคอร์ันดัมกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี [3]

สีที่ปรากฏ	กระบวนการที่ทำให้เกิดสี
ชมพู แดง	Cr^{3+} แทนที่ Al^{3+} ในคอร์ันดัม
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+}

คอร์นดัมได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นอัญมณีบนเครื่องประดับอย่างแพร่หลาย พลอยคอร์นดัมที่มีสีสันที่สวยงาม จะมีมูลค่าที่สูงมาก รวมถึงการที่มีความแข็งระดับ 9 ตามมาตรฐานของโมห์ ทำให้เป็นที่ต้องการของตลาดอัญมณีและเครื่องประดับอย่างมาก แต่พลอยคอร์นดัมที่พบในธรรมชาติที่มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นอัญมณีมีจำนวนไม่มาก พลอยที่ได้ส่วนใหญ่จึงต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเพิ่มมูลค่า

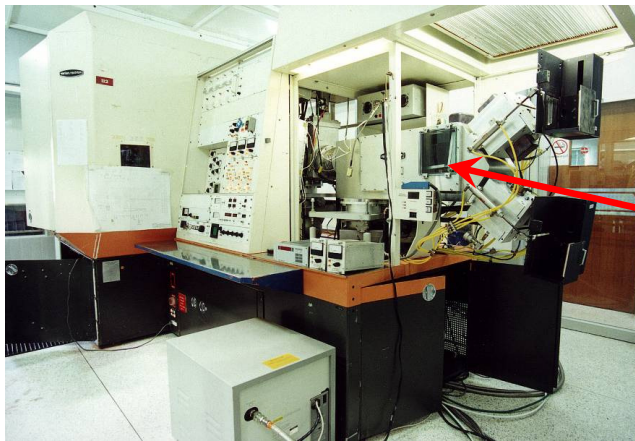
2.2 เทคโนโลยีลำโออนกับการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์นดัม

พลอยที่ขุดได้จากธรรมชาติที่สามารถนำมาเจียรไนขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับเลยมักจะไม่ถึงร้อยละห้า เนื่องจากยังมีความขุ่นและยังไม่ใช้สีที่ตลาดต้องการ พลอยเหล่านี้จะต้องนำมาผ่านกระบวนการต่างๆ เพื่อพัฒนาสมบัติเชิงแสงและเจียรไนให้เป็นอัญมณีน้ำงาม ที่ทำให้มีราคาเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัว ซึ่งส่วนใหญ่พลอยจะผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (Heat treatment) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความสะอาด (clarity) แต่ข้อเสียคือบางครั้งจะเกิดการแตกร้าวภายในพลอยทำให้มูลค่าต่ำลง ซึ่งรอยร้าวที่ปรากฏบนผิวหรือในเนื้อพลอย อาจเกิดจากพลอยได้รับความเค้น ที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของหินที่หุ้มพลอย หรืออาจเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของกระบวนการขยายตัวของผลึกพลอย หรือการมีผลึกของแร่ชนิดอื่นที่ปนในเนื้อพลอย การแก้ไขอาจทำได้โดยนำพลอยมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เป็นเวลานานพอสมควรจะทำให้ความเครียดในเนื้อพลอยลดลง ทำให้เกิดการปรับกระบวนการขยายตัวของผลึก เพื่อลดรอยแตกที่ไม่พึงประสงค์ แต่ทั้งนี้ยังมีข้อจำกัดอื่นๆ เช่น พลอยที่มีราคาถูก คุณภาพต่ำ ทึบแสง มีมลทินมากแต่ขนาดใหญ่ ไม่สามารถใช้กลไกทางความร้อน เนื่องจากการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของมลทิน โครงสร้างผลึกของพลอย แหล่งกำเนิดที่มีธาตุมลทินหลัก ปริมาณธาตุเจือที่มีในโครงสร้างผลึกพลอย ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการและเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือ เพื่อลดข้อจำกัดของการปรับปรุงคุณภาพแบบเดิม

เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน เป็นเทคนิคในการฝังไอออนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในวัสดุ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น ทั้งนี้ไอออนที่มีพลังงานสูง เมื่อถูกฝังเข้าไปในตัวอย่าง จะเกิดการแลกเปลี่ยนพลังงานกับอะตอมหรือโมเลกุลของตัวอย่าง ทำให้อะตอมอาจเกิดการเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) เกิดเป็นช่องว่าง (vacancy) และอาจเกิด defect ในบางตำแหน่ง แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะไปรวมตัวกับโครงสร้างเดิม เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมีการใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมมานานแล้ว โดยเป็นเทคนิคหลักในการได้ปสารกึ่งตัวนำ แต่เป็นการได้ปในปริมาณน้อยๆเท่านั้น ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วย เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดอินคลูชัน เช่น ขอบแข็งจากธาตุชนิดอื่น ของเหลว แก๊ส หรือการปรับเปลี่ยนสีของพลอยให้สีหลักมีความชัดเจนยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม รายงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอยคอร์นดัม สำหรับการนำไปใช้งานด้านอัญมณีและเครื่องประดับยังไม่มีการศึกษาที่ชัดเจน

คณะผู้วิจัยได้เริ่มทดลองนำเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน มาประยุกต์ใช้กับการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์นดัมในหลายแหล่งและหลากสี [4] ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษามีทั้งพลอยสด และพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนมาแล้ว ขนาดมีตั้งแต่ 0.5–3 เซนติเมตร กระบวนการศึกษา

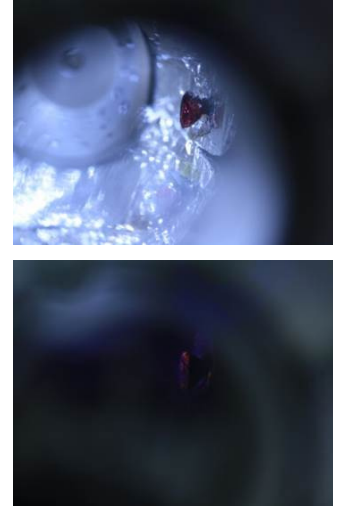
ประกอบด้วย ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพลอยโดยการตรวจสอบสีด้วยชุดเปรียบเทียบสีคอร์ันดัมมาตรฐานของ GIA (Gemological Institute of America) หลังจากนั้น จึงนำมาตรวจสอบลักษณะภายในด้วยกล้องไมโครสโคป เช่น มลทินจากความขุ่นมัวของเหล็กออกไซด์ เส้นไหมรูไทรนสีขาว เฟสแถบสี (color zoning) และฝุ่นแร่ขนาดเล็ก (minute particles) แล้วจึงศึกษาปริมาณธาตุให้สีในพลอยด้วยเทคนิค Particle Induce X-ray Emission (PIXE) เพื่อเก็บข้อมูลของแหล่งกำเนิด ความแตกต่างของธาตุมลทินแบบต่างๆ ที่มีผลต่อสีพลอยและการขุ่นมัวในเนื้อพลอยที่มาจากออกไซด์ของโลหะต่างๆ เช่น จุดสีดำจาก Fe_2O_3 สีขาวจาก TiO_2 และปริมาณธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเกิดสีภายในโครงสร้างผลึกพลอย ได้แก่ Fe, Cr, Ti, Al, V จากนั้นนำมาทำการไอออนอิมพลานเตชันด้วยไอออนชนิดต่างๆ เช่น ไอออนของอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วยเครื่องแวลวีนไอออนอิมพลานเตอร์ (รูปที่ 2.3) เครื่องไอออนอิมพลานเตชันต้นแบบสำหรับงานพลอย (รูปที่ 2.4) และเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็ม (รูปที่ 2.5)



รูปที่ 2.3 เครื่องแวลวีนไอออนอิมพลานเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าเร่ง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์และแผ่นวางพลอย

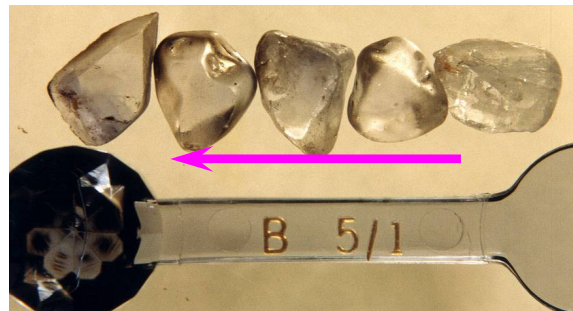


รูปที่ 2.4 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับงานพลอย โดยที่รูปด้านขวาแสดงการติดตั้งพลอย

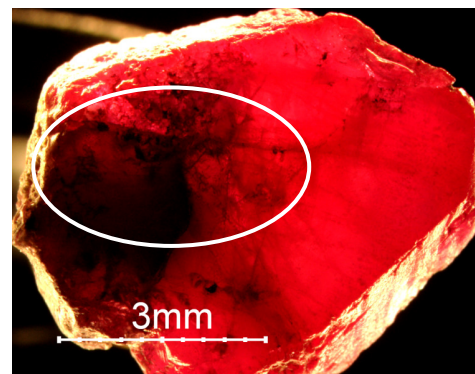
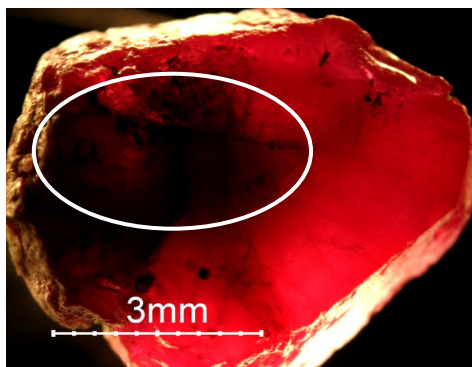


รูปที่ 2.5 เครื่องเร่งอนุภาคแทนเต็มขนาดศักย์ไฟฟ้าแรง 1.7 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่รูปด้านขวาแสดง การติดตั้งพลอย และการเรืองแสงของพลอยเมื่อถูกยิงด้วยไอออน

หลังยิงด้วยไอออนพบว่าผิวของพลอยถูกขีด ทำให้พลอยสทไสและแวววาวขึ้น (รูปที่ 2.6) ในพลอยทับทิม ผลจากพลังงานของไอออน ทำให้มีการสลายไมโครอินคลูชันของมลทินที่เป็นเส้นเข็มสีดำทั่วทั้งก้อนผลึก ลดลงได้พลอยที่มีสีสม่ำเสมอขึ้นและโปร่งแสงขึ้น (รูปที่ 2.7)

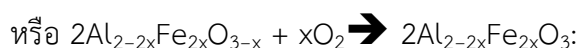
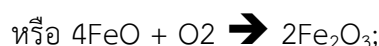


รูปที่ 2.6 แซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันที่โดสค่าต่างๆ มีสีใสเพิ่มมากขึ้นตามค่าโดสที่ เพิ่มขึ้น (ลูกศรชี้) เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ไอออนอิมพลานเตชัน (เม็ดขวาสุด)



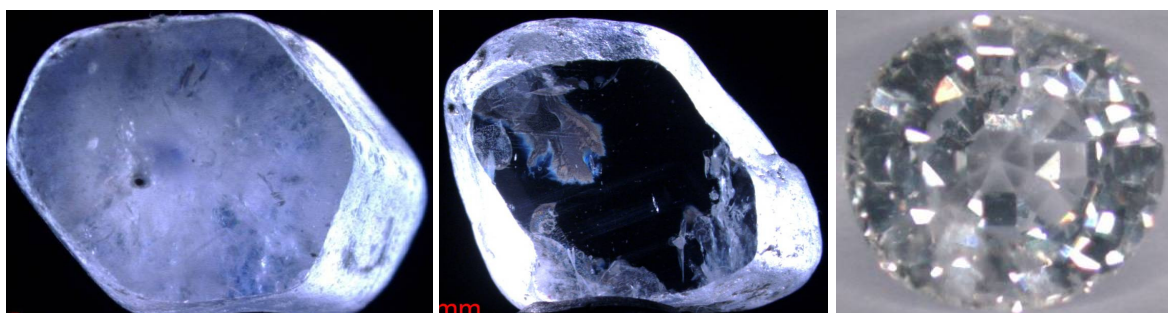
รูปที่ 2.7 ทับทิมก่อนยิงด้วยไอออน(ซ้าย)และหลังยิง(ขวา) มีการลดลงของ microinclusion ในเนื้อพลอย

เป็นที่ทราบดีว่าคอร์รันดัม เป็นพลอยชนิดที่เรียกว่า “Allochromatic” ซึ่งการเกิดสีเนื่องมาจากธาตุเจือที่อยู่ในพลอย [5] ผลของไอออนที่มีต่อการเปลี่ยนสีของคอร์รันดัมนั้นมีหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของแรมลทิน (impurity) ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่ให้สี การแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) การเกิด color center และการเกิด defect ในเนื้อพลอย [6] ซึ่งในงานวิจัยของคณะผู้วิจัย พบว่า [7] ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงอมม่วงที่เกิดจากโครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งให้สีแดง และเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ซึ่งให้สีน้ำเงินหลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจนพบว่าสีน้ำเงินเจือจางลงหรือหายไปทำให้ได้ทับทิมสีแดงสดโดยคาดว่าเกิดการ oxidation ในพลอย ตัวอย่างเช่น [8]



ส่วนแซฟไฟร์สีน้ำเงิน หรือ ไพลิน (blue sapphire) ที่มีสีน้ำเงินอมเขียวจากเฟอร์ริก (Fe^{3+}) หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจนพบว่า [8] ทำให้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้น สีเขียวเจือจางลงเกือบหายไปผลจากสารประกอบรูไทล์ (TiO_2) เมื่อได้รับการกระตุ้นจะสลายตัวเข้าไปในโครงสร้างของพลอย และทำให้ Ti^{4+} เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{2+} , เกิด $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ intervalence charge transfer [9] ทำให้มีสีน้ำเงินการเปลี่ยนแปลงนี้ เป็นผลมาจากการเกิด reduction ในพลอย

นอกจากนั้น ในกรณีพลอยแซฟไฟร์ สีขาวขุ่น ทึบแสง มีตำหนิ และมลทินแบบเส้นเข็มจำนวนมาก ซึ่งความขุ่นที่มาจากธาตุมลทินต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้พลอยมีคุณภาพต่ำ ทำให้ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดนั้น สามารถใช้เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันด้วยอาร์กอนสลายสารมลทินเหล่านั้น เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงของพลอย เช่น เพิ่มความโปร่งแสง ใส่สะอาด แวววาว ได้ ผลการทดลองเบื้องต้นเป็นที่น่าพอใจ พลอยที่ผ่านกระบวนการไอออนอิมพลานเตชันด้วยอาร์กอน เมื่อนำมาเจียรระไนแล้วมีความสวยงาม เหมาะที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับชนิดต่างๆ ได้ (รูปที่ 2.8) อีกทั้ง



รูปที่ 2.8 จากซ้ายไปขวา พลอยจากศรีลังกา ก่อนการทดลองมีสีขาวขุ่น มลทินสีดำกระจายภายในเนื้อพลอย หลังไอออนอิมพลานเตชัน จะมีลักษณะโปร่งใส แวววาว ทำให้เพิ่มมูลค่าขึ้นได้อีก นอกจากนั้น หลังการเจียรระไนสามารถใช้เป็นเครื่องประดับทางเลือกทดแทนเพชรที่มีราคาสูงกว่ามากได้

ในงานวิจัยเกี่ยวกับพลอยแซฟไฟร์สีขาวคล้ายเพชร คณะผู้วิจัย ได้เริ่มต้นจากพลอยแซฟไฟร์ สีขาวขุ่น ทึบแสง มีตำหนิ และมลทินแบบเส้นเข็มจำนวนมาก นำมาทดลองใช้พลังงานจากไอออนและพลาสมาปรับให้พลอยที่มีสีขาวขุ่น โดยการลดมลทินขนาดเล็ก (micro inclusion) เปลี่ยนเป็น มีความใส แวววาว

เหมือนเพชร เพื่อไปใช้แทนเพชรซึ่งมีราคาแพงและหายาก ผลการทดลองเบื้องต้นเป็นที่น่าพอใจ [10] พลอยที่ผ่านกระบวนการไอออนอิมพลานเตชันด้วยอาร์กอน เมื่อนำมาเจียรระไนแล้วมีความสวยงาม เหมาะที่จะนำไปขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับชนิดต่างๆ ได้ (รูปที่ 2.9) อีกทั้งพบว่าความขุ่นที่มาจากธาตุมลทิน ต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้พลอยมีคุณภาพต่ำ ทำให้ไม่เป็นที่ต้องการของตลาดนั้น สามารถใช้เทคนิคไอออน อิมพลานเตชันด้วยอาร์กอนสลายสารมลทินเหล่านั้น เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงแสงของพลอย เช่น เพิ่มความใส สะอาด แวววาว ได้



รูปที่ 2.9 พลอยจากศรีลังกา ก่อนการทดลองมีสีขาวขุ่น มลทินสีดำกระจายภายในเนื้อพลอย หลังไอออน อิมพลานเตชัน จะมีลักษณะ ใส แวววาว ทำให้เพิ่มมูลค่าขึ้นได้อีก นอกจากนั้น หลังการเจียรระไนสามารถใช้เป็นเครื่องประดับทางเลือกทดแทนเพชรที่มีราคาสูงกว่ามากได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ

3.1.1 การเก็บรวบรวมพลอยตัวอย่าง

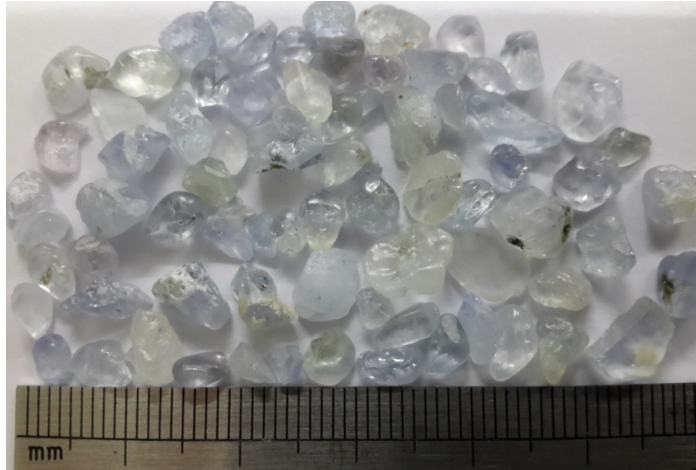
พลอยแซฟไฟร์ประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) ที่ใช้ทดลองในโครงการนี้ เป็นพลอยทั้งที่เป็นพลอยสดไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใดๆ และพลอยผ่านการปรับปรุงด้วยความร้อนจากแหล่งต่างๆ โดยมีจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 1,000 ตัวอย่าง ประกอบด้วยพลอยจาก 5 แหล่ง คือ แหล่งติเอโกประเทศมาดากัสการ์ 217 เม็ด มีสีขาวยนสีฟ้าอ่อน มลทินภายในสีขาวยุ่น พลอยสีอ่อนโทนชมพู และโทนฟ้าแหล่งจากประเทศเวียดนาม 203 เม็ด ประเทศศรีลังกา 428 เม็ด แหล่งมาบิล่าประเทศไนจีเรีย 95 เม็ด และ แหล่งอำเภอเด่นชัยจังหวัดแพร่ จำนวน 57 เม็ด ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสีอ่อน และเนื้อค่อนข้างทึบแสง มีมลทินจำนวนมาก แสดงดังในรูปที่ 3.1 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนแยกทดลองตามแหล่งที่มา



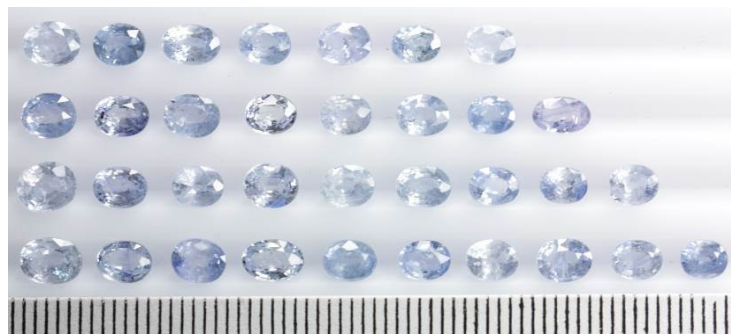
(ก) พลอยสด แหล่งติเอโกประเทศมาดากัสการ์



(ข) พลอยสด แหล่งจากประเทศเวียดนาม



(ค) พลอยสด แหล่งประเทศศรีลังกา



(ง) พลอยเผาและผ่านการเจียระไน แหล่งประเทศศรีลังกา



(จ) พลอยสดและผ่านการเจียระไน แหล่งมาบิล่าประเทศไนจีเรีย



(ฉ) พลอยสด แหล่งอำเภอเด่นชัยประเทศไทย

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างพลอยที่ใช้ทดลอง จาก 5 แหล่ง ก-ฉ (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิรินทร์ บุญแต่ง)

3.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีอ่อน

แยกกลุ่มตัวอย่างพลอยจากตัวอย่างพลอยทั้ง 5 แหล่ง พลอยตัวอย่างที่นำมาศึกษาเหล่านี้ จะทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ หลังจากนั้นนำไปแบ่งเป็นกลุ่มโดยใช้ลักษณะภายนอกต่างๆ ในการ จำแนกตามกลุ่มสี

3.1.2.1 วัดน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ และค่าดัชนีหักเห

3.1.2.2 ตรวจสอบสีจากชุดเทียบสีมาตรฐาน โดยพิจารณาจากความทึบและความใสของ พลอยและจัดแยกสีโดยใช้ชุดเทียบสีมาตรฐาน (Gems color master set) ของสถาบัน Gemological Institute of America (GIA)

3.1.2.3 ตรวจสอบลักษณะของพลอยเช่น ตำหนิ และ มลทินชนิดต่างๆ ที่อยู่ภายในด้วย กล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 5-75 เท่า

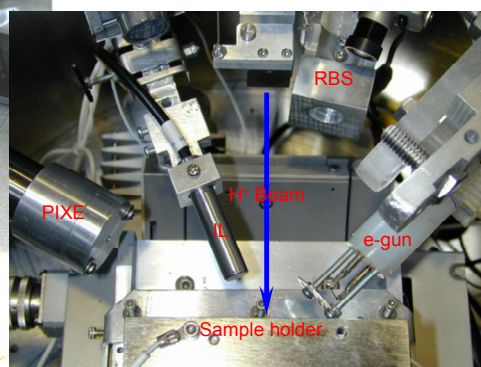
3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.2.1 เทคนิค PIXE

เทคนิค Particle Induced X-rays Emission (PIXE) เป็นการวัดรังสีเอกซ์ที่ถูกปลดปล่อย ออกมาจากตัวอย่างเมื่อถูกกระตุ้นด้วยไอออนโปรตอนพลังงานสูง โดยที่เมื่ออิเล็กตรอนชั้นในของแต่ละ อะตอมถูกชนด้วยโปรตอนพลังงานสูงจนหลุดออกไป อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นถัดไปจะเคลื่อนย้ายลงมาแทน พร้อม กับปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะตัวออกมา เทคนิคนี้จึงสามารถตรวจวัดธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างได้แม้มี ปริมาณเล็กน้อยก็ตามเทคนิคนี้ได้พัฒนาขึ้นมาใช้งานเป็นครั้งแรกในประเทศไทยที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 1.7 ล้านโวลต์เป็นฐานผลิตอนุภาคกระสุน (รูปที่ 3.2) และมีหัววัดแบบ Si(Li) สำหรับตรวจวัดพลังงานของรังสีเอกซ์ ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการ แยกแยะแหล่งกำเนิดของพลอยคอรัันดัมได้ ตัวอย่างสเปกตรัม PIXE แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยอาศัยการ คำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ GUPIXWIN จะสามารถคำนวณปริมาณธาตุเจือในระดับส่วนในล้านส่วน (ppm) ได้

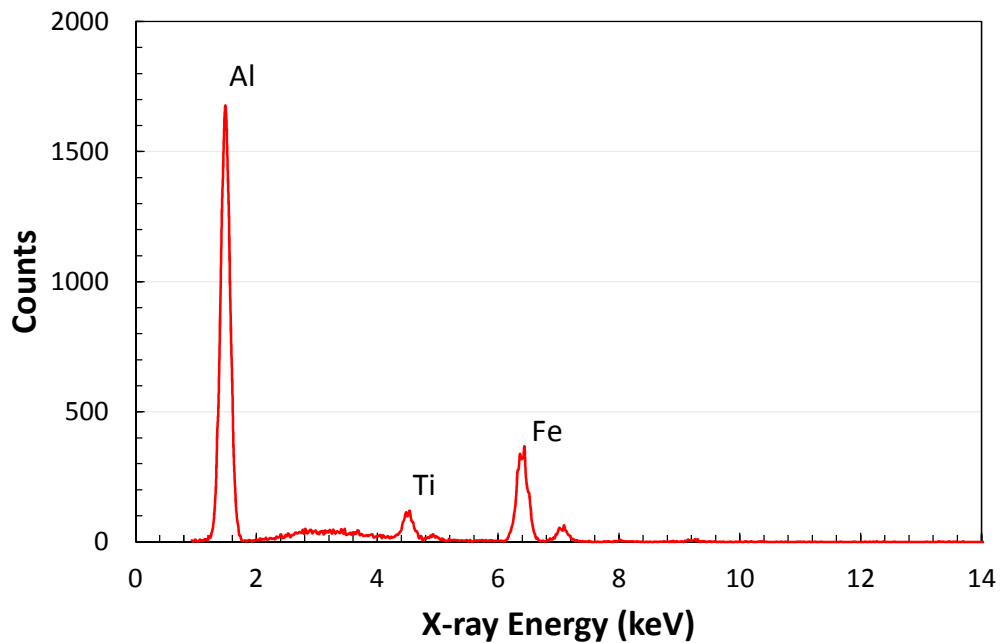


(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) เครื่องเร่งอนุภาคขนาด 1.7 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ (ข) ภาชนะวิเคราะห์ (analysis chamber)

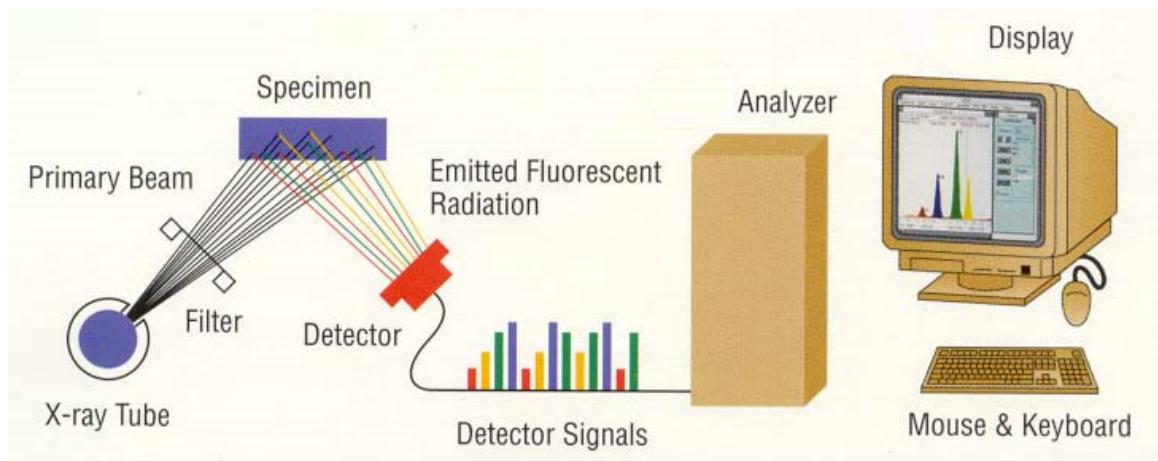


รูปที่ 3.3 สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข PA30

3.2.2 เทคนิค EDXRF

เทคนิค Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียมทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของตัวของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

โดยทั่วไปแล้วเครื่อง X-ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-ray tube หรือใช้ไอโซโทปกัมมันตรังสี) และเครื่องตรวจวัด รังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อ X-ray tube เร่งอิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะ แล้วให้รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ทั้งสแตน โรเดียม โมลิบดีนัม หรือโครม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็ง (solid-state) เหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว ไดอะแกรมของเครื่อง EDXRF แสดงดังในรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องติดตั้งอยู่ที่คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา (วิทยาเขตจันทบุรี) และของสถาบันอัญมณีวิจัยพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)



รูปที่ 3.4 ไดอะแกรมแสดงการติดตั้งระบบ X-ray spectrometer (DX 95, บริษัทฟิลิปส์)



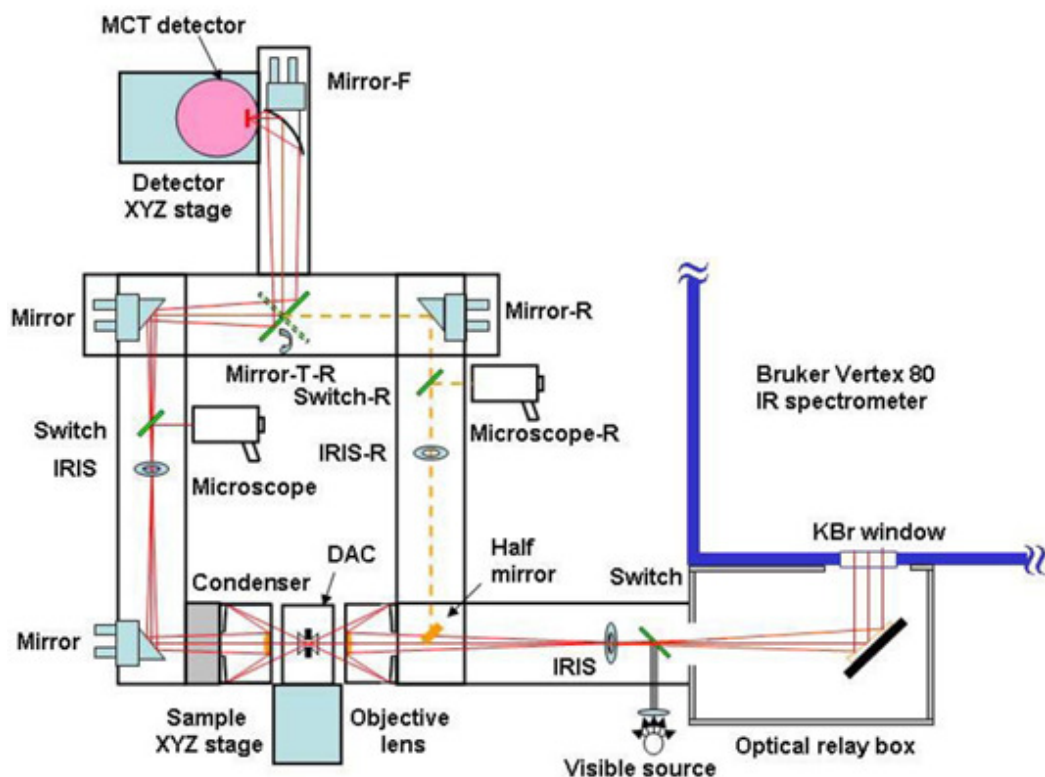
รูปที่ 3.5 เครื่อง Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)

3.3 ตรวจสอบสมบัติทางแสงและศึกษาลักษณะเฉพาะของสเปกตรัม

3.3.1 เทคนิค FTIR

FTIR spectrometer (Fourier Transform Infrared Spectrometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบโครงสร้างของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 ถึง 10 cm^{-1} ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ตัวอย่างพลอยที่ทดลองใช้เครื่องมือ FTIR รุ่น Nicolet 6700 ของสถาบันอณูมณีวิจัยพัฒนาอณูมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) หลักการวิเคราะห์คือ รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสี

อินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วง Visible radiation กับ Microwave radiation โดยช่วงของรังสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ Near Infrared ($12800\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$) Middle Infrared ($4000\text{--}200\text{ cm}^{-1}$) Far Infrared ($200\text{--}10\text{ cm}^{-1}$) ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมีได้แก่ช่วง Middle IR เนื่องจากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้นความถี่ของรังสีอินฟราเรด ต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆ ซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้ การแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Wave number กับ Transmittance ซึ่งเรียกว่า Infrared spectrum รูปที่ 3.6 แสดงหลักการทำงานของเครื่อง FT-IR Spectroscopy มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เมื่อรังสีอินฟราเรดที่มีหลายความถี่จากแหล่งคลื่นรังสีอินฟราเรด ผ่านเข้าไปยังอินเทอร์โพโรมิเตอร์ ลำแสงจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ที่ส่วนที่เป็น beam splitter ลำแสงครึ่งหนึ่งจะผ่านไปยังกระจกที่ตรึงอยู่กับที่ และกระจกที่เคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วคงที่ เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมาที่ beam splitter จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือการแทรกสอดแบบหักล้างของแต่ละความยาวคลื่น เมื่อแสงผ่านสารตัวอย่างไปยังตัววัดสัญญาณ ที่อ่านได้ทุกความถี่พร้อมกันกับช่วงสแกนของกระจก โดยที่อัตราการสแกนสัญญาณและความเร็วของกระจกที่เคลื่อนที่ได้จะถูกควบคุมให้มีความถูกต้องและคงที่ เรียกสัญญาณอ้างอิงจากตัววัดสัญญาณที่เกิดจากหลอด He-Ne Laser ว่า Internal Reference Laser สัญญาณที่ตัววัดสัญญาณอ่านได้ จะอยู่ในรูปอินเทอร์โพแกรมถูกเก็บไว้ ตัวอย่างเครื่องมือชนิดนี้แสดงดังในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง FT-IR Spectroscopy



รูปที่ 3.7 เครื่อง FT-IR Spectroscopy

3.3.2 เทคนิค UV-VIS-NIR วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลต ช่วงสเปกตรัมที่ตามองเห็นและช่วงอินฟราเรดระยะใกล้ (UV-VIS-NIR) ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Hitachi UV-VIS-NIR spectrophotometer (Model U4001) ที่สถาบันอณูมณีวิจัยพัฒนาอณูมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (รูปที่ 3.8) หลักการทำงานคือ เป็นเครื่องมือลำแสงคู่ (Double-beam Instrument) โดยที่ลำแสงหนึ่งผ่านตัวอ้างอิง อีกลำแสงหนึ่งผ่านตัวอย่างพลอยที่ต้องการวิเคราะห์ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง (รูปที่ 3.9) คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสม จะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ จากนั้นจะเปรียบเทียบความเข้มของลำแสงทั้งสองที่วัดพร้อมกัน เป็นการวัดอัตราส่วนของความเข้มแสง ที่ได้จากตัวอย่างอ้างอิงกับตัวอย่างพลอยในเวลาใกล้เคียงกันมาก ทำให้ไม่มีผลต่อการวัดการดูดกลืนแสง เครื่องมือนี้ส่วนประกอบพื้นฐานดังนี้

1. แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ แหล่งกำเนิดแสงช่วง UV ชนิดของสเปกโตรสโกปี UV molecular absorption ใช้หลอดดิวทีเรียม (Deuterium lamp) ให้ความยาวคลื่นอยู่ในย่าน 160-380 nm และช่วง visible ใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) ให้ความยาวคลื่นในช่วง 240-2,500 nm ชนิดของสเปกโตรสโกปีเป็นแบบ UV/visible/near-IR molecular absorption

2. Monochromator

ส่วนประกอบนี้เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสง ซึ่ง

เป็นพอลิโครเมติก ให้เป็นแสงคลื่นเดียว (monochromatic) ซึ่งเป็นแถบแสงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว โดยใช้ฟิลเตอร์ (กระจกสี) ปริซึม (prism) หรือ เกรตติง (grating)

3. อุปกรณ์จับยึดตัวอย่าง

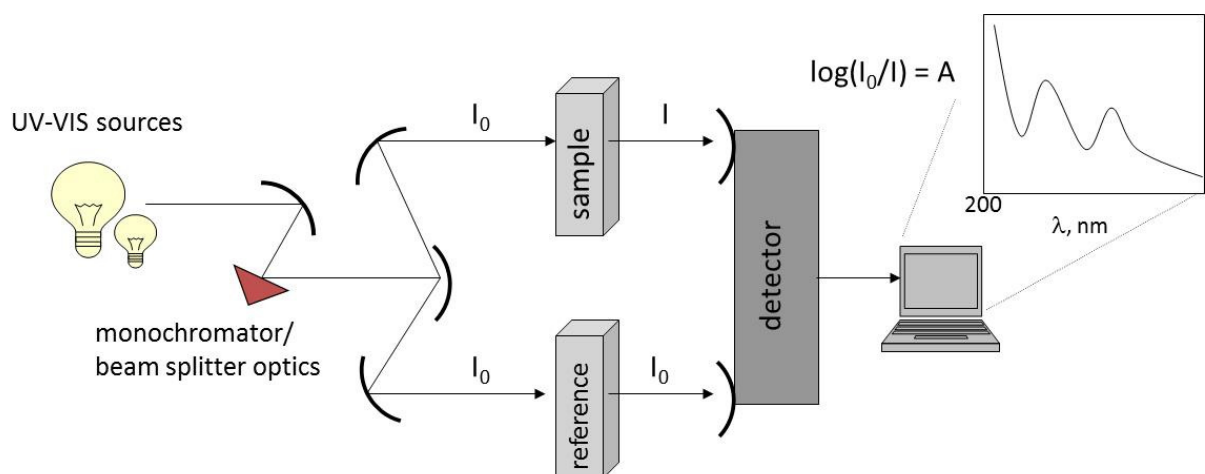
4. เครื่องวัด (Detector)

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของความเข้มของคลื่นแสงช่วง UV-VIS และ NIR โดยรังสีที่ถูกดูดกลืน จากการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้าเครื่องตรวจจับสัญญาณที่ดีต้องมีสภาพไวสูง คือแม้ปริมาณแสงจะเปลี่ยนไปเล็กน้อย ก็สามารถตรวจจับสัญญาณความแตกต่างได้ เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบัน คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิคอนไดโอด (silicon diode detector)

5. ชุดประมวลผลและบันทึก



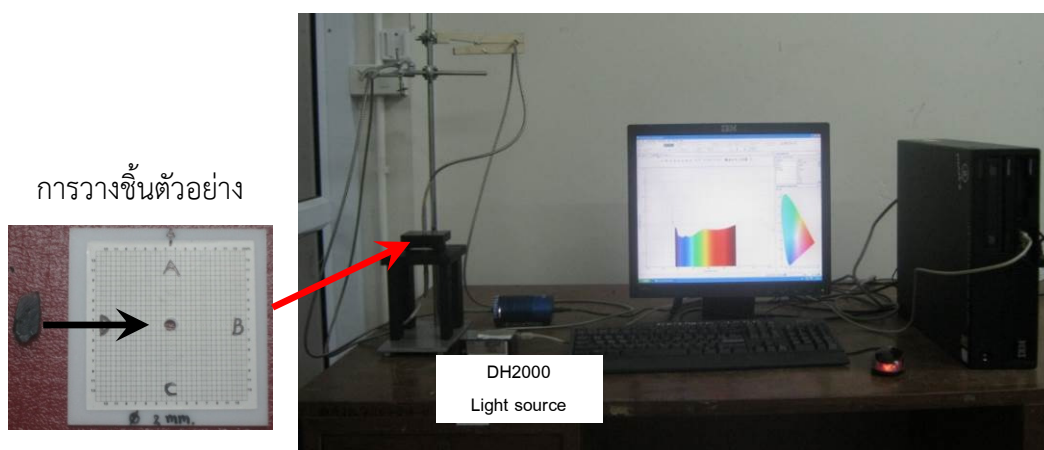
รูปที่ 3.8 เครื่องมือ UV-VIS-NIR spectrophotometer



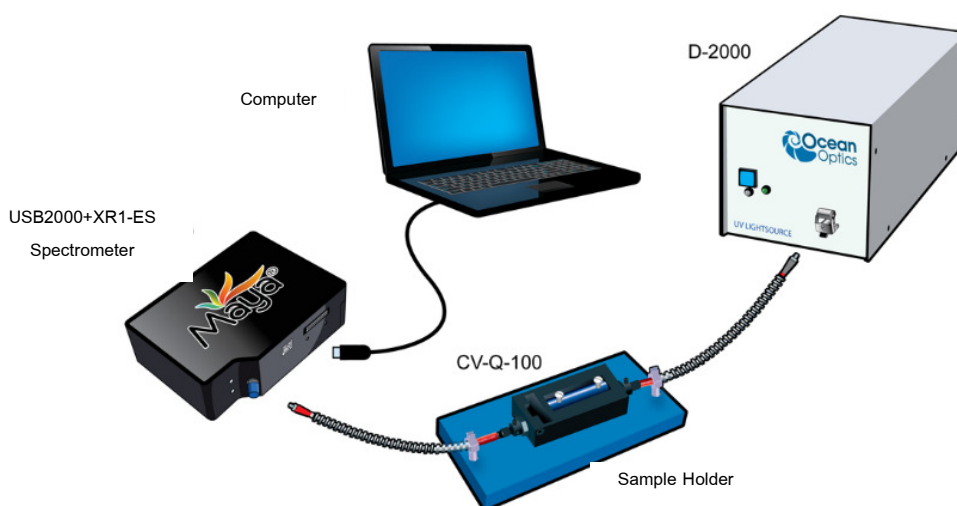
รูปที่ 3.9 ไดอะแกรมเครื่องมือ UV-VIS-NIR spectrophotometer

3.3.3 การวัดสีพลอยด้วยเครื่องมือเชิงแสง

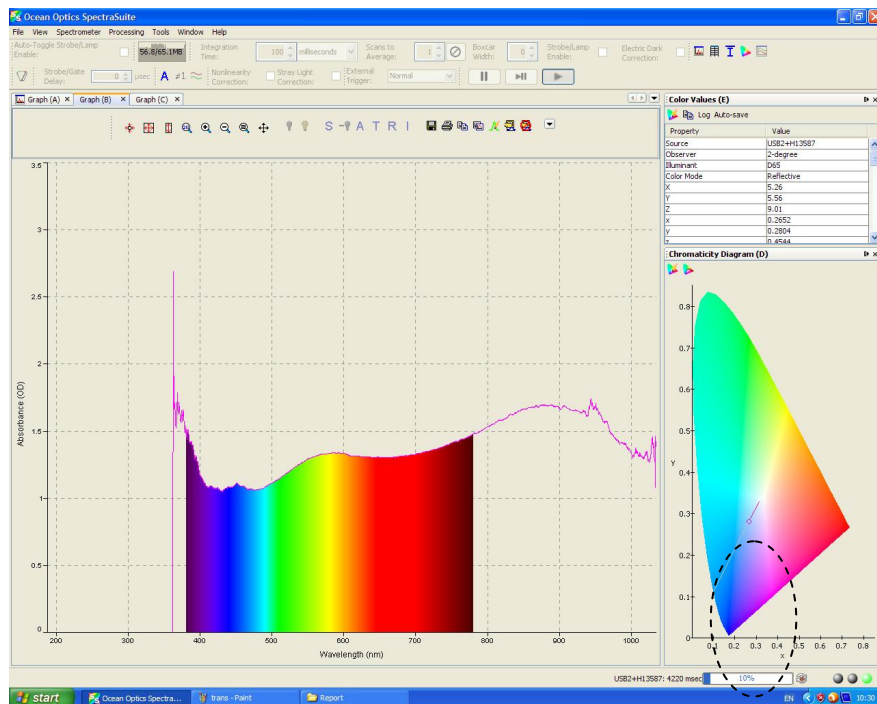
โดยที่เงื่อนไขของความสำเร็จของโครงการนี้ คือ การปรับปรุงคุณภาพความสะอาดภายในเนื้อพลอย และการเปลี่ยนแปลงสีในพลอย หนึ่งในการประเมินที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์ว่าสีมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใด การวิเคราะห์ที่ใช้การเปรียบเทียบกับสีมาตรฐานของ GIA ร่วมกับการวัดสีโดยตรงโดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์จึงเป็นสิ่งจำเป็น โครงการฯ จึงได้ติดตั้งเครื่อง Optical spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics โดยใช้งบประมาณของภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (รูปที่ 3.10) เพื่อนำมาดัดแปลงใช้วัดสีพลอย ผลการใช้งานเบื้องต้นเป็นไปอย่างน่าพอใจสามารถวัดได้ทั้งแบบ absorption, transmission และ reflection ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.11 ผลการวัดสอดคล้องกับเทคนิค UV-Vis-NIR (รูปที่ 3.12)



รูปที่ 3.10 Optical Spectroscopy ของบริษัท Ocean Optics นำมาดัดแปลงเพื่อใช้วัดสี (colorimeter) ของพลอยโดยตรง



รูปที่ 3.11 การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)

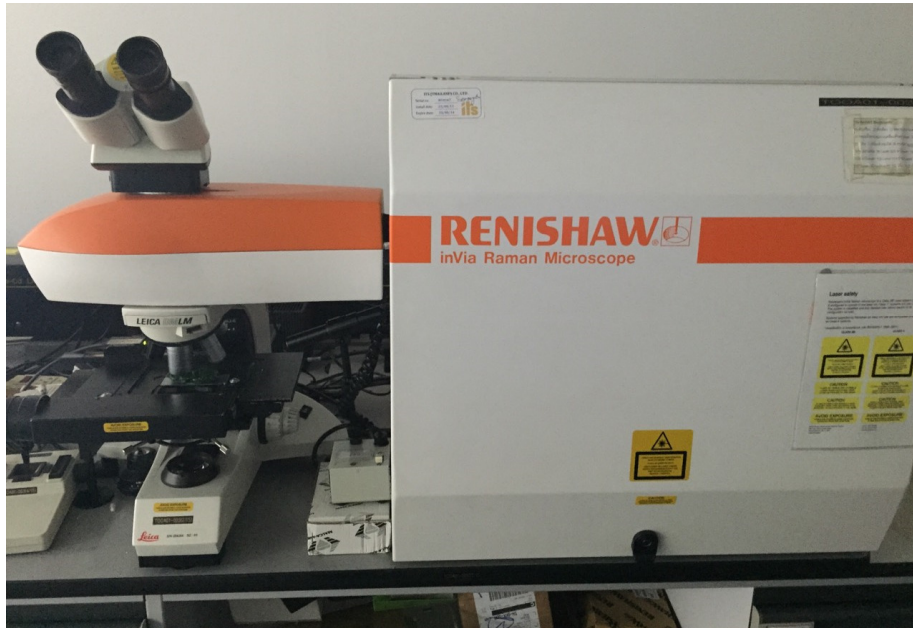


รูปที่ 3.12 กราฟ Absorbance และ Chromaticity diagram ของฟลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่

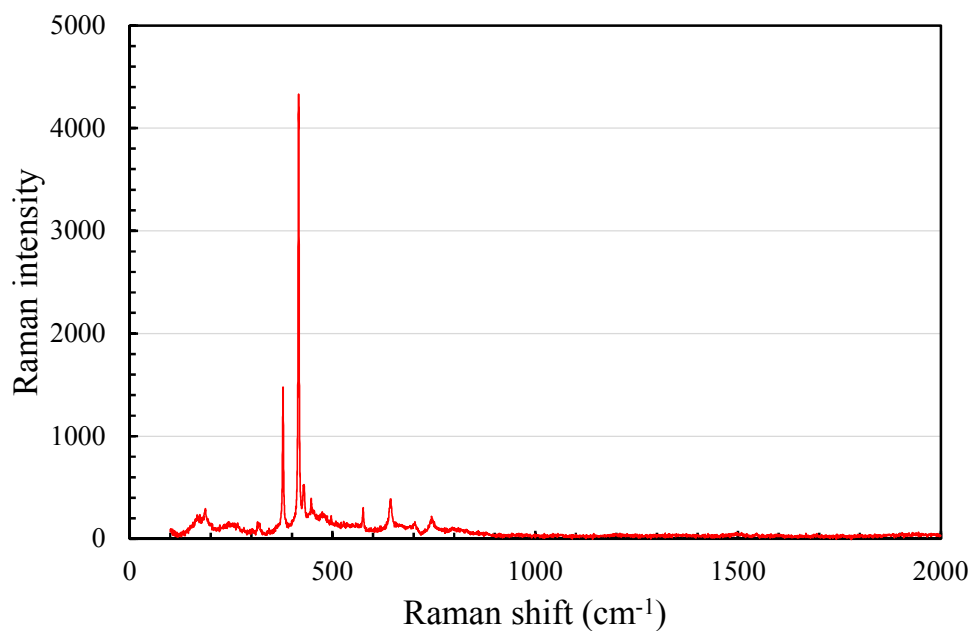
3.4 การศึกษาชนิด มลทินแร่ มลทินของไหลต่างๆ ภายในฟลอย

3.4.1 เทคนิค Raman

รามานเป็นปรากฏการณ์ในการกระเจิงของแสงรูปแบบหนึ่ง ที่เกิดจากการที่แสงตกกระทบวัตถุ ส่งผลทำให้โมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะเร้า นั่นคือ การที่พันธะระหว่างอะตอมในโมเลกุลถูกชักนำให้มีสภาพชั่วหรือ polarizability เปลี่ยนแปลงไป และเมื่อโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สถานะปกติ ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า และไม่มี dipole moment ในพันธะเคมี ก็จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (scattered light) ออกมา 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 โดยที่พลังงานแสงเปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจจะเป็นได้ทั้งแบบเพิ่มขึ้น (anti-stoke scatter) หรือลดลง (stoke scatter) แต่ส่วนใหญ่จะเกิดแบบ stoke scatter มากกว่า สิ่งที่น่าสนใจในส่วนของการกระเจิงแบบรามาน ก็คือการที่ผลต่างของพลังงาน (หรือความถี่) ของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานแสงที่กระเจิง (เรียกว่า Raman shift) จะมีค่าตรงกันกับพลังงาน (หรือความถี่) ของพันธะในการสั่นของโมเลกุลที่วัดได้จากเทคนิคอินฟราเรด เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังในรูปที่ 3.13 ตัวอย่างสเปกตรัมรามานของฟลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินแสดงดังในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 เครื่อง Raman spectroscopy



รูปที่ 3.14 สเปกตรัมรามานของเซฟไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งแพร่หมายเลข PA30

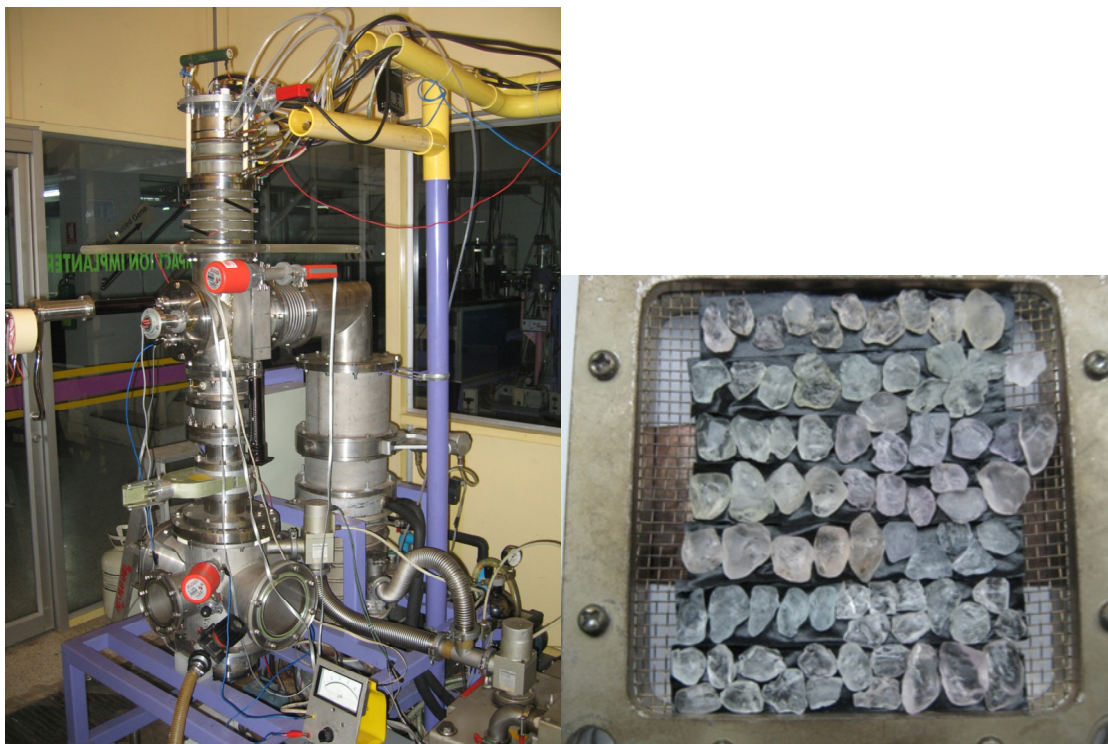
3.5 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมпланเตชัน

ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ไอออนอิมпланเตชัน แบ่งตัวอย่างพลอยเป็น 2 กลุ่มตามขนาดพลังงานไอออนที่ใช้

- ไอออนอิมпланเตชันด้วยไอออนไนโตรเจนในเรซินอีพอกซีด้วยเครื่องเร่งไอออนอิม-
พลานเตอร์ ไอออนที่ใช้ส่วนใหญ่จะมาจากก๊าซ เช่น ไนโตรเจน ซึ่งจากการทดลองเบื้องต้น
พบว่า สามารถเพิ่มสีและถอยสีได้ และยังพบว่าทำให้พลอยดูแวววาวขึ้น และยังสามารถสลายน
มลทินได้ด้วย

- ไอออนอิมพลานเตชันด้วยไอออนไนโตรเจนในเรซินเมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคแทนเตาตรอน ทั้งนี้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลของ nuclear stopping และ electronic stopping ที่มีต่อคุณภาพของฟลอย ไนโตรเจนไอออนที่ใช้ส่วนใหญ่จะมาจากก๊าซ เช่นเดียวกัน

ขั้นตอนวิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงหลังไอออนอิมพลานเตชัน ทำโดยการตรวจสอบสมบัติทางแสง และวิเคราะห์ปริมาณแร่ลทิน และปริมาณธาตุร่องรอย (trace elements) เปรียบเทียบกับก่อนการทดลอง โดยที่กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยการทำให้เกิดการแพร่ของไนโตรเจน หรือออกซิเจน (diffusion of nitrogen or oxygen gas) ในโครงสร้างของฟลอยแซฟไฟร์ ที่อุณหภูมิสูง มีส่วนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Ti^{3+} , Fe^{3+} กับ Ti^{4+} , Fe^{2+} และเข้าแทรกแทนที่ Al^{3+} ทำให้ฟลอยแซฟไฟร์มีสีน้ำเงินขึ้นได้ ดังนั้น ไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจนหรือไนโตรเจน จะทำให้ไนโตรเจน หรือ ออกซิเจนแทรกเข้าไปในเนื้อฟลอยเหนียวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันทำให้ฟลอยมีสีเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน กระบวนการนี้จึงต้องใช้เครื่องมือที่มีไอออนไนโตรเจน หรือ ออกซิเจนที่มากเพียงพอในระหว่างการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 3.15 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดและที่วางตัวอย่างฟลอยตัวอย่าง

3.6 การทดลองอบอ่อน

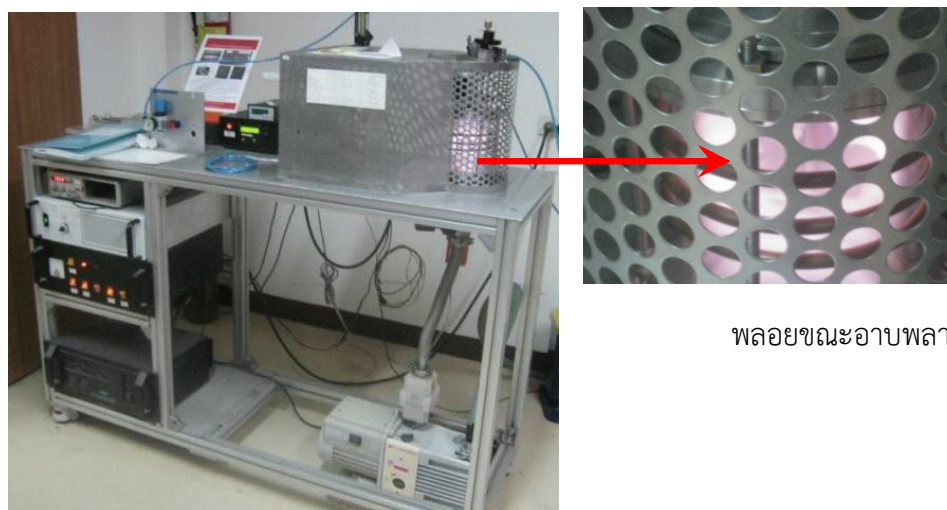
หลังการทดลองด้วยไอออนอิมพลานเตชัน ชิ้นตัวอย่างจะถูกนำมาอบที่อุณหภูมิต่ำ (low temperature annealing) เพื่อเพิ่มพลังงานกระตุ้น (activation energy) ให้กับปฏิกิริยาระหว่างไอออนและอะตอมของชิ้นตัวอย่าง ในการทดลองได้ปรับปรุงเตาอบขนาดเล็กสำหรับฟลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เตาเผาขนาดเล็กอุณหภูมิสูงสุด 1,000 °C พัฒนาสำหรับนำมาอบพลอยที่อุณหภูมิต่ำ

3.7 การทดลองออกซิเจนพลาสมา

การปรับปรุงเครื่อง plasma cleaning สำหรับงานพลอย โดยอาศัย Plasma cleaning เป็นเครื่องทำความสะอาดชิ้นงาน โดยใช้พลาสมาของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ขึ้นกับชนิดชิ้นงาน เมื่อก๊าซถูกทำให้เป็นพลาสมาซึ่งจะกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุ ประจุของพลาสมาจะมีปฏิกิริยา (interaction) กับสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานนั้น เช่น non-visible oil และ อะตอมเล็กๆ อื่นๆ ที่ยึดเหนี่ยวอย่างไม่แข็งแรง (dangling bond) บนผิวตัวอย่าง ทำให้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้หลุดออก ผลพลอยได้เพิ่มเติมคือประจุของพลาสมาอาจทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่บริเวณผิวของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามชนิดของพลาสมานั้น โครงการฯ ได้ปรับปรุงเครื่อง Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลอยได้ (รูปที่ 3.17) เครื่องที่ใช้เป็นเครื่อง ระบบผลิตพลาสมาแบบความดันต่ำ (ประมาณ 1×10^{-2} mbar) ที่มีห้องประยุกต์พลาสมาขนาด 1 ลิตร ระบบประยุกต์ขนาดเล็ก เพื่องานวิจัยและพัฒนาการประยุกต์พลาสมา แก้วสตุทุกรูปแบบ และจากก๊าซทุกประเภท สร้างพลาสมาด้วยคลื่นวิทยุ (13.57 MHz) สามารถปรับความเข้มข้นของพลาสมาได้

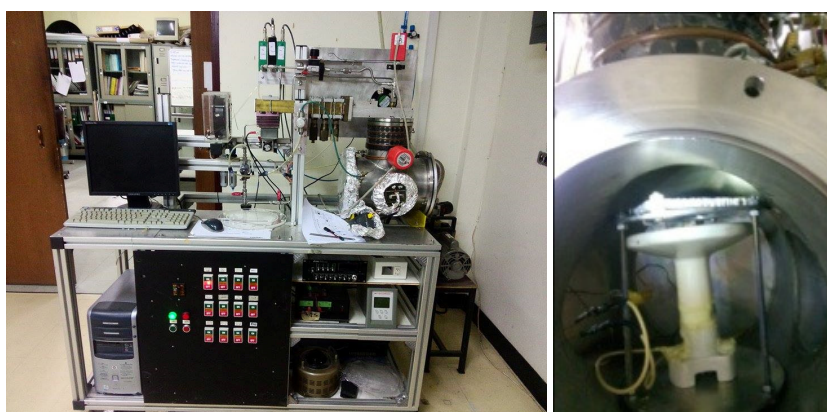


พลอยขณะอบพลาสมา

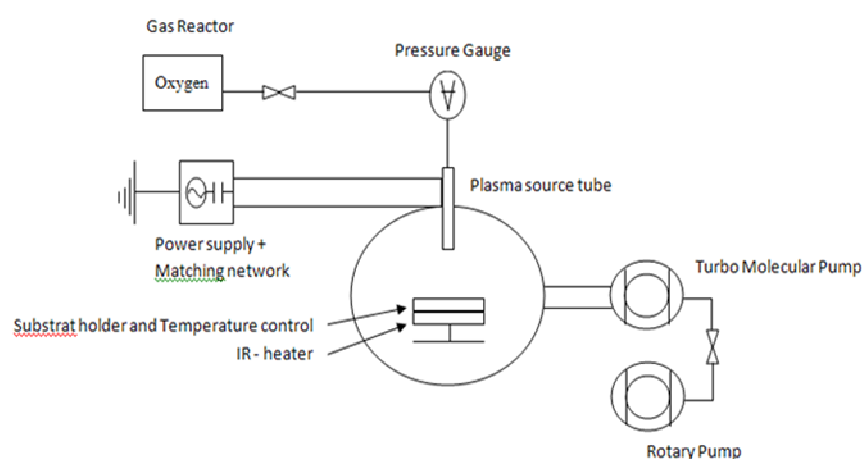
รูปที่ 3.17 Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร

3.8 การทดลองออกซิเจนพลาสมาบ่อ่อน

ดังที่กล่าวแล้วว่า โดยทั่วไปหลังไอออนอิมพลาเนชัน ชิ้นตัวอย่างมักจะต้องนำมาอบที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อเพิ่มพลังงานกระตุ้น ให้กับปฏิกิริยาระหว่างไอออนและอะตอมของชิ้นตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะ ใช้การอบอ่อนด้วยความร้อนจากเตาอบธรรมดาแล้ว ยังทดลองใช้เทคนิคอบอ่อนด้วยพลาสมาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง หรือ เรียกว่าเทคนิคพลาสมาบ่อ่อนอีกด้วย โดยใช้พลาสมาของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ขึ้นกับชนิดชิ้นงาน โดยที่ประจุของพลาสมาจะมีปฏิกิริยากับสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานนั้น ทำให้สิ่ง ปนเปื้อนเหล่านั้นหลุดออก และยังทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่บริเวณผิวของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามชนิด ของพลาสมานั้น การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ยิ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น โครงการฯ ได้ ปรับปรุงเครื่อง Atomic layer deposition (ALD) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ กับพลอยได้ (รูปที่ 3.18) ไดอะแกรมแสดงวิธีการสร้างพลาสมาแสดงดังในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 เครื่องพลาสมาบ่อ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่



รูปที่ 3.19 ไดอะแกรมเครื่องพลาสมาบ่อ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

3.9 การทดลองขึ้นรูปหล่อพร้อมฝัง

การหล่อพร้อมฝังหรือที่เรียกว่า stone in place casting หรือ “in-situ” ซึ่งโดยทั่วไป in-situ หมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน ซึ่งในเทคนิคการฝังพร้อมหล่อ หมายถึง กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้น

พร้อมๆ กันของการฝังอัญมณีและการหล่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของตัวเรือน คือ การที่มีอัญมณีในตัวเรือนพร้อมเสร็จหลังจากการหล่อและสามารถขัดชุบได้ทันที การหล่อมิมีพื้นฐานเหมือนการหล่อโดยทั่วไป แต่มีส่วนที่จะแตกต่างคือ มีการการฝังอัญมณีลงบนเทียนก่อนที่จะทำการหล่อ ดังนั้นวัสดุอุปกรณ์บางอย่างอาจแตกต่างกันบ้าง เช่น ชนิดของปูนหล่อ ลักษณะของ Wax ผู้ที่ทำการผลิตในขั้นตอนนี้จะต้องมีความละเอียดรอบคอบในการทำอย่างมากเพราะความผิดพลาดอาจหมายถึงการสูญเสียอัญมณีในระหว่างขั้นตอนการผลิต

ข้อได้เปรียบของการฝังพลอยบนชิ้นงานเทียน

- สามารถออกแบบได้หลากหลาย และออกแบบใหม่ๆ ได้
- ประหยัดเวลาในการผลิต
- ลดต้นทุนการผลิตได้ถึง 50-80%
- งานที่ได้มีการฝังพลอยที่แข็งแรง และยึดติดแน่น
- ไม่มีรอยขีดข่วน
- สามารถเรียนรู้และศึกษาได้ง่าย

ข้อควรระวังของการฝังพลอยบนชิ้นงานเทียน

- เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย และสูญเสียพลอย
- ไม่สามารถทำได้กับพลอยทุกชนิด
- ยากในการทำความสะอาดและขัดเงา
- หลังจากหล่อแล้วพลอยอาจมีรอยแตกเนื่องจากความร้อนได้

ตัวอย่างเครื่องมือที่ใช้ในการหล่อพร้อมฝังแสดงดังในรูปที่ 3.20 การนำชิ้นงานติดบนต้นเทียน และชิ้นงานหล่อเสร็จแล้วแสดงดังในรูปที่ 3.21



(ก)



(ข)

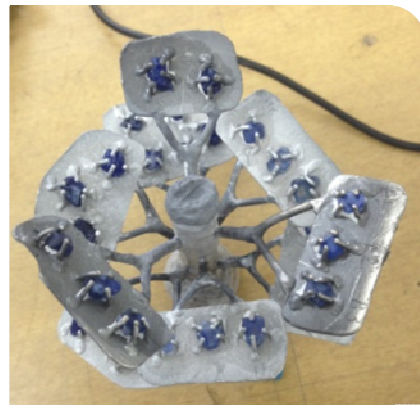


(ค)

รูปที่ 3.20 (ก) Investment mixer (ข) Furnace or Burnout oven (ค) Vacuum Pressure Casting Machine



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.21 (ก) การนำชิ้นงานติดบนต้นเทียน (ข) ชิ้นงานหล่อเสร็จแล้ว

3.10 การขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับต้นแบบ

ขั้นตอนนี้นำพลอยที่ได้ไปออกแบบให้เหมาะสมเป็นเครื่องประดับต้นแบบ ขนาดของพลอยสีและโทนที่เหมาะสม การเจียรระโน จะมีส่วนเพิ่มมูลค่ามากขึ้น โดยการประเมินผลประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์จากงานวิจัยดังนี้

- มูลค่าจากการใช้ประโยชน์ (use value) จากงานวิจัยโดยตรง (direct use value) โดยคิดแยกกลุ่มน้ำหนักและแหล่งพลอย ใช้ต้นทุนราคาพลอยรวมกับค่าเช่าเหมาใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์วันละ 8,500 บาท เทียบกับมูลค่าพลอยหลังทดลอง
- มูลค่าจากการไม่ได้ใช้ประโยชน์ (non-use value) เช่น มูลค่าจากการศึกษาพัฒนานักวิจัย การสร้างเทคโนโลยีใหม่ การสร้างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- มูลค่าเผื่อที่จะใช้ประโยชน์ (option value) เป็นมูลค่าของการเป็นทางเลือกของผู้ประกอบการที่เป็นทางเลือกหากพลอยไม่สามารถใช้วิธีการปรับปรุงคุณภาพแบบอื่นได้หรือจะเก็บไว้ใช้ในอนาคต

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางกายภาพ

4.1.1 ลักษณะพลอยพื้นฐาน

พลอยสีอ่อนที่ใช้ทดลองนี้ที่นำมาศึกษามี 5 แหล่ง ประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) ประกอบด้วยพลอยแหล่งกิวต้าประเทศศรีลังกา พลอยแหล่งดิเอโกประเทศมาดากัสการ์ แหล่งประเทศเวียดนาม จะเป็นพลอยดิบที่คาดว่าเมื่อเผาแล้วให้สีน้ำเงิน พลอยในกลุ่มดังกล่าวนี้พบว่า ส่วนใหญ่มีสีอ่อน กึ่งโปร่งแสง มีตำหนิภายใน เช่น รอยแตกและเส้นเข็มจำนวนมากทำให้เกิดเป็นสีขาวขุ่นนํ้านม เมื่อผ่านกระบวนการเผาอุณหภูมิสูงและลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว เพื่อจุดประสงค์ให้ได้พลอยสีน้ำเงิน เนื้อพลอยใส แต่จะพบว่า นอกจากพลอยจะไม่มีสีน้ำเงินเพิ่มขึ้น พลอยกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะแตกร้าวซึ่งผู้ประกอบการแจ้งว่าเป็นปัญหาส่วนใหญ่ของการทำให้พลอยใส พลอยกลุ่มนี้จะถูกซื้อปะปนมากับพลอยดิบ เพราะมีความคล้ายคลึงกับกลุ่มที่เมื่อเผาแล้วจะได้สีน้ำเงิน เนื้อใส อย่างไรก็ตามเพื่อเปรียบเทียบการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน พลอยทดลองจะประกอบด้วยพลอยที่ผ่านกระบวนการดังกล่าว เลือกตัวอย่างที่มีการแตกร้าวน้อยที่สุดและยังคงสังเกตเห็นสีอ่อนที่ยังมีในเนื้อพลอย โดยใช้พลอยจากแหล่งพลอยกิวต้า ประเทศศรีลังกา จำนวน 30 เม็ด ขนาด 6-9 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะพลอยตัวอย่างแหล่งกิวตา ศรีลังกาผ่านการให้ความร้อนสูงและลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (ถ่ายภาพโดย เสวต อินทศิริ)

ส่วนพลอยไม่ได้ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใดๆ หรือพลอยก้อนสดผู้ประกอบการแจ้งว่ากลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะไม่สามารถเผาให้สีเข้มขึ้นได้ ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สดประเภทไร้สี (Colorless) ประกอบด้วยพลอยกิวต้า ศรีลังกาจำนวน 398 เม็ด และมีขนาดตั้งแต่ 3.5-10.2 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



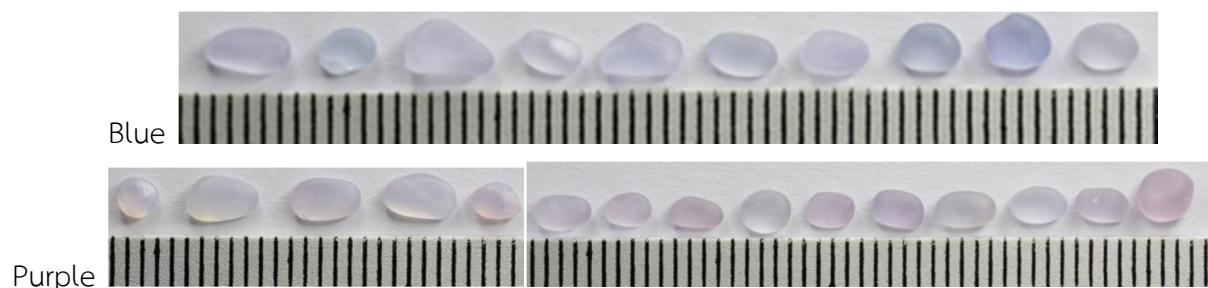
รูปที่ 4.2 ลักษณะพลอยตัวอย่าง จากแหล่งกิวตา ศรีลังกา (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิริรินทร์ บุญแต่ง)

ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) โทนต่างๆ จากแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์จำนวน 217 เม็ด และมีขนาดตั้งแต่ 7.5-12.2 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์ (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิรินทร์ บุญแต่ง)

ส่วนพลอยแซฟไฟร์สดประเภทไร้สี (Colorless) หรือที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) โทนสีฟ้าอ่อนและสีชมพู ตัวอย่างแหล่งประเทศเวียดนาม จำนวน 203 เม็ด ขนาดตั้งแต่ 4.5-6.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.4 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งประเทศเวียดนาม (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิรินทร์ บุญแต่ง)

นอกจากนั้นตัวอย่างพลอยจากแหล่งอำเภอเด่นชัยจังหวัดแพร่ จำนวน 57 เม็ด ซึ่งส่วนใหญ่จะมีสีฟ้าอ่อน และเนื้อค่อนข้างทึบแสง มีมลทินจำนวนมาก มีขนาดพลอย อยู่ระหว่าง 5 -11.5 มิลลิเมตร



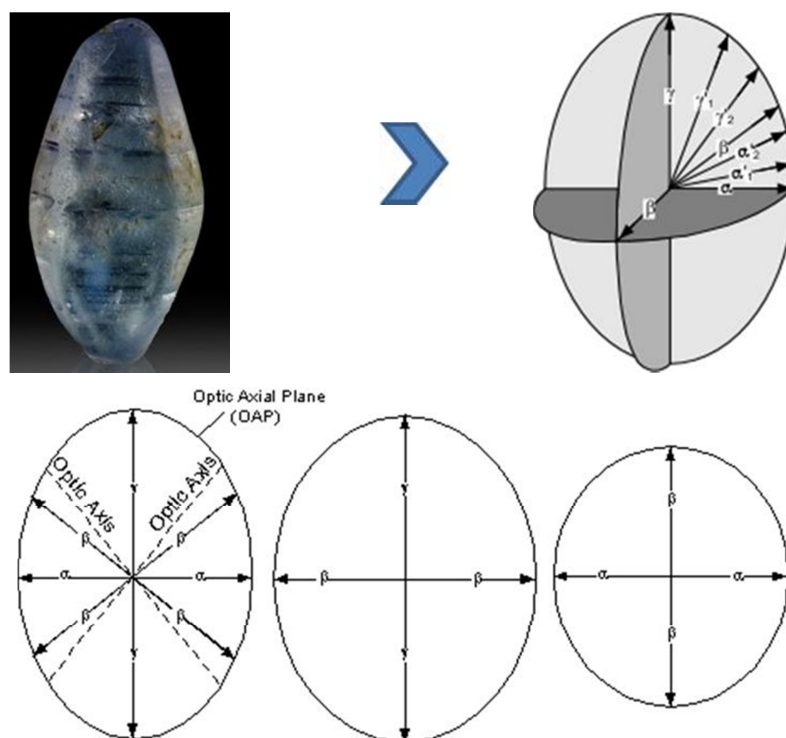
รูปที่ 4.5 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งเด่นชัยประเทศไทย (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิรินทร์ บุญแต่ง)

พลอยดิบเนื้อใส สีอ่อนหลากหลายโทน เจียระไนแล้ว จากแหล่งมาบิล่าประเทศไนจีเรียจำนวน 95 เม็ด ขนาดพลอย 6.3-9.7 มิลลิเมตร

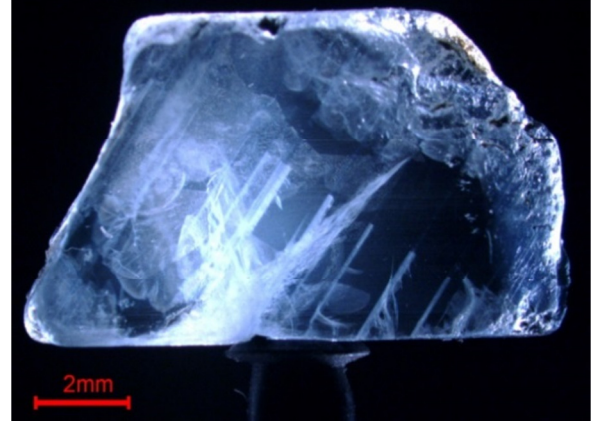
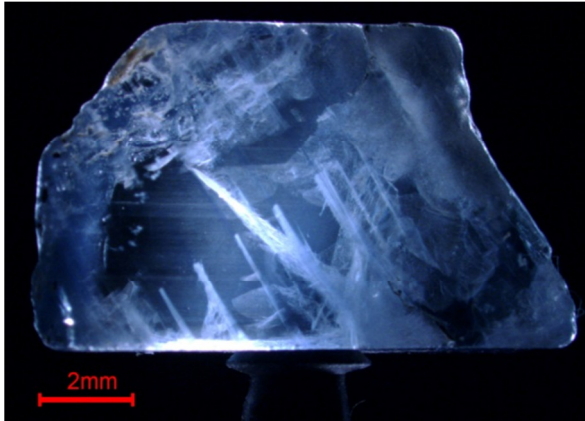


รูปที่ 4.6 ลักษณะพลอยตัวอย่างจากแหล่งมาบิล่าประเทศไนจีเรีย (ถ่ายภาพโดย พงศ์ศิริรินทร์ บุญแต่ง)

หลังจากพลอยตัวอย่างจากแหล่งต่างๆ ถูกจัดแบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา ลงรหัสของพลอย จากนั้นนำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางอัญมณีทั่วไป โดยใช้เครื่องมือพื้นฐานทางอัญมณี ได้แก่ เครื่องวัดขนาด เครื่องชั่งน้ำหนัก เครื่องวัดความถ่วงจำเพาะ เครื่องวัดค่าดัชนีหักเห และหลอดฉายรังสีเหนือม่วง เพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วงของพลอยคอร์ันดัมทั่วไป นอกจากนั้นมีการตรวจสอบสี จากชุดเทียบสีมาตรฐานของ GIA (Gemological Institute of America) สำหรับการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์ เนื่องจากพลอยคอร์ันดัมจะมีแนวแกนแสง (แกน C) หากมองในทิศขนานกับแกนแสง ช่างเจียระไนเรียกว่า น้ำหนามองในทิศตั้งฉากกับแกนแสงเรียกว่า น้ำข้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ดังนั้นพลอยบางตัวอย่างจะถูกนำไปเจียระไนเปิดหน้าพลอย ให้ตั้งฉากกับกับแกนแสง (O-ray) หรือ 0 องศา และในทิศทางที่ขนานกับแกนแสง (E-ray) หรือ 90 องศา ขนานกันทั้งสองด้าน ดังรูป 4.8 บันทึกภาพทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เพื่อไว้เปรียบเทียบกับก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน จากนั้นพลอยจะนำไปศึกษาสมบัติเชิงเคมี สมบัติเชิงแสง และลักษณะมลทินต่อไป



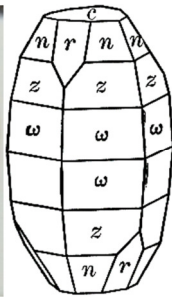
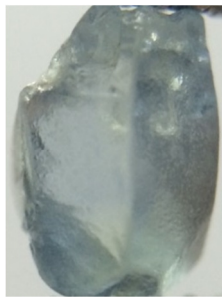
รูปที่ 4.7 แสดงแนวแกนแสงของพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติ



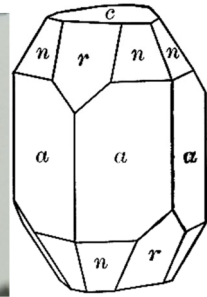
รูปที่ 4.8 พลอยแซฟไฟร์ดิบสีฟ้าอ่อนจากแหล่งอำเภอด่นชัย จังหวัดแพร่ ตัวอย่างพลอยรหัส PRA03 หลังจากเจียรไนเปิดหน้าแล้ว นำมาบันทึกภาพทั้ง (ก) ด้านหน้าและ (ข) ด้านหลัง ถ่ายโดยกล้องไมโครสโคปกำลังขยายต่ำ (10x) (ภาพโดย เสวต อินทศิริ)

4.1.2 นิสัยรูปผลึก (Crystal Habits)

พลอยตัวอย่างส่วนใหญ่ มีรูปร่างไม่แน่นอน แต่มีบางตัวอย่างยังคงรักษารูปผลึกให้เห็นบ้าง นิสัยรูปผลึกที่พบแสดงดังในรูปที่ 4.9



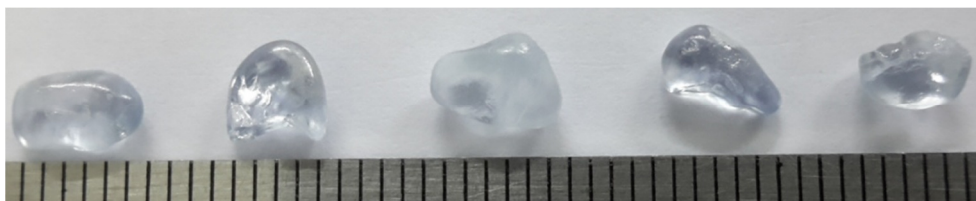
ก รูปถังเปียร์
(Barrel-shaped crystals)



ข รูปปริซึมหกเหลี่ยมยาว
(Combination of prism-dipyramid and basalpinacoids)

รูปที่ 4.9 ลักษณะนิสัยรูปผลึกของพลอยตัวอย่างจากแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์

ส่วนลักษณะพลอยก้อนดิบตัวอย่างจากแหล่งศรีลังกา และเวียดนามส่วนใหญ่มีลักษณะมน อันเนื่องจากการขัดสีโดยกระบวนการกัดกร่อนที่เกิดจากการผุพังของหินแหล่งกำเนิด ซึ่งเป็นลักษณะของพลอยจากแหล่ง ทุติยภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



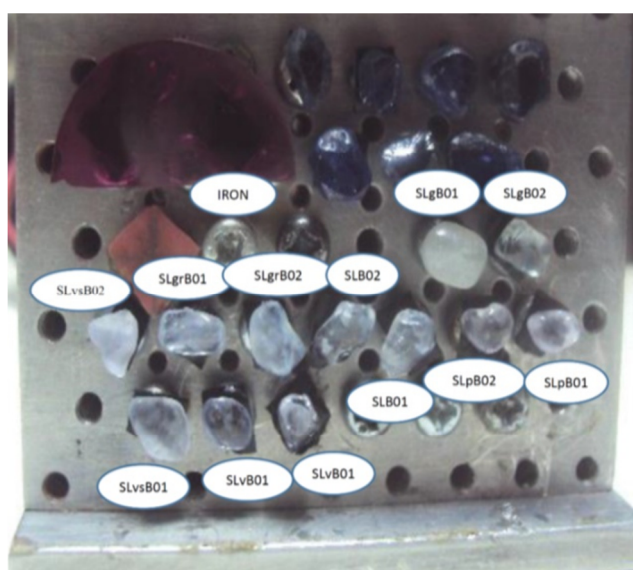
รูปที่ 4.10 ลักษณะพลอยตัวอย่างส่วนใหญ่จากแหล่งประเทศเวียดนาม

4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมี

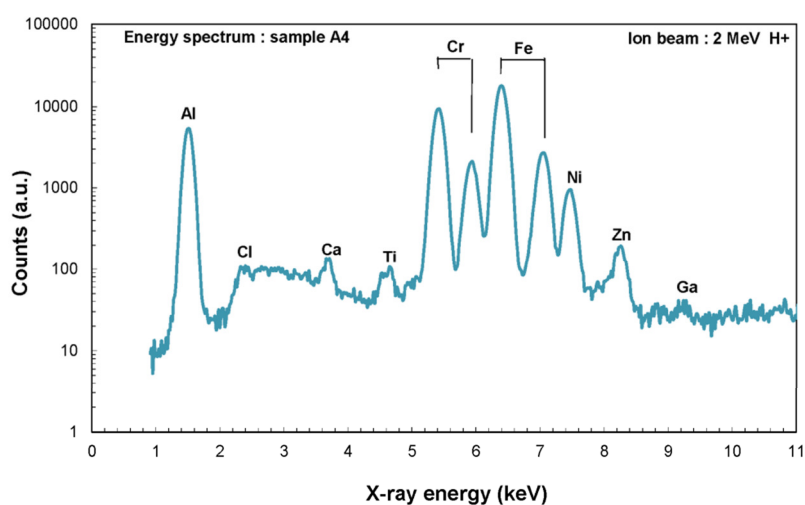
การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบในตัวอย่างพลอย ประกอบด้วยปริมาณธาตุหลัก (Main elements) และธาตุส่วนน้อย (Trace elements) โดยจะเลือกวิเคราะห์ด้วย 3 เทคนิค บริเวณที่ต้องการทราบรายละเอียดของธาตุองค์ประกอบ ควรทำความสะอาดและขัดผิวตัวอย่างให้เรียบสม่ำเสมอ

4.2.1 การตรวจวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค PIXE

ตัวอย่างพลอยจะถูกวางในทิวางที่มีแกนวัดตำแหน่ง ดังแดงในรูปที่ 4.11 เทคนิค PIXE แสดงผลการวิเคราะห์พลอยแซฟไฟร์ไร้สีจากแหล่งศรีลังกา ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าธาตุองค์ประกอบหลักในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อน ได้แก่ อลูมิเนียม(Al) ส่วนธาตุส่วนน้อย ประกอบด้วยไทเทเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) แกลเลียม (Ga)โครเมียม (Cr) วานาเดียม(V) นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 ทิวางพลอยสำหรับวัดธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค PIXE



รูปที่ 4.12 สเปกตรัม PIXE ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนจากศรีลังกา SLB02

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีจากแหล่งศรีลังกาด้วยเทคนิค PIXE(%wt)

รหัสพลอย	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	Cu ₂ O	ZnO	Ga ₂ O ₃	ZrO ₂
SLB01	96.1394	3.5075	0.0000	0.0174	0.0000	0.0326	0.0164	0.0000	0.0042	0.0057	0.2400	0.0000	0.0023	0.0224	0.0122	0.0000
SLB02	99.6106	0.0000	0.0000	0.0288	0.0231	0.0551	0.0359	0.0037	0.0058	0.0021	0.1871	0.0025	0.0023	0.0285	0.0141	0.0000
SLGB01	99.5852	0.0000	0.0000	0.0207	0.0237	0.0385	0.0470	0.0000	0.0075	0.0028	0.2703	0.0044	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
SLGB02	99.1845	0.0000	0.0000	0.0107	0.0321	0.0537	0.0941	0.0000	0.0000	0.0000	0.5833	0.0112	0.0000	0.0109	0.0192	0.0000
SLGRB01	99.6508	0.0000	0.0000	0.0210	0.0000	0.0195	0.0457	0.0057	0.0081	0.0000	0.2136	0.0000	0.0000	0.0199	0.0157	0.0000
SLGRB02	99.6612	0.0000	0.0000	0.0159	0.0096	0.0311	0.0208	0.0000	0.0007	0.0006	0.2308	0.0020	0.0000	0.0145	0.0051	0.0065
SLPB01	99.6185	0.0000	0.0000	0.0210	0.1178	0.0472	0.0247	0.0031	0.0135	0.0028	0.1318	0.0000	0.0036	0.0038	0.0123	0.0000
SLPB02	98.9219	0.0000	0.4516	0.0309	0.0332	0.0438	0.0736	0.0062	0.0187	0.0000	0.3947	0.0000	0.0000	0.0081	0.0173	0.0000
SLVB01	99.6543	0.0000	0.0000	0.0172	0.0000	0.0303	0.0501	0.0000	0.0099	0.0028	0.2275	0.0000	0.0000	0.0000	0.0080	0.0000
SLVB02	99.2746	0.0000	0.0000	0.0218	0.0000	0.1630	0.0152	0.0054	0.0057	0.0311	0.4241	0.0000	0.0055	0.0302	0.0236	0.0000
SLVSB01	99.6655	0.0000	0.0000	0.0540	0.0472	0.0431	0.0298	0.0074	0.0179	0.0031	0.1090	0.0018	0.0000	0.0102	0.0112	0.0000
SLVSB02	99.4098	0.0000	0.0000	0.0380	0.0539	0.0563	0.0373	0.0074	0.0162	0.0039	0.3425	0.0000	0.0101	0.0088	0.0158	0.0000
เฉลี่ย	99.1980	0.2923	0.0376	0.0248	0.0284	0.0512	0.0409	0.0032	0.0090	0.0046	0.2796	0.0018	0.0020	0.0131	0.0129	0.0005

4.2.2 การตรวจวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF)

หลักการตรวจสอบสมบัติทางเคมีด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) สามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ธาตุโซเดียมจนถึงธาตุยูเรเนียม ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์พลอย ทำให้สะดวกสำหรับการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ หลักการของเทคนิคนี้ คือ ให้รังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดเข้าไปชนสารตัวอย่าง รังสีเอกซ์จะทำให้อิเล็กตรอนในวงในสุดของอะตอมของธาตุหลุดออกไป อิเล็กตรอนในวงถัดมาจะเข้ามาแทนที่ และคายพลังงานส่วนเกินออกมาในลักษณะของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ ซึ่งจะมีค่าพลังงานเป็นค่าเฉพาะของตัวของธาตุนั้น เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และความเข้มข้นของเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์ที่เกิดขึ้นจะเป็นพื้นฐานการวิเคราะห์เชิงปริมาณ การทดลองของโครงการได้ทดลองใช้เครื่องมือ EDXRF ของสถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ร่วมกับ เครื่องมือของบริษัท Helmut Fischer (Thailand) Co., Ltd. ตรวจสอบปริมาณธาตุเจือในพลอยโดยเจียรเนเปิดหน้า ตั้งแกนแสง อีกทั้งกำหนดการวัดหลายตำแหน่งในตัวอย่างเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ใช้ทดสอบตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีอ่อน จากแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ ที่มีเนื้อใสค่อนข้างสม่ำเสมอ สีอ่อน และตารางที่ 4.2 พบว่ามีปริมาณ FeO, TiO₂ และ Ga₂O₃ คือ 0.321, 0.0021 และ 0.0248 ตามลำดับ

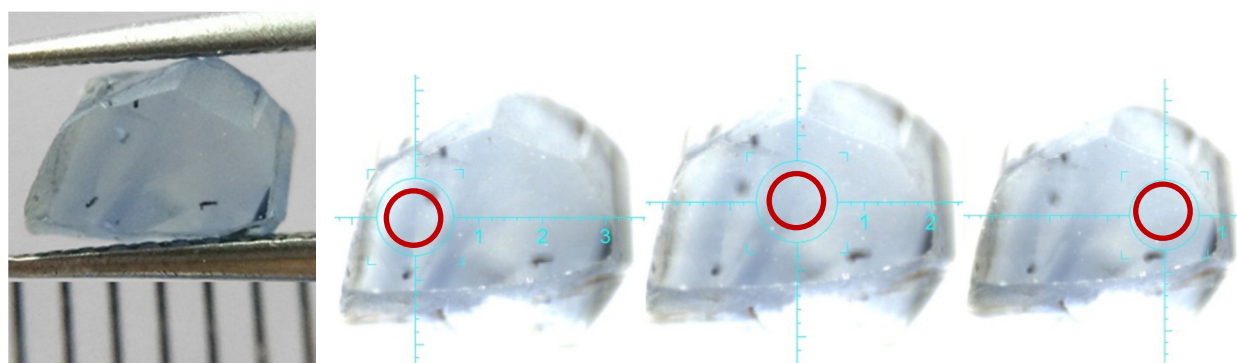


รูปที่ 4.13 ตัวอย่างพลอย MDB01จากแหล่งดีเอโก มาดาร์กัสการ์

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน จากพลอยแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)

ตำแหน่ง	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	CuO	FeO	Ga ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO
1	99.6210	0.0161	-	0.0063	0.3671	0.0288	0.0001	0.0007	0.0007
2	99.7086	-	-	0.0025	0.3160	0.0208	0.0001	0.0020	0.0025
3	99.7143	-	-	0.0013	0.3059	0.0261	0.0001	0.0008	0.0009
4	99.6932	0.0083		0.0027	0.3012	0.0235	0.0001	0.0007	0.0008
เฉลี่ย	99.6843	0.0021	-	0.0032	0.3226	0.0248	0.0001	0.0010.7	0.0012

นอกจากนั้น ได้ใช้ทดสอบตัวอย่าง MDB03 พลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน แต่เนื้อมีความขุ่น จากแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ ที่มีสีค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ แสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.3 พบว่ามีปริมาณ FeO, TiO₂ และ Ga₂O₃ คือ 0.274, 0.00 และ 0.024 ตามลำดับ จะเห็นว่าไม่มีปริมาณของแร่ ไทเทเนียม

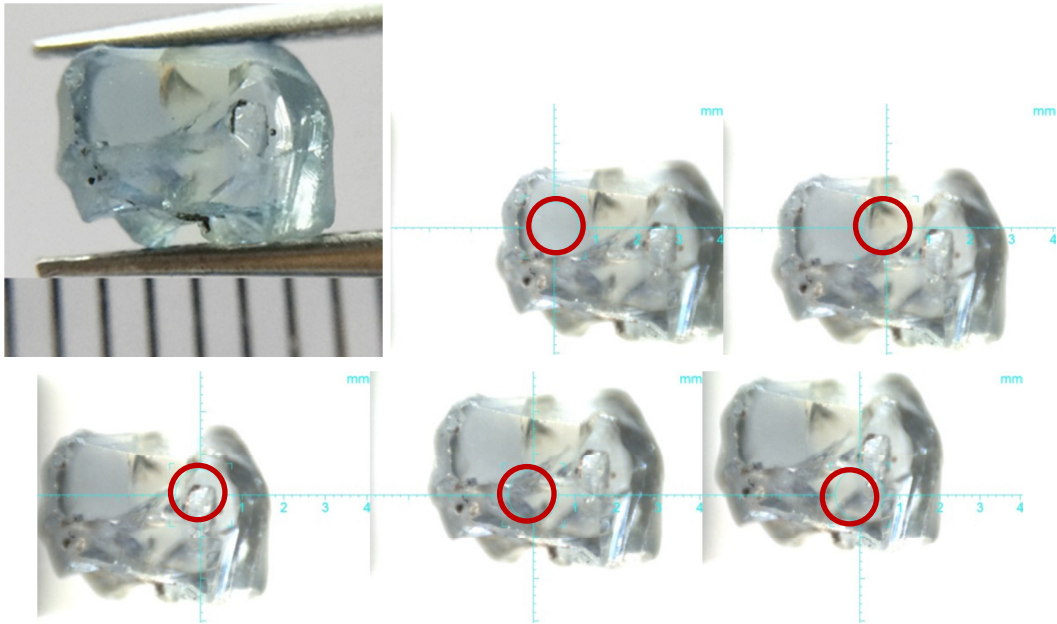


รูปที่ 4.14 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDB03 จากแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDB03 จากพลอยแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)

ตำแหน่ง	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	CuO	FeO	Ga ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO
1	99.7173	-	-	0.0026	0.291	0.0270	0.0001	0.0007	0.0009
2	99.7412	-	-	0.0019	0.2811	0.0158	0.0001	0.0027	0.0027
3	99.7467	0.0009	-	0.0024	0.2487	0.0283	0.0001	0.0025	0.001
เฉลี่ย	99.7351	0	-	0.0023	0.2736	0.0237	0.0001	0.0020	0.0016

เมื่อทดสอบตัวอย่าง MDB04 พลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อนอมเขียว ที่มีสีค่อนข้างไม่สม่ำเสมอ เนื้อใสมีหย่อมสีเหลืองจาง จากแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ แสดงในรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.4 พบว่ามีปริมาณ FeO, TiO₂ และ Ga₂O₃ คือ 0.289, 0.004 และ 0.026 ตามลำดับ จะเห็นว่าไม่มีปริมาณของแร่ ไทเทเนียม



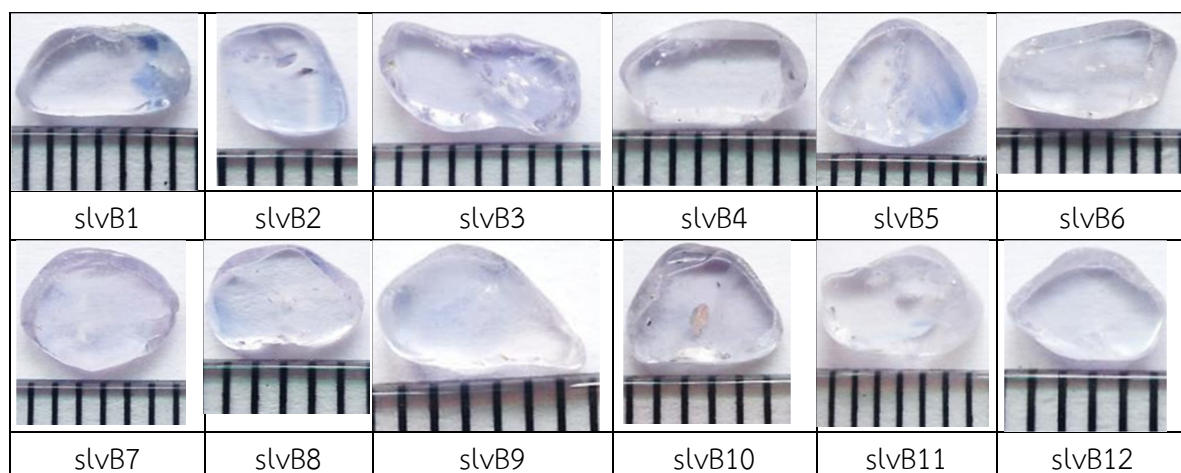
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDA04 จากแหล่งดีเอโก มาดาร์กัสการ์

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน MDA04 จากพลอยแหล่งดีเอโก ประเทศมาดากัสการ์ ด้วยเทคนิค EDXRF (%wt)

ตำแหน่ง	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₃	CuO	FeO	Ga ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO
1	99.6767	-	-	0.0025	0.3092	0.0459	0.0001	0.0008	0.0007
2	99.6377	0.0028	-	0.0021	0.3554	0.0327	0.0001	0.0021	0.0020
3	99.7735	0.0145	-	0.0019	0.1633	0.0074	0.0001	0.0092	0.0018
4	99.6646	0.0020			0.3298	0.0301	0.0001	0.0008	0.0008
5	99.7145	0.0013			0.2875	0.0136	0.0001	0.0025	0.0025
เฉลี่ย	99.6934	0.0041	-	0.0022	0.2891	0.0259	0.0001	0.0031	0.0047

จากผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 4.2-4.4 ซึ่งแสดงในตัวอย่างพลอยแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์ พบว่าพลอยที่มีเนื้อใส สม่ำเสมอ การวัดแยกตำแหน่งกันไม่มีผลให้ปริมาณของธาตุองค์ประกอบแตกต่างกัน แต่หากมีสีที่ไม่สม่ำเสมอ หรือ หย่อมสีจะพบว่าปริมาณธาตุให้สีมีผลอย่างชัดเจน ส่วนในกรณีของพลอยจากแหล่งศรีลังกา ที่มีโทนฟ้าอ่อน และมี ลักษณะ เช่นเดียวกับพลอยของแหล่งดีเอโก มีทั้งเนื้อใส (ตัวอย่างที่ slvB1-slvB6) เนื้อขุ่น(ตัวอย่างที่ slvB7-slvB12) ดังตารางที่ 4.5 พบว่าผลการวัดด้วย EDXRF ดังตารางที่ 4.6 ให้ผลลักษณะเช่นเดียวกันคือ สีฟ้าจาก FeO และ TiO₂ แต่ปริมาณธาตุให้สีมีค่าต่ำกว่าจากแหล่งดีเอโก มาดากัสการ์ ดังนั้นในการจัดกลุ่มสีพลอยจะพบว่า ผลการ ทดลองตารางที่ 4.5-4.12 ที่เลือกใช้พลอยสีอ่อนสม่ำเสมอ โทนสีเดียวกัน พบว่าในแต่ละกลุ่มที่มีโทนสีเดียวกัน จะมี องค์ประกอบทางเคมีธาตุให้สีที่ใกล้เคียงกันมาก เช่นกลุ่มที่มีโทนชมพู โทนม่วงจะมีธาตุโครเมียม ส่วนกลุ่มโทนสีฟ้า เข้ม ฟ้าอ่อนและสีฟ้าอมเขียว จะมีธาตุเหล็กสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ

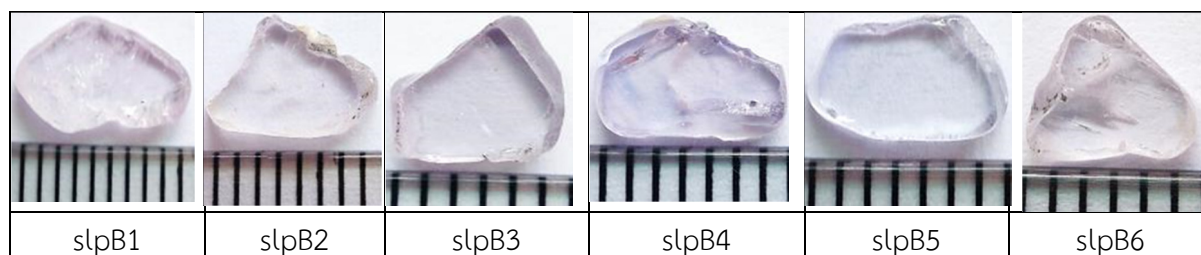
ตารางที่ 4.5 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา

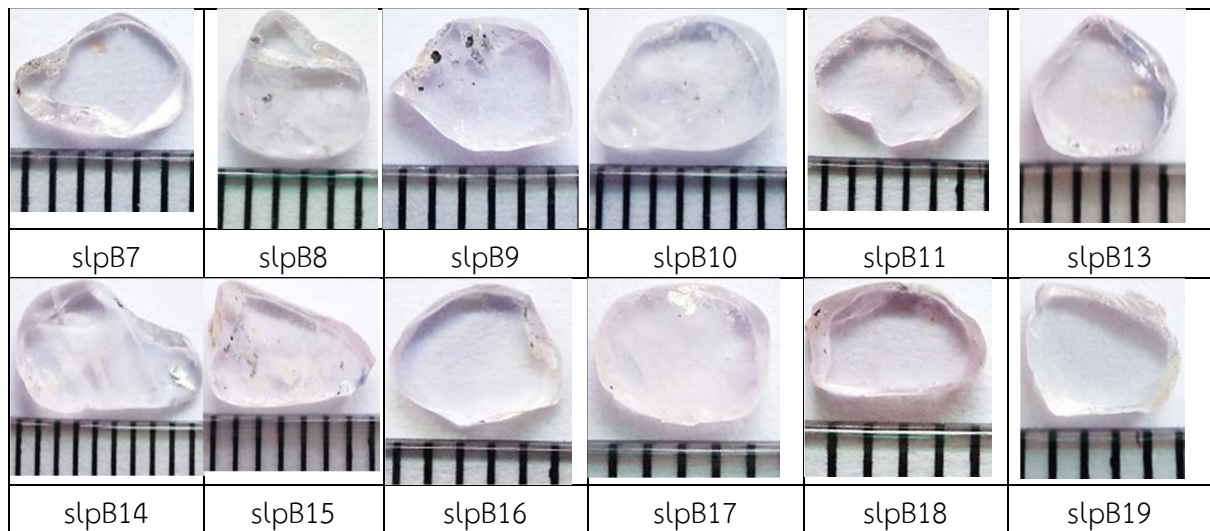


ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา

รหัส	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
slvB1	99.52	0.30	0.00	0.01	0.11	0.05	99.99
slvB2	99.88	0.03	0.01	0.01	0.06	0.02	100.01
slvB3	99.84	0.027	0.01	0.01	0.10	0.02	100.007
slvB4	99.81	0.02	0.01	0.05	0.10	0.01	100
slvB5	99.54	0.03	0.01	0.35	0.05	0.02	100
slvB6	99.83	0.05	0.01	0.01	0.09	0.01	100
slvB7	99.85	0.02	0.01	0.01	0.10	0.02	100.01
slvB8	99.87	0.03	0.01	0.02	0.05	0.02	100
slvB9	99.88	0.03	0.01	0.02	0.05	0.02	100.01
slvB10	99.77	0.01	0.01	0.01	0.19	0.01	100
slvB11	99.88	0.02	0.00	0.01	0.08	0.01	100
slvB12	99.86	0.04	0.01	0.01	0.07	0.01	100
เฉลี่ย	99.7942	0.05058	0.00833	0.04333	0.0875	0.01833	100.002

ตารางที่ 4.7 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา

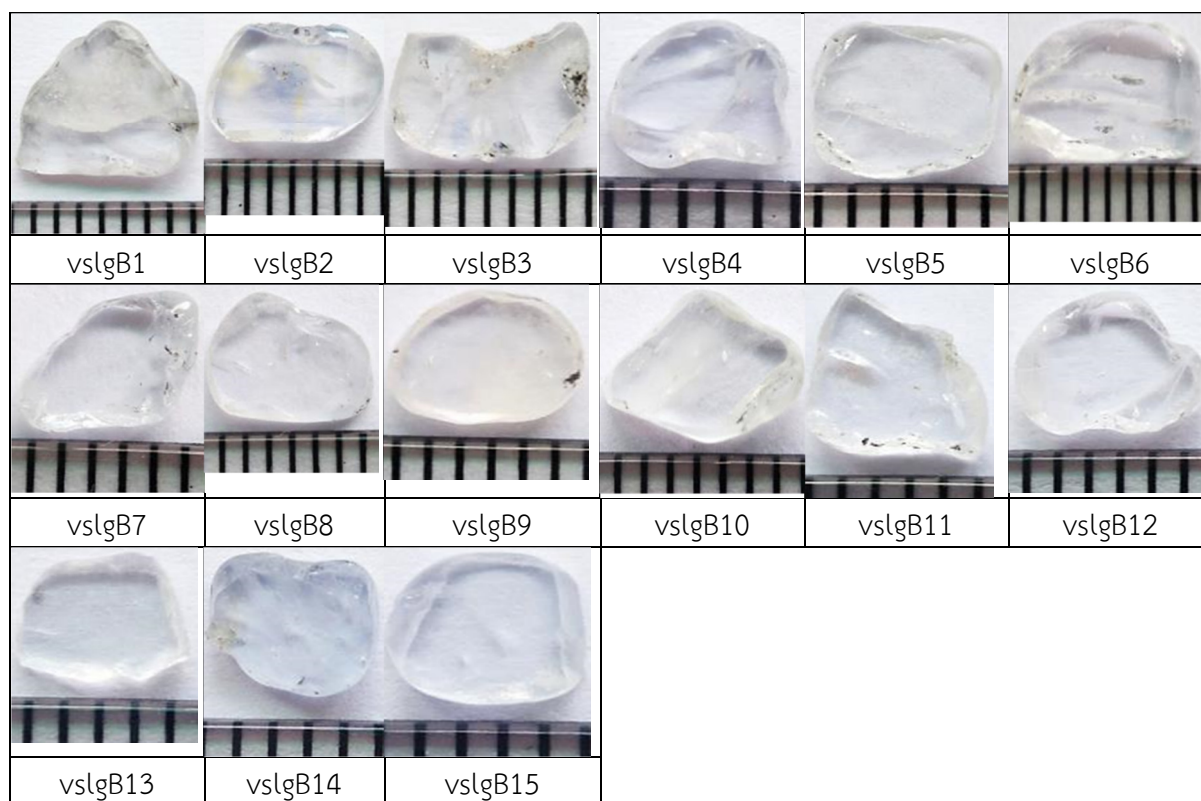




ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา

รหัส	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
slpB1	99.89	0.02	0.02	0.01	0.05	0.1	100.09
slpB2	99.90	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	100
slpB3	99.66	0.01	0.00	0.01	0.31	0.01	100
slpB4	99.82	0.03	0.01	0.01	0.06	0.07	100
slpB5	99.88	0.01	0.01	0.02	0.08	0.01	100.01
slpB6	99.89	0.02	0.01	0.01	0.06	0.01	100
slpB7	99.58	0.06	0.00	0.16	0.17	0.03	100
slpB8	99.46	0.03	0.00	0.26	0.21	0.04	100
slpB9	99.85	0.01	0.01	0.05	0.05	0.03	100
slpB10	99.88	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01	99.99
slpB11	99.88	0.02	0.01	0.01	0.06	0.01	99.99
slpB13	99.87	0.02	0.00	0.01	0.08	0.02	100
slpB14	99.88	0.03	0.01	0.01	0.05	0.02	100
slpB15	99.84	0.04	0.01	0.03	0.07	0.02	100.01
slpB16	99.93	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	99.99
slpB17	99.80	0.10	0.01	0.01	0.05	0.04	100.01
slpB18	99.87	0.03	0.01	0.01	0.05	0.02	99.99
slpB19	99.83	0.03	0.01	0.03	0.08	0.01	99.99
เฉลี่ย	99.8172	0.02833	0.00833	0.03667	0.08722	0.02611	100.004

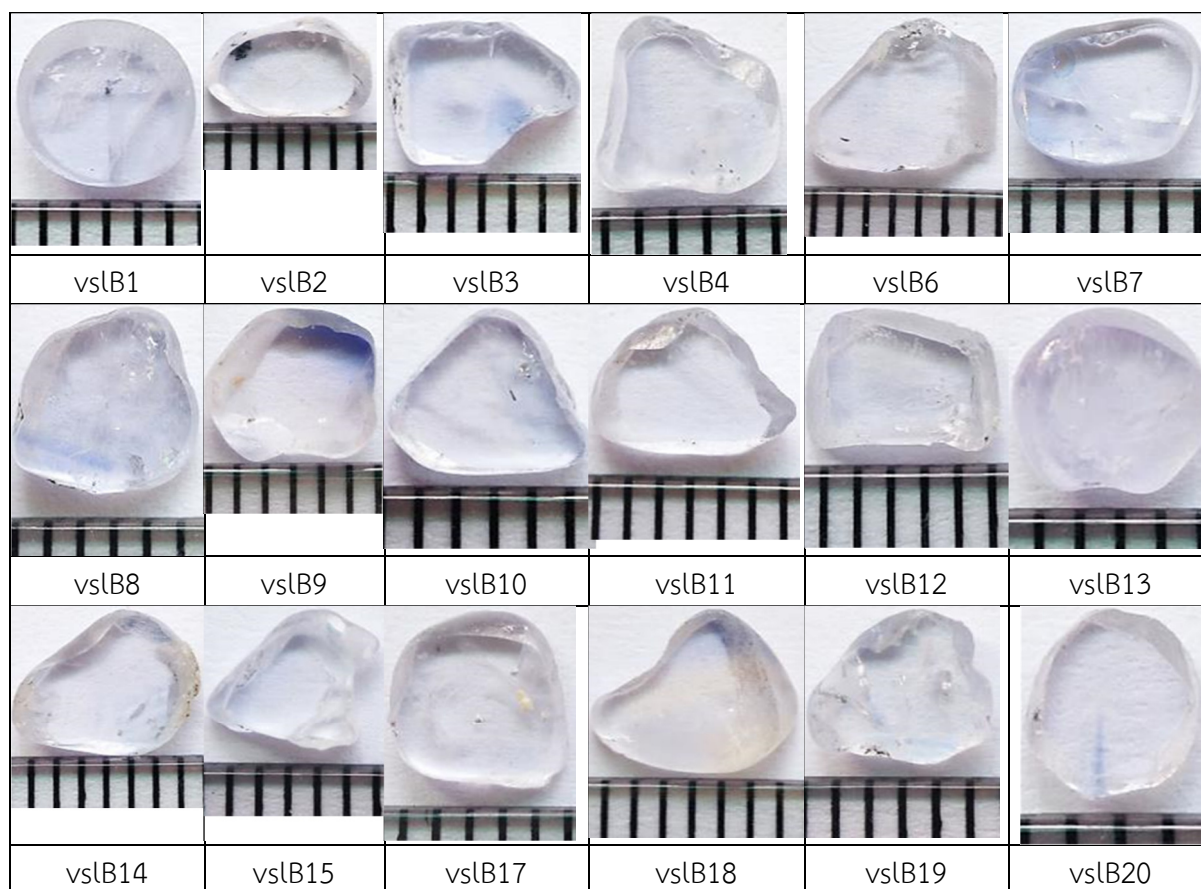
ตารางที่ 4.9 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนเขียว จากแหล่งศรีลังกา



ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนเขียว จากแหล่งศรีลังกา

รหัส	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
vslgB1	99.88	0.03	0.01	0.01	0.06	0.02	100.01
vslgB2	99.90	0.00	0.05	0.00	0.04	0.01	100
vslgB3	99.86	0.02	0.01	0.00	0.08	0.02	99.99
vslgB4	99.83	0.01	0.00	0.00	0.15	0.01	100
vslgB5	99.83	0.09	0.00	0.00	0.07	0.01	100
vslgB6	99.89	0.02	0.01	0.01	0.07	0.01	100.01
vslgB7	99.46	0.41	0.00	0.01	0.07	0.05	100
vslgB8	99.81	0.01	0.01	0.01	0.07	0.09	100
vslgB9	99.90	0.01	0.01	0.01	0.07	0.02	100.02
vslgB10	99.86	0.03	0.00	0.00	0.10	0.01	100
vslgB11	99.81	0.02	0.01	0.02	0.08	0.06	100
vslgB12	99.55	0.02	0.34	0.00	0.07	0.01	99.99
vslgB13	99.73	0.01	0.01	0.00	0.20	0.05	100
vslgB14	99.91	0.01	0.01	0.00	0.06	0.01	100
vslgB15	99.85	0.01	0.01	0.01	0.11	0.01	100
เฉลี่ย	99.8047	0.04667	0.032	0.00533	0.08667	0.026	100.001

ตารางที่ 4.11 ลักษณะของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา



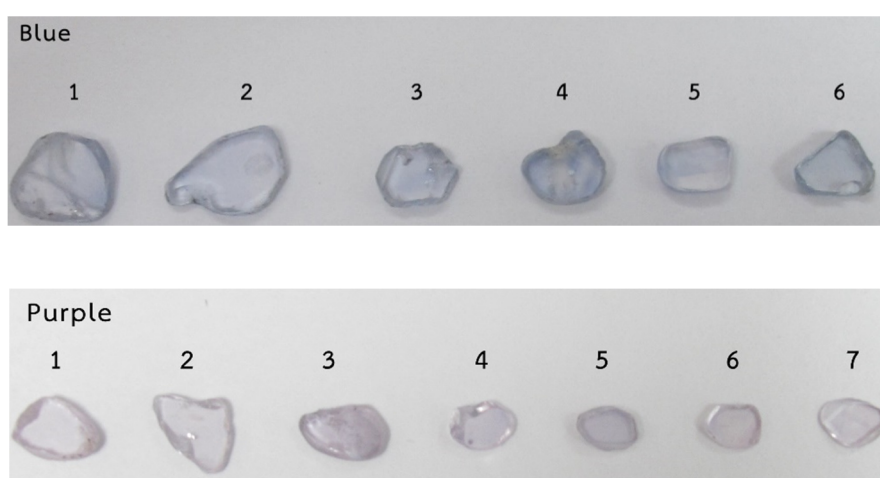
ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา

รหัส	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
vslB1	99.90	0.03	0.01	0.04	0.01	0.01	100
vslB2	99.82	0.02	0.01	0.02	0.014	0.01	99.894
vslB3	99.90	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	100.01
vslB4	99.73	0.01	0.01	0.13	0.11	0.02	100.01
vslB6	99.88	0.04	0.01	0.01	0.05	0.01	100
vslB7	99.85	0.02	0.01	0.01	0.12	0.01	100.02
vslB8	99.94	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	100
vslB9	99.94	0.01	0.00	0.01	0.03	0.01	100
vslB10	99.87	0.03	0.02	0.01	0.06	0.01	100
vslB11	99.91	0.02	0.01	0.01	0.05	0.01	100.01
vslB12	99.86	0.01	0.01	0.01	0.10	0.02	100.01
vslB13	99.57	0.02	0.01	0.26	0.03	0.01	99.9
vslB14	99.45	0.02	0.01	0.01	0.50	0.02	100.01
vslB15	99.90	0.02	0.00	.001	0.06	0.01	99.991
vslB17	99.53	0.03	0.01	0.01	0.43	0.01	100.02
vslB18	99.78	0.02	0.01	0.09	0.09	0.02	100.01

รหัส	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	FeO	Ga ₂ O ₃	Total
vsLB19	99.87	0.01	0.01	0.01	0.09	0.01	100
vsLB20	99.87	0.01	0.01	0.00	0.09	0.02	100
เฉลี่ย	99.8094	0.01944	0.00944	0.03617	0.10633	0.01278	99.9936

4.3 ศึกษารวบรวมลักษณะเฉพาะตัวของสเปคตรัม

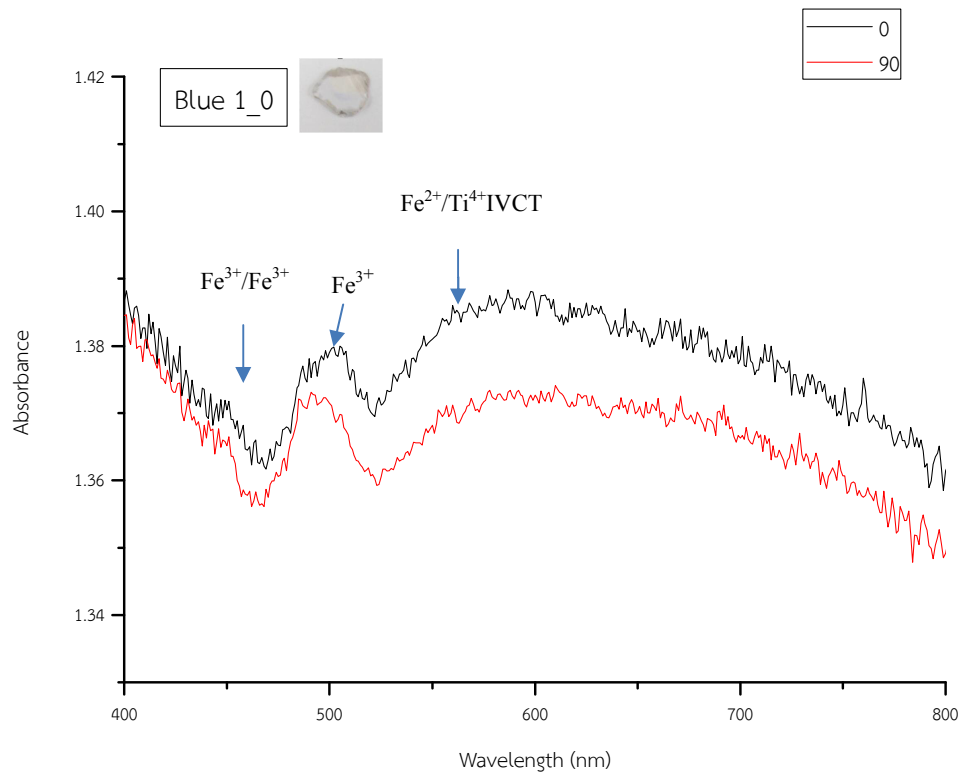
ในการศึกษาลักษณะเฉพาะตัวของสเปคตรัมตัวอย่างจะถูกเจียรระไนเปิดหน้าให้ตั้งฉากกับแกนแสงหรือแกน C ขนานกันทั้งสองด้าน เพื่อการวิเคราะห์และตรวจสอบชนิดมลทิน ดังแสดงในรูปที่ 4.16



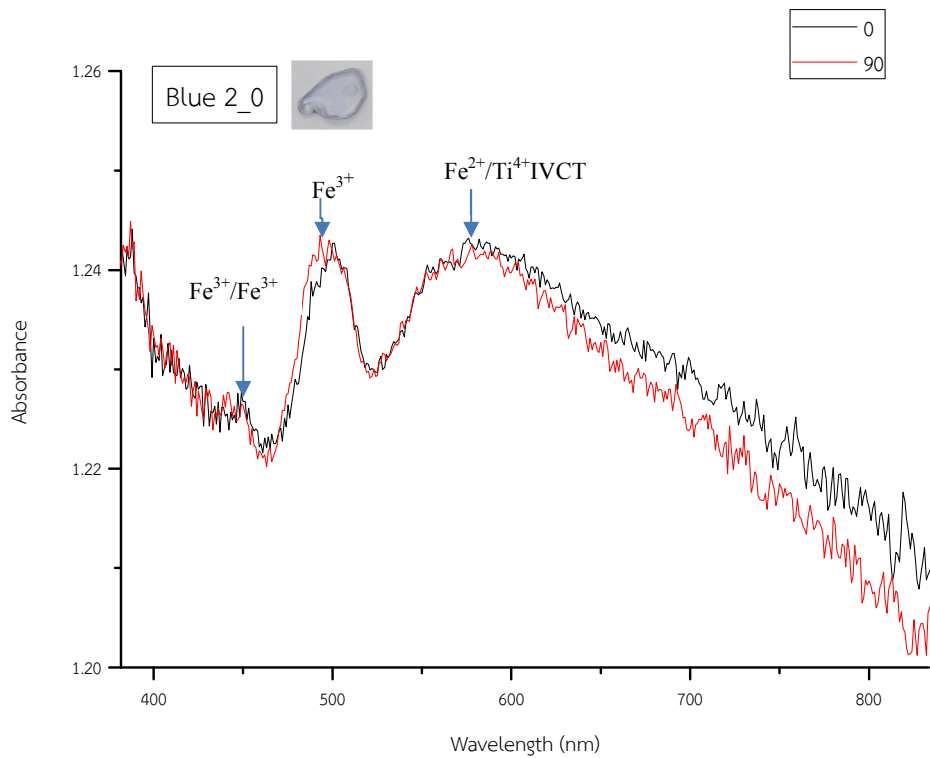
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไร้สีที่นำมาเจียรระไนเปิดหน้า สำหรับนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางแสง

4.3.1 การตรวจสอบสมบัติเชิงแสงด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR Spectroscopy

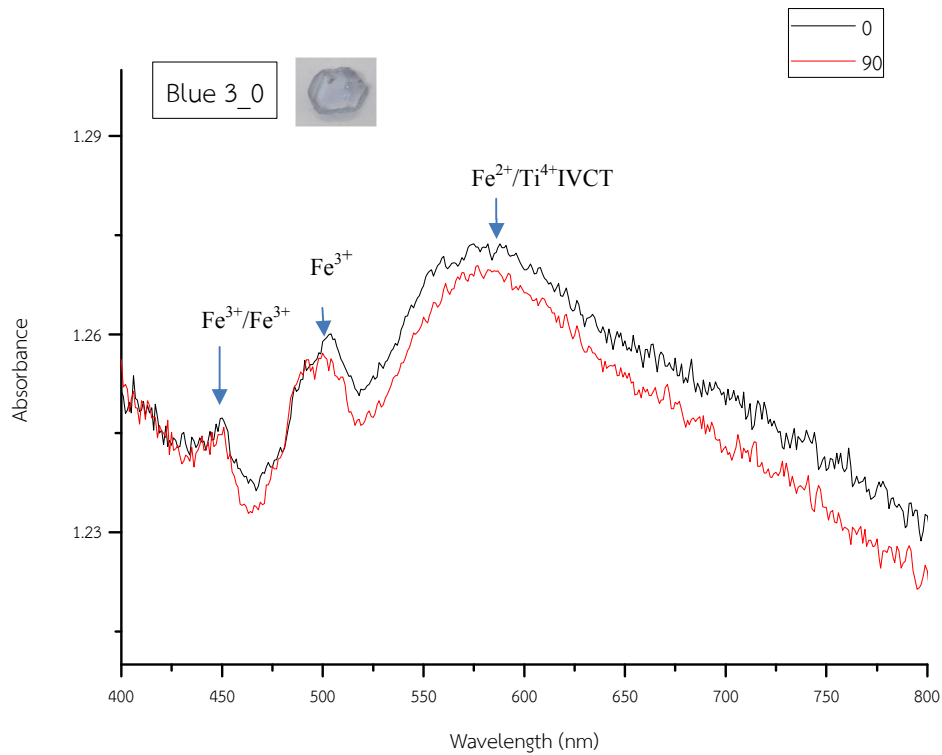
การวัดค่าการดูดกลืนแสงของพลอยสามารถบ่งชี้คุณลักษณะของพลอยได้หลายประการ อาทิ สีของพลอย ชนิดของธาตุให้สี และยังบอกถึงชนิดการกำเนิดของพลอยได้ด้วยผลการตรวจสอบการดูดกลืนแสงของพลอยด้วยเทคนิค UV-VIS-NIR Spectroscopy ทั้งแนวขนานแกนแสงและตั้งฉากแกนแสง คือ O-ray หรือ O องศา และ E-ray หรือ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.29 การดูดกลืนแสง ตามชนิดของธาตุให้สีเป็น สีเหลือง จาก Fe³⁺/Fe³⁺ ที่ 450 นาโนเมตร และ Fe³⁺ ที่ 490 นาโนเมตร ส่วนสีน้ำเงิน Fe²⁺/Ti⁴⁺ ที่ 565 นาโนเมตร และ Fe²⁺/Fe³⁺ ที่ 760 นาโนเมตร สีแดง ของ Cr³⁺ ที่ ตำแหน่งประมาณ 405 – 410 และ 554 นาโนเมตร ทำให้มีสีฟ้าอ่อน และสีม่วงอ่อน



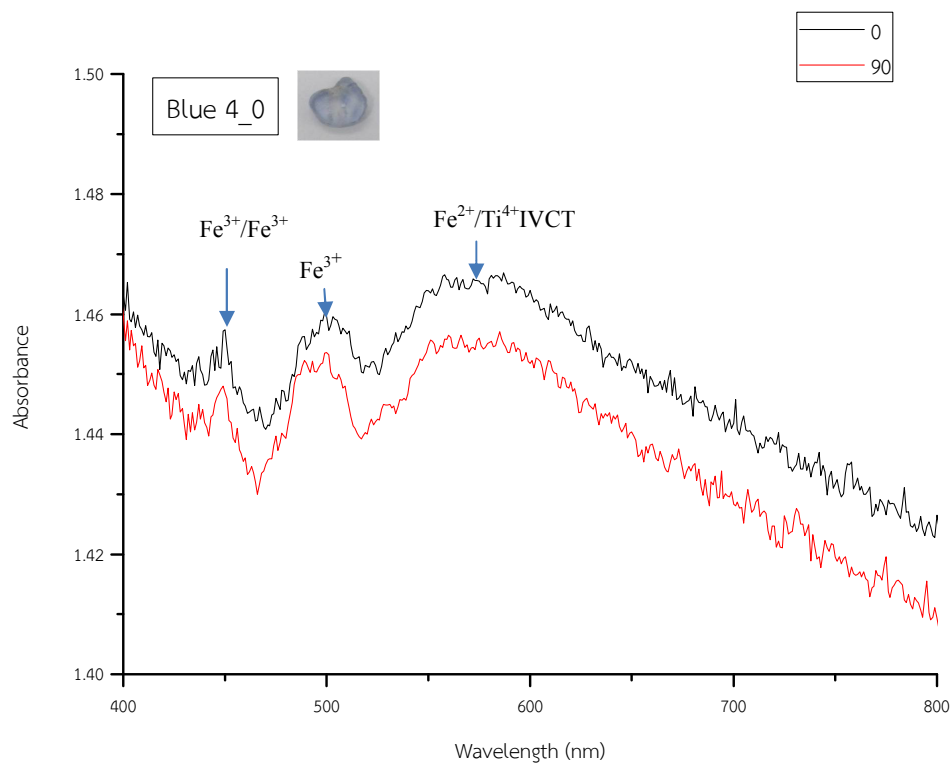
รูปที่ 4.17 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 1_0 จากแหล่งศรีลังกา



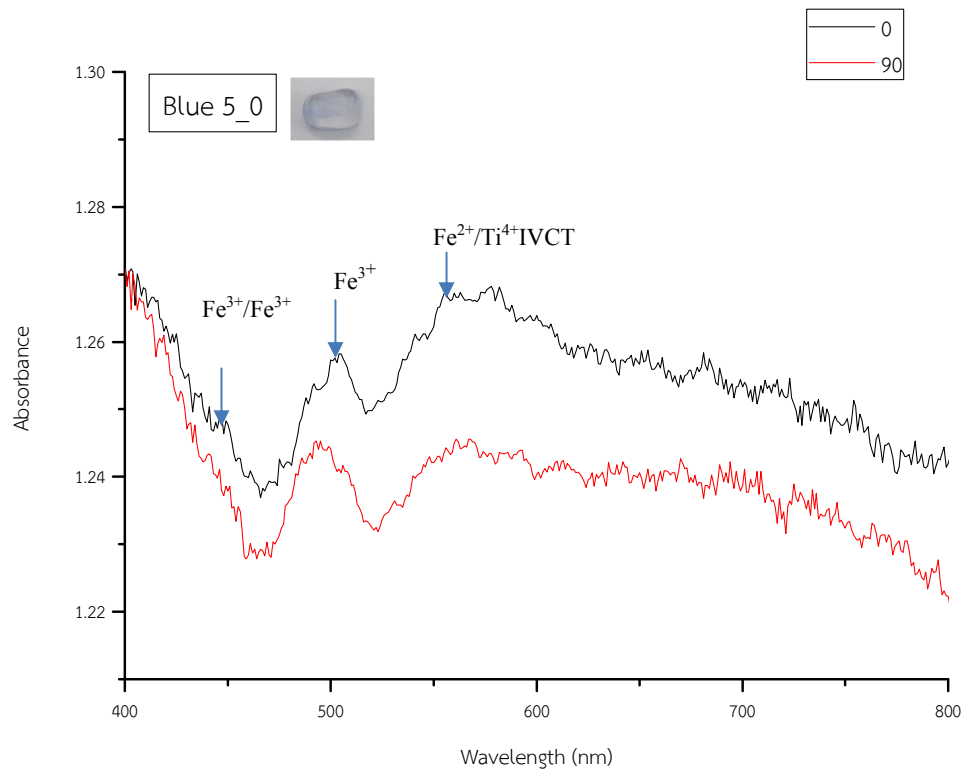
รูปที่ 4.18 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 2_0 จากแหล่งศรีลังกา



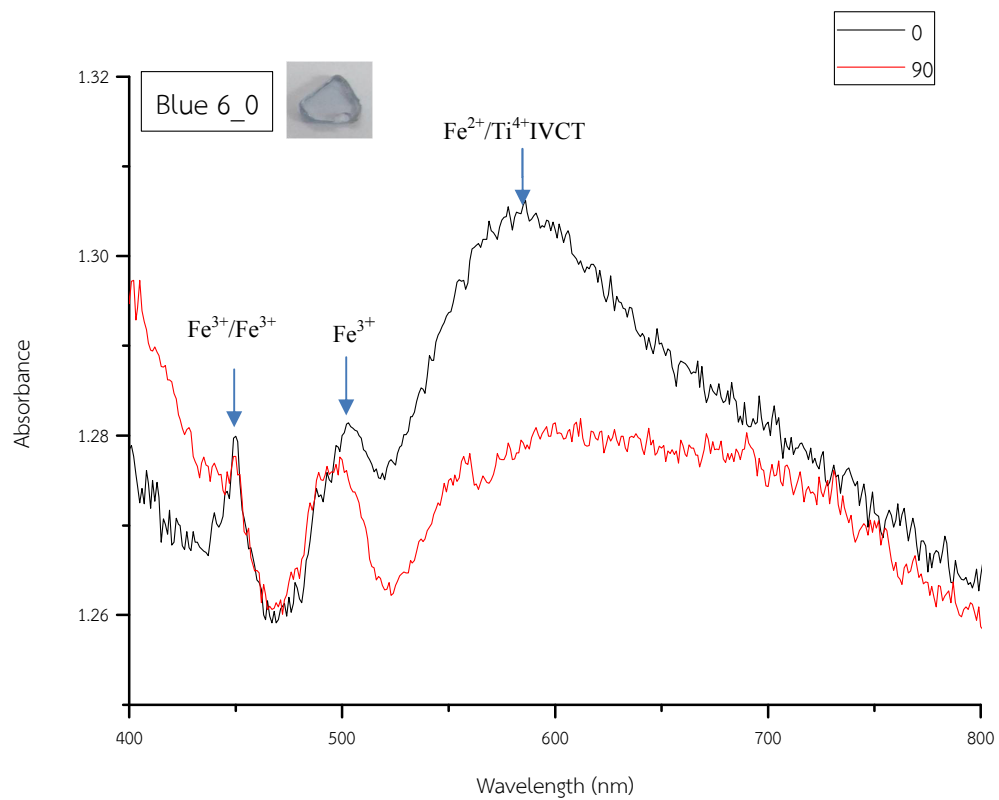
รูปที่ 4.19 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 3_0 จากแหล่งศรีลังกา



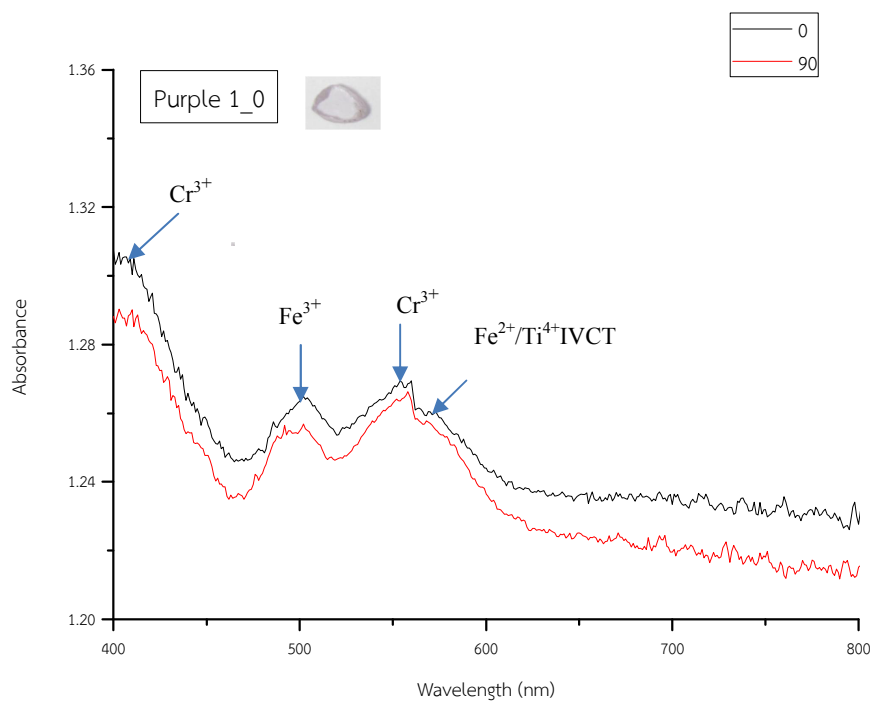
รูปที่ 4.20 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 4_0 จากแหล่งศรีลังกา



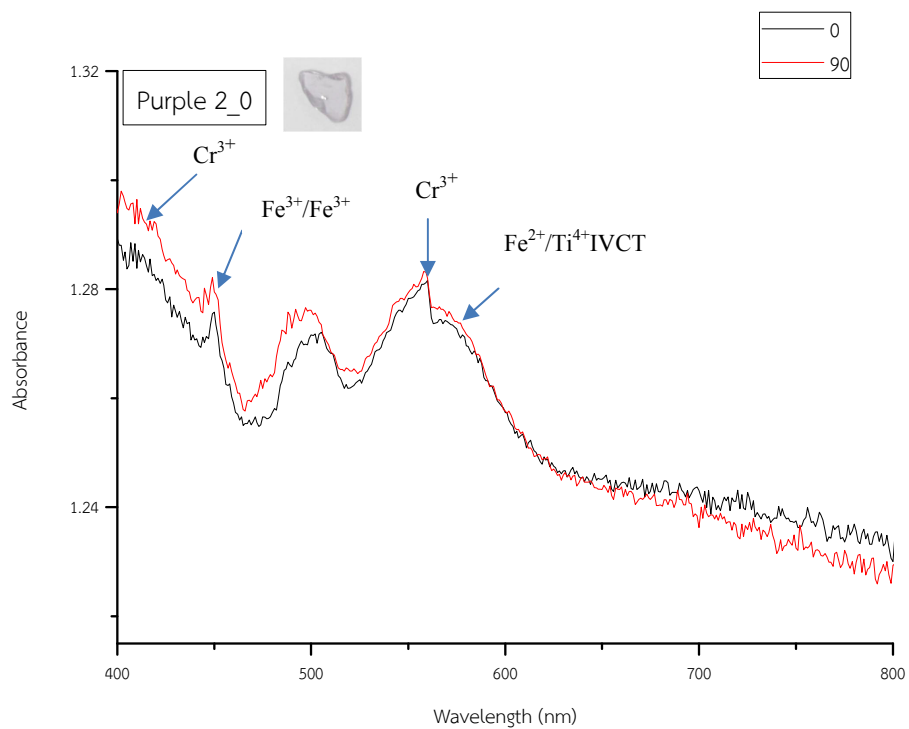
รูปที่ 4.21 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพอลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 5_0 จากแหล่งศรีลังกา



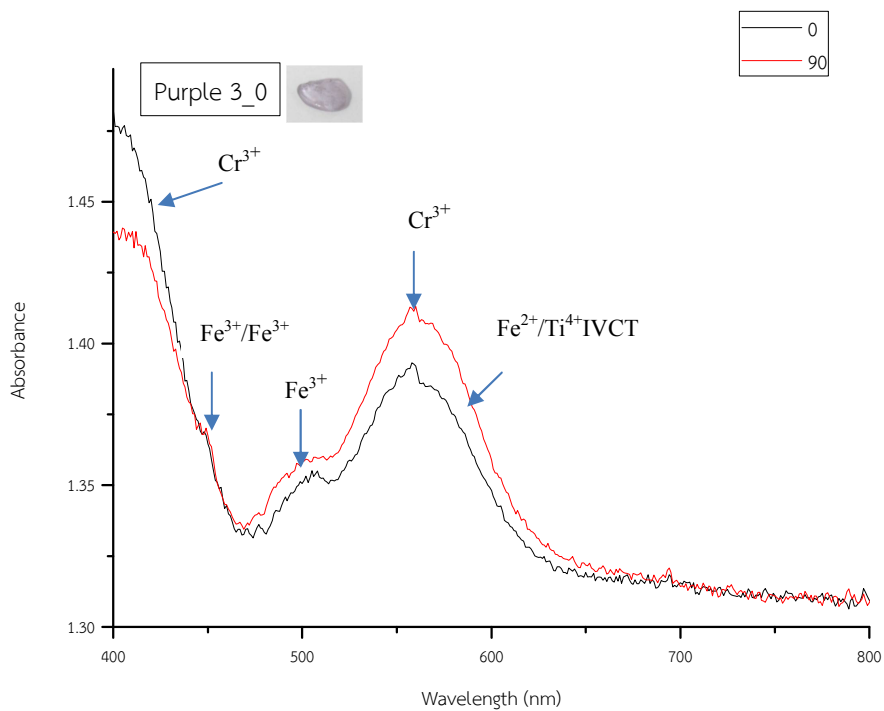
รูปที่ 4.22 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพอลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน Blue 6_0 จากแหล่งศรีลังกา



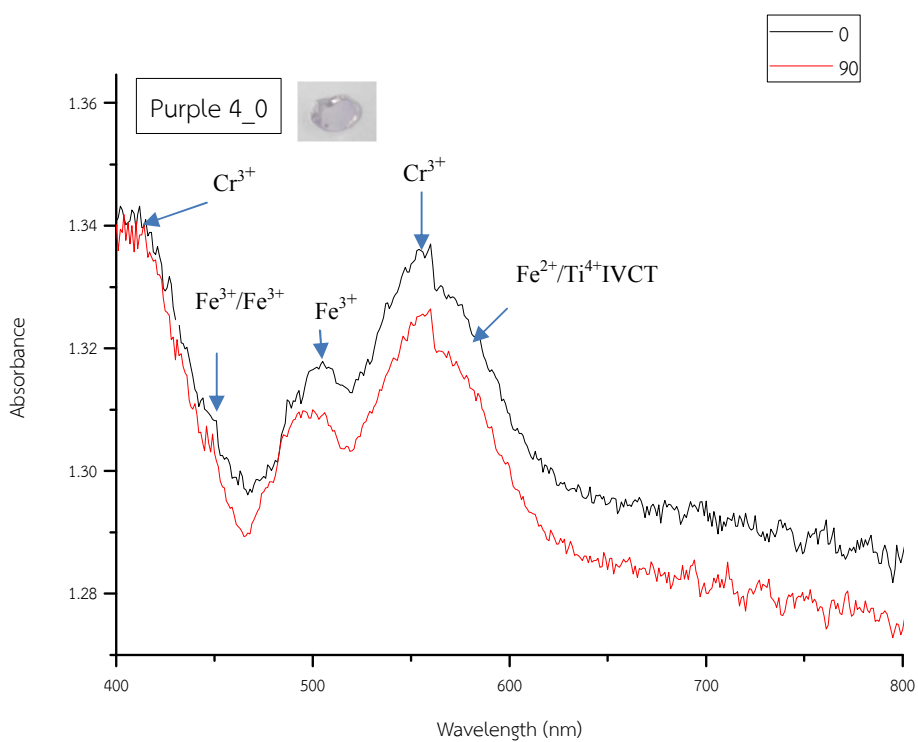
รูปที่ 4.23 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 1_0 จากแหล่งศรีลังกา



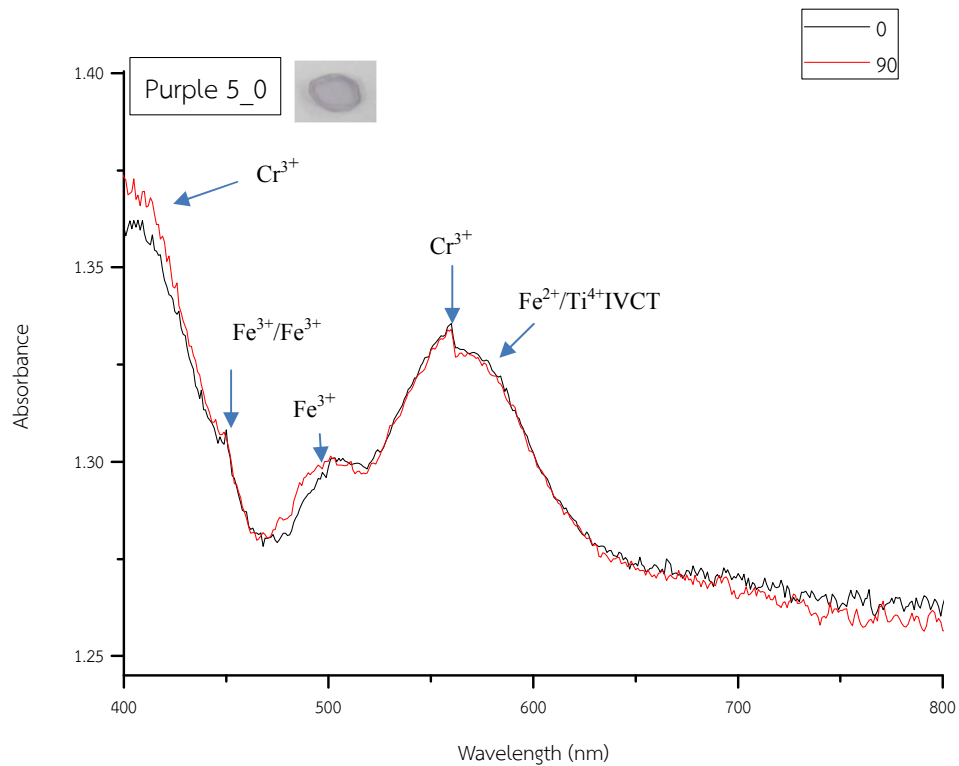
รูปที่ 4.24 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 2_0 จากแหล่งศรีลังกา



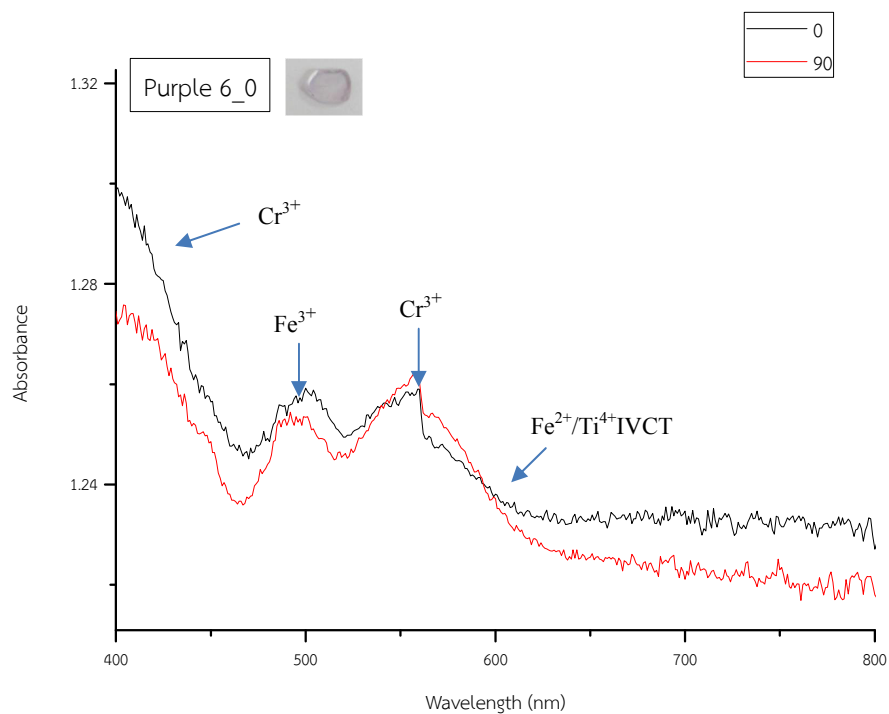
รูปที่ 4.25 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 3_0 จากแหล่งศรีลังกา



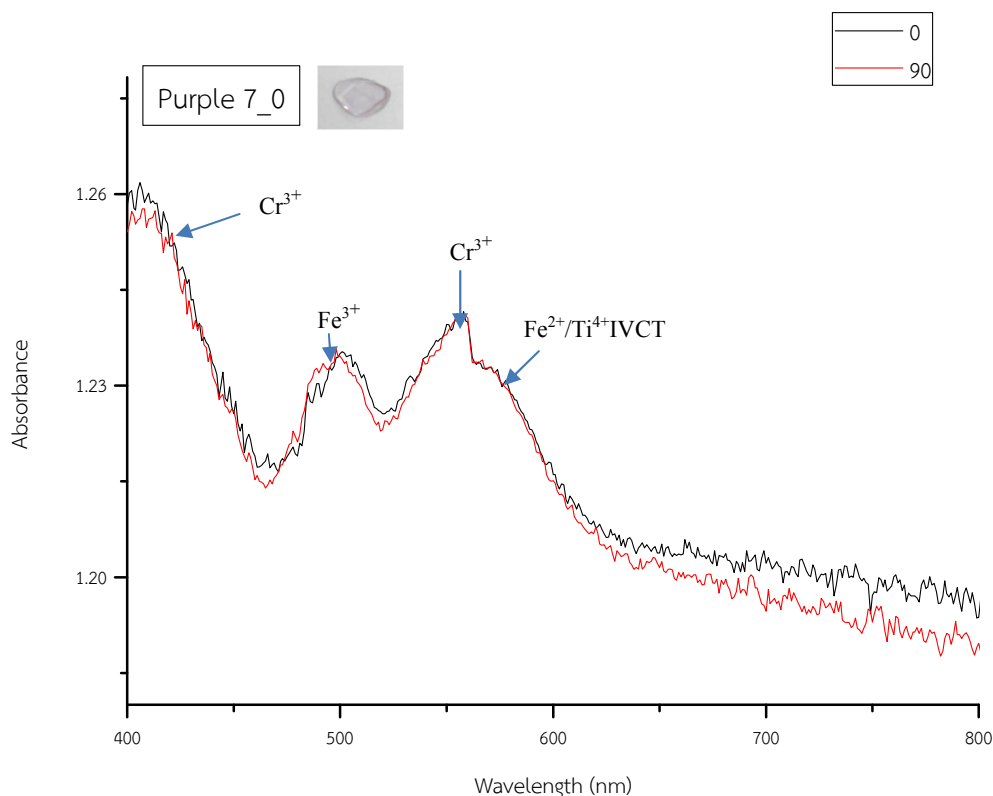
รูปที่ 4.26 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 4_0 จากแหล่งศรีลังกา



รูปที่ 4.27 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพอลิแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 5_0 จากแหล่งศรีลังกา



รูปที่ 4.28 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพอลิแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 6_0 จากแหล่งศรีลังกา

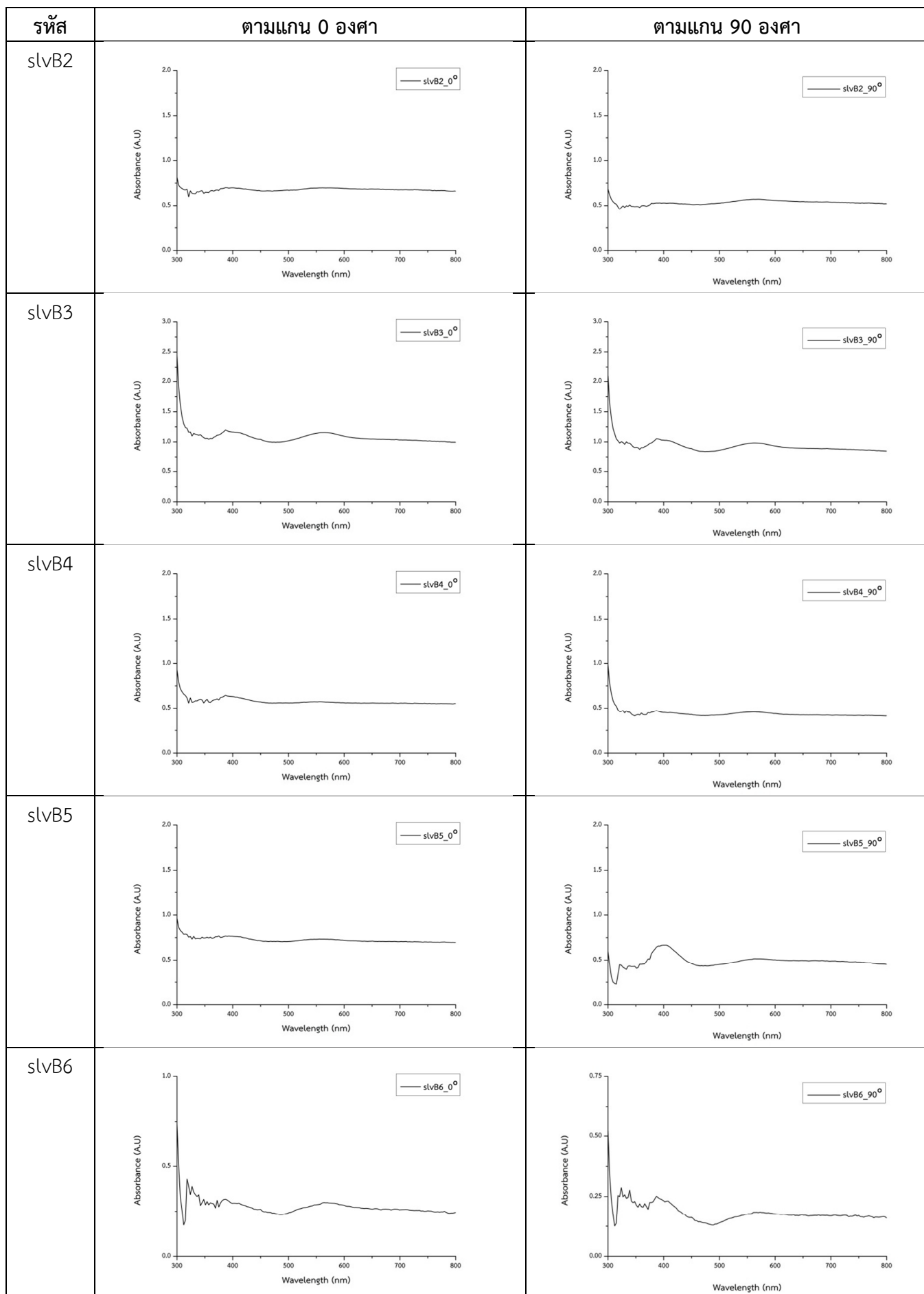


รูปที่ 4.29 UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์สีม่วงอ่อน Purple 7_0 จากแหล่งศรีลังกา

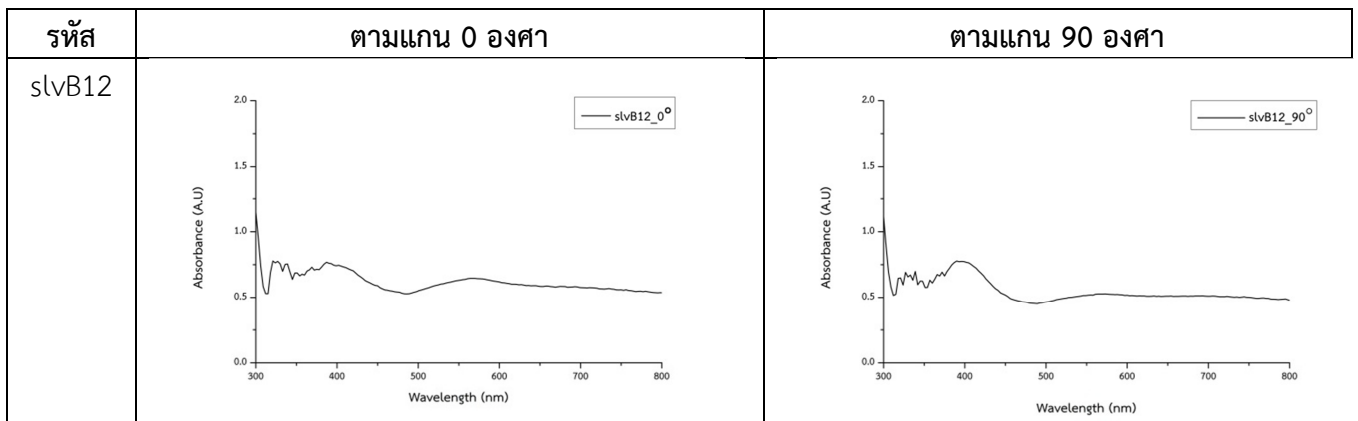
การทดลองวัดการดูดกลืนของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา ดังตารางที่ 4.13 จะพบว่าจะมีการดูดกลืนสีเหลือง จาก $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ 450 นาโนเมตร และ Fe^{3+} ที่ 490 นาโนเมตร ส่วนสีน้ำเงิน $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 565 นาโนเมตร แต่ไม่ชัดเจนมากจึงทำให้เห็นพลอยเป็นสีฟ้าอ่อนจากตารางที่ 4.5 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุให้สีที่วิเคราะห์จากตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.13 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนฟ้า จากแหล่งศรีลังกา

รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
slvB1	UV-VIS-NIR spectrum of slvB1 at 0 degrees. The x-axis is Wavelength (nm) from 300 to 800, and the y-axis is Absorbance (AU) from 0.0 to 2.0. The curve shows a slight dip around 450 nm.	UV-VIS-NIR spectrum of slvB1 at 90 degrees. The x-axis is Wavelength (nm) from 300 to 800, and the y-axis is Absorbance (AU) from 0.0 to 2.5. The curve shows a slight dip around 450 nm.

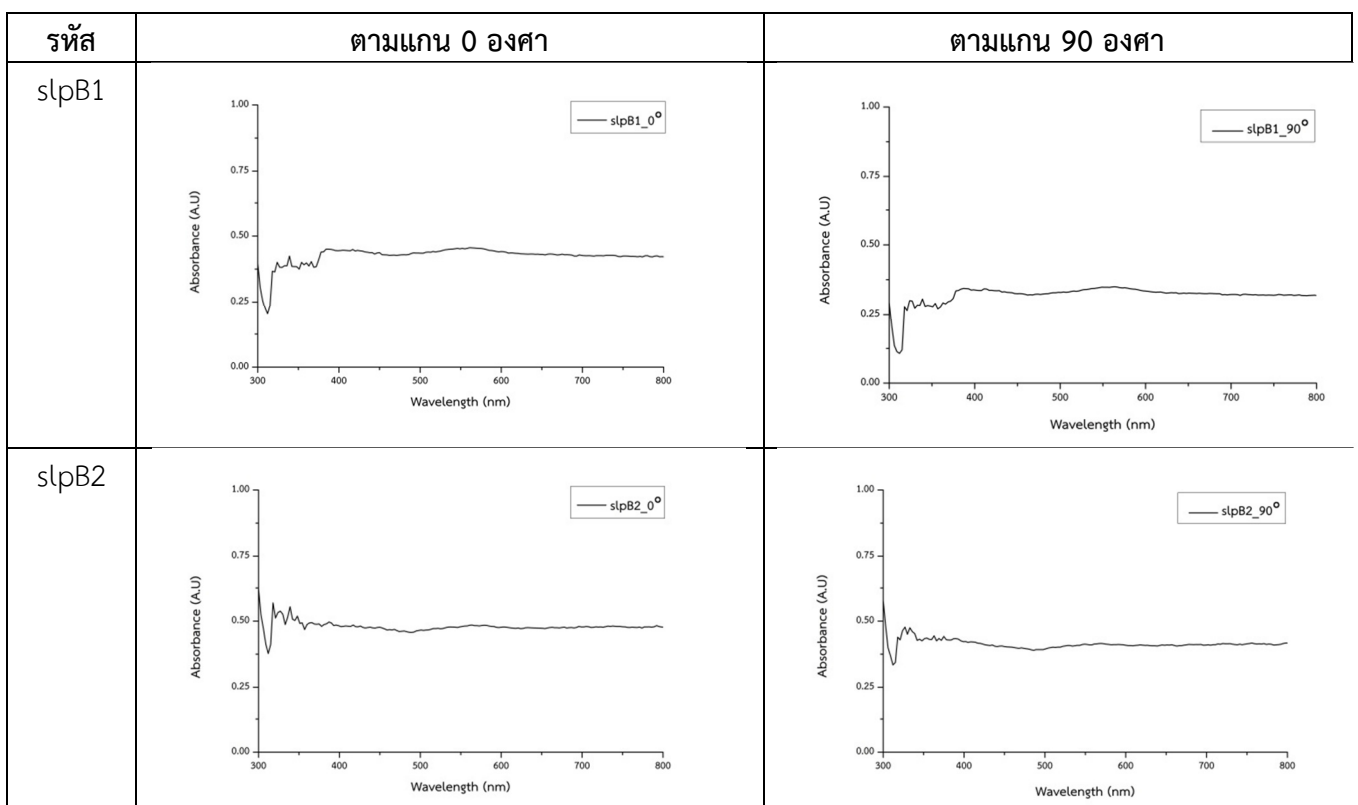


รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
slvB7		
slvB8		
slvB9		
slvB10		
slvB11		

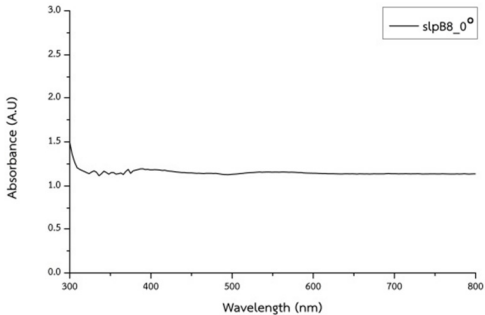
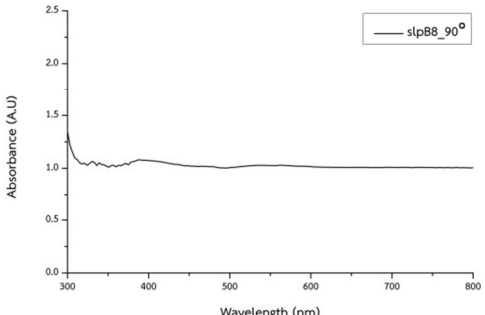
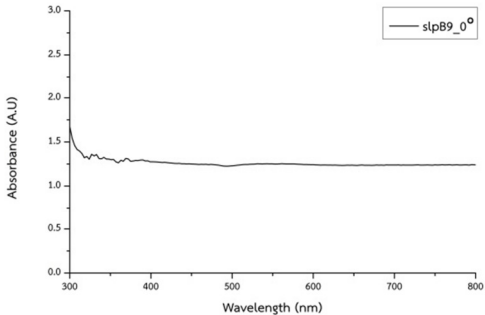
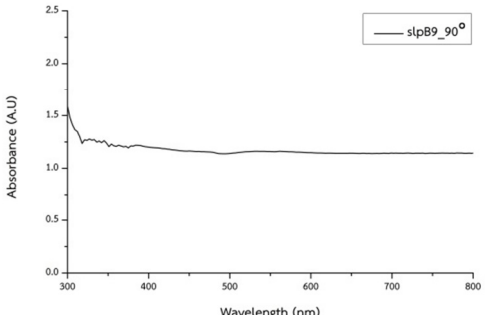
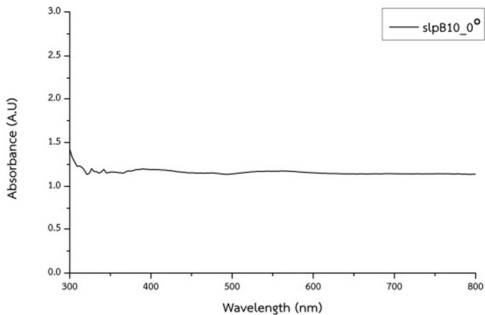
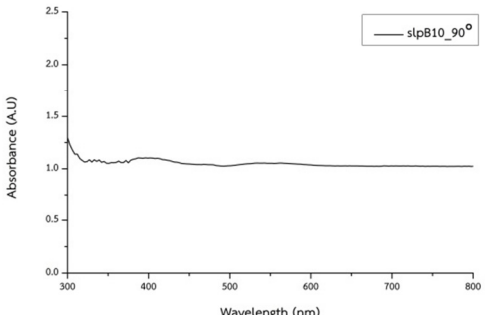
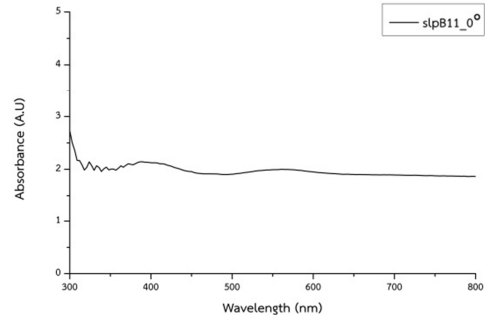
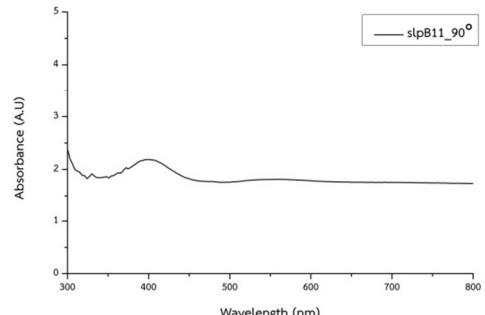
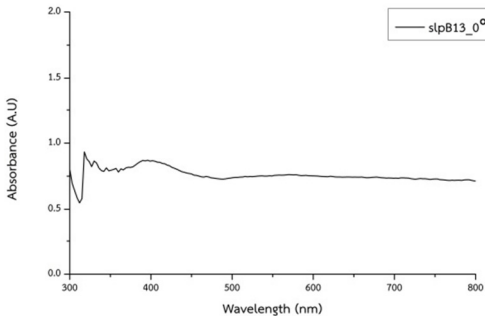
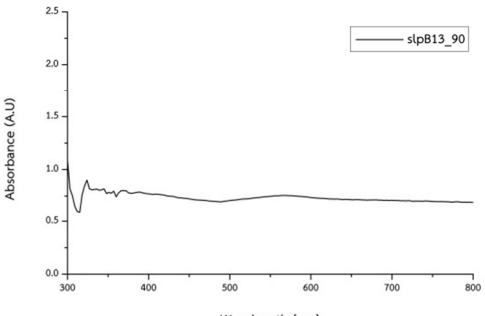


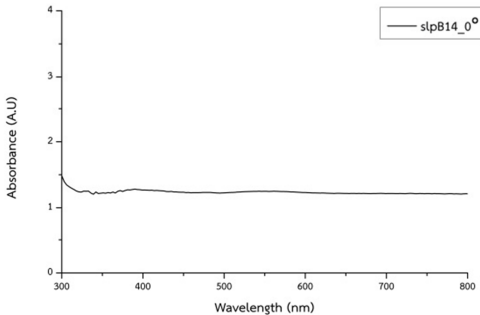
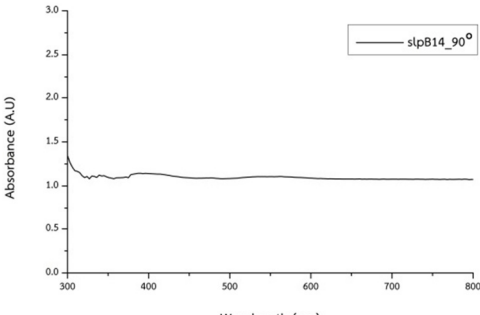
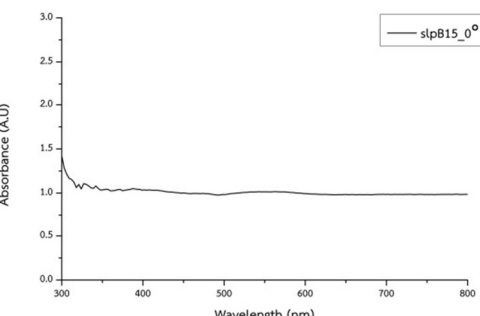
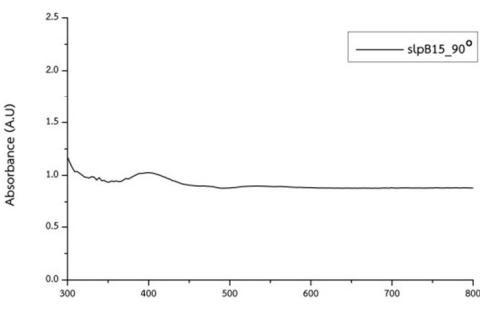
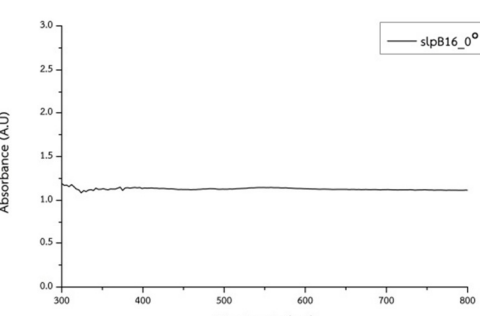
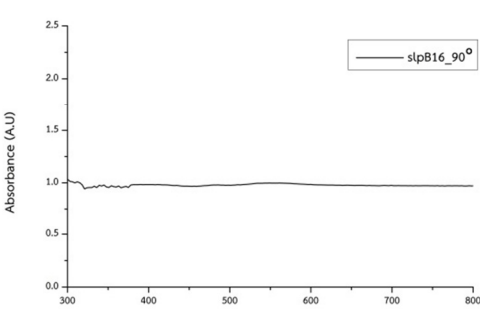
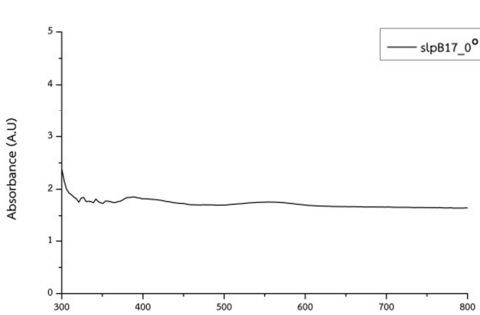
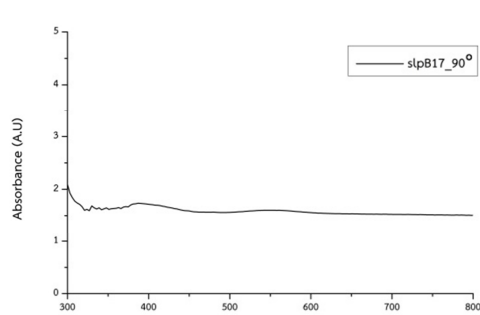
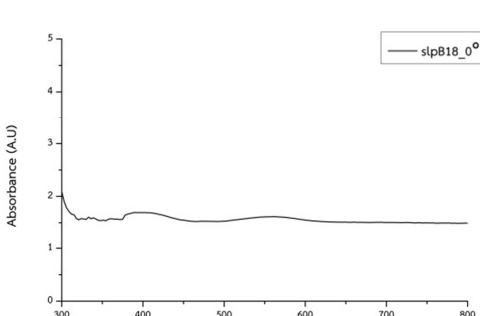
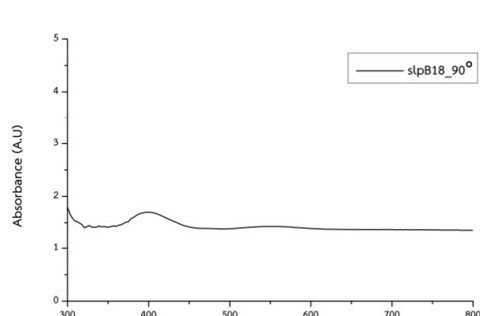
การทดลองวัดการดูดกลืนของพอลิเมอร์สีย้อมอินทรีย์ จากแหล่งสรีลิ่งกา ดังตารางที่ 4.14 จะพบว่าจะมีการดูดกลืนสีเหลือง จาก $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ 450 นาโนเมตร และ Fe^{3+} ที่ 490 นาโนเมตร ส่วนสีน้ำเงิน $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 565 นาโนเมตร รวมทั้งสีแดง ของ Cr^{3+} ที่ ตำแหน่งประมาณ 405 – 410 และ 554 นาโนเมตร แต่ไม่ชัดเจนมากจึงทำให้เห็นพอลิเป็นสีย้อมอินทรีย์ จากตารางที่ 4.7 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุให้สีที่วิเคราะห์จากตารางที่ 4.8

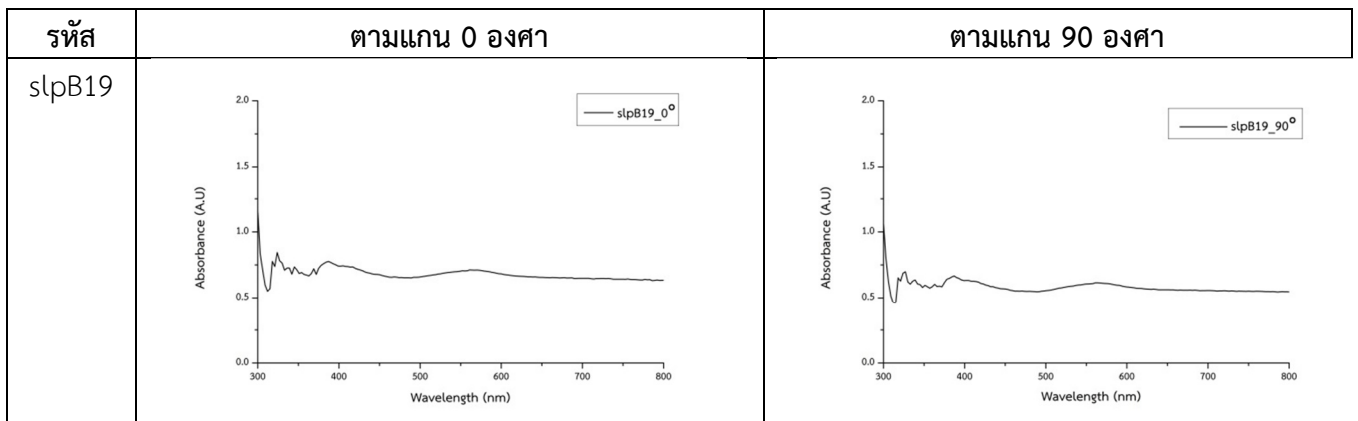
ตารางที่ 4.14 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพอลิเมอร์สีย้อมอินทรีย์ จากแหล่งสรีลิ่งกา



รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
slpB3		
slpB4		
slpB5		
slpB6		
slpB7		

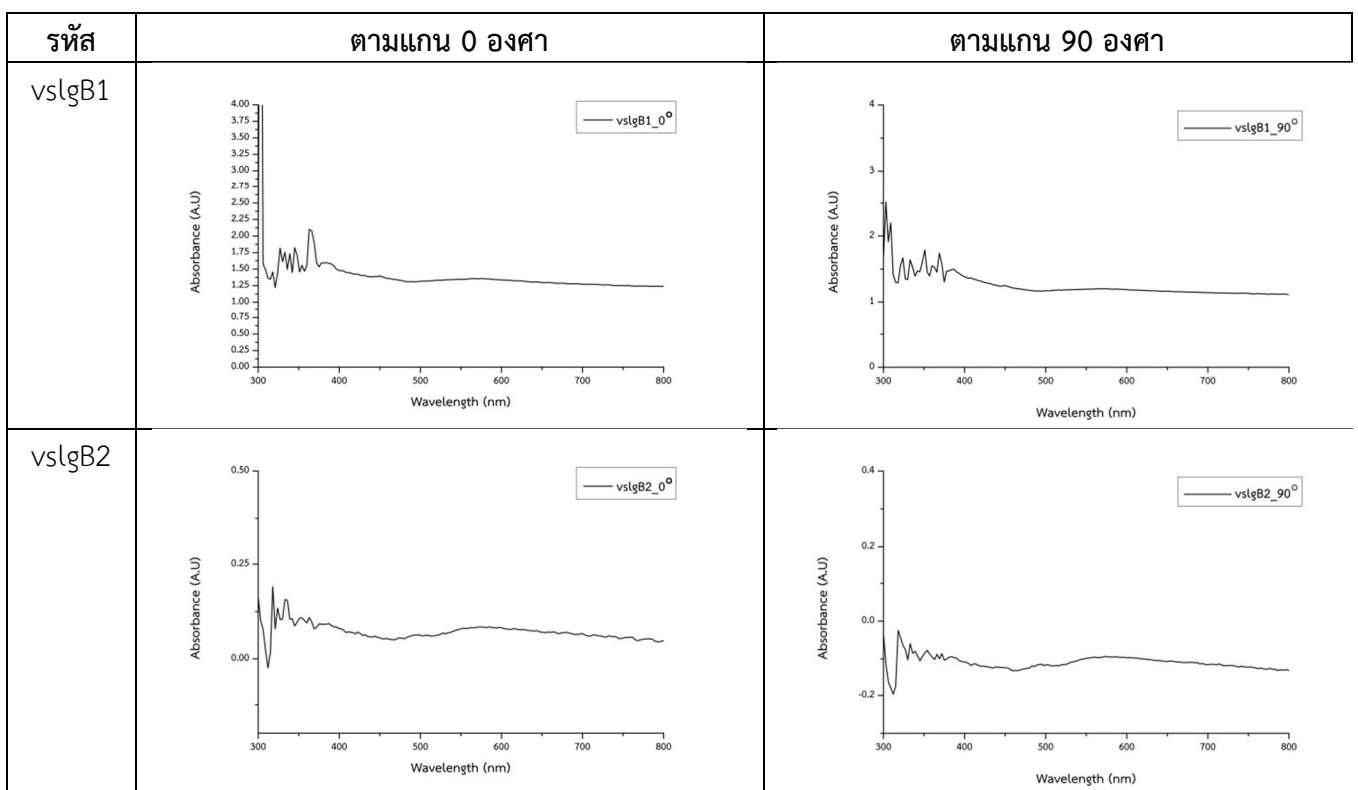
รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
slpB8		
slpB9		
slpB10		
slpB11		
slpB13		

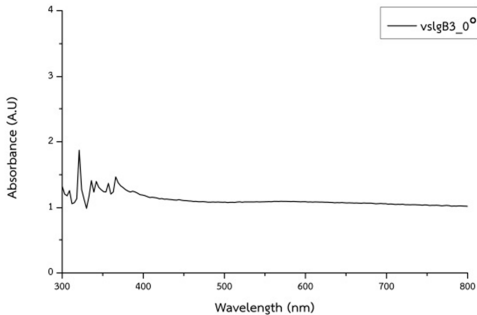
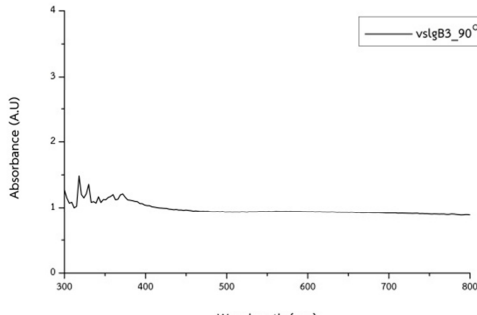
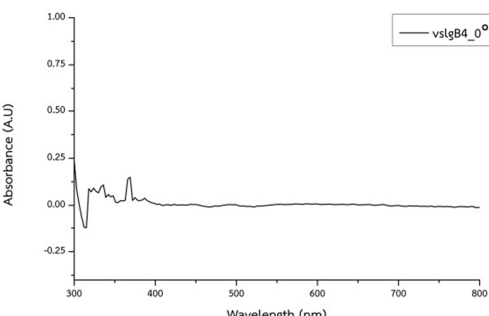
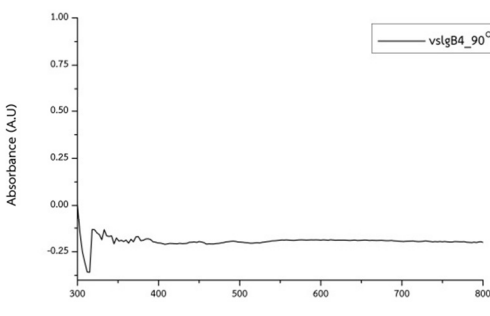
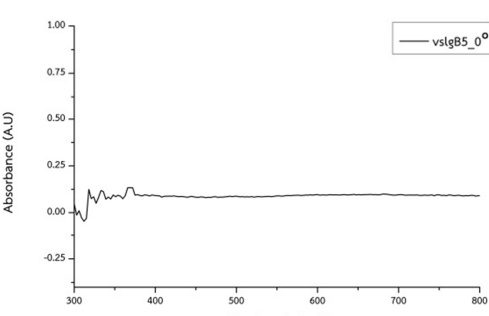
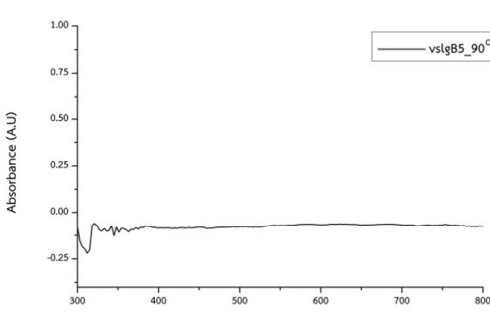
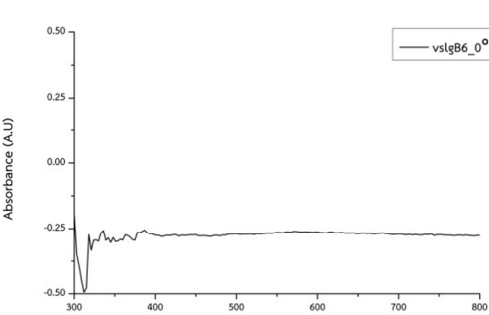
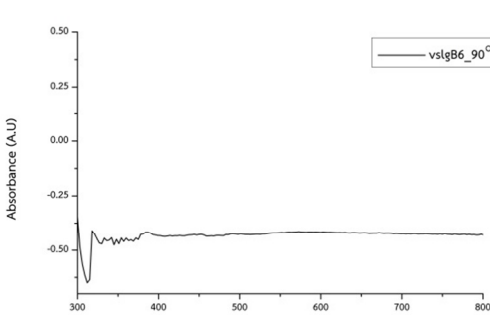
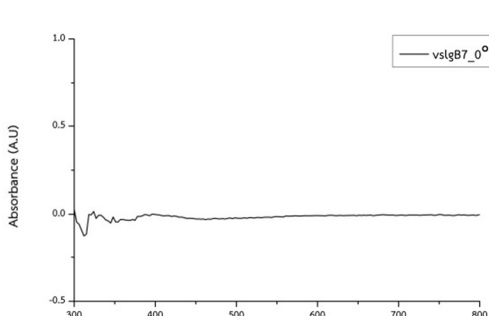
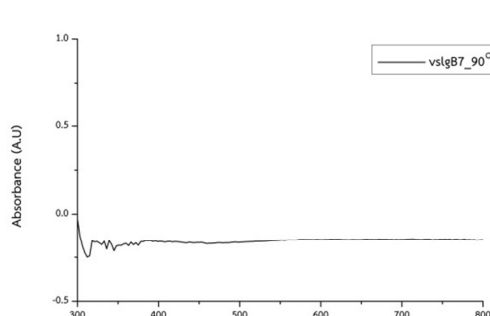
รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
slpB14		
slpB15		
slpB16		
slpB17		
slpB18		

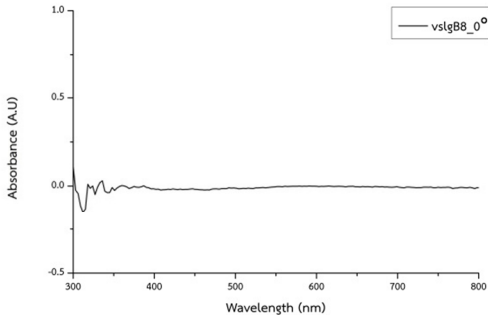
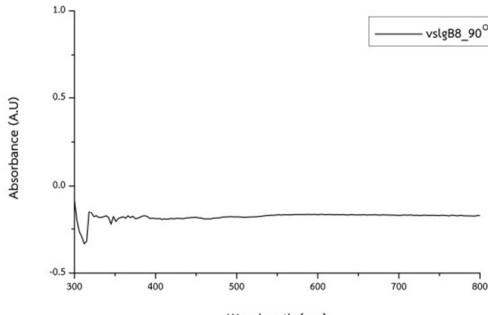
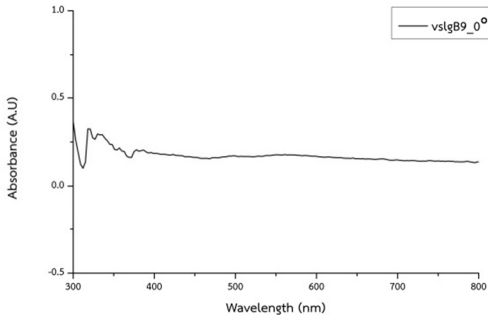
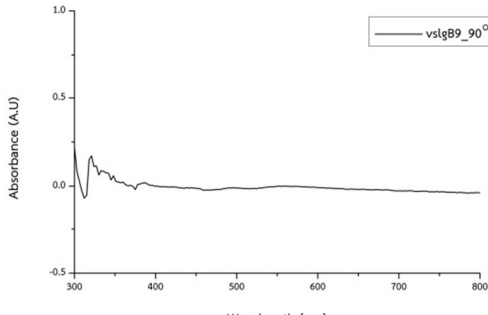
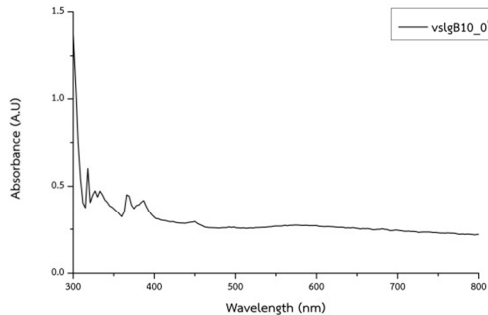
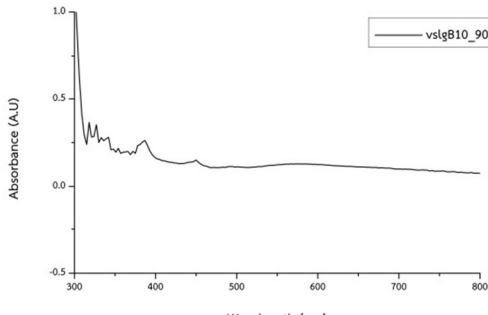
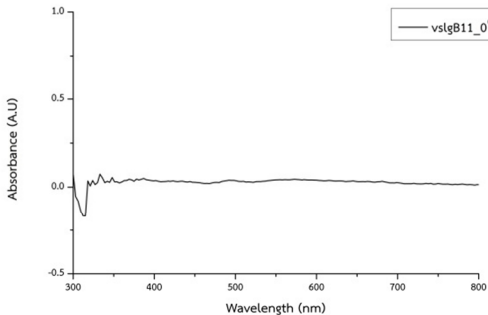
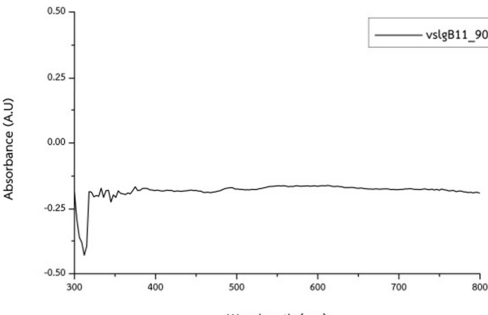
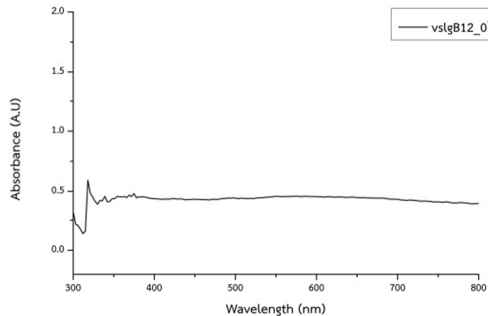
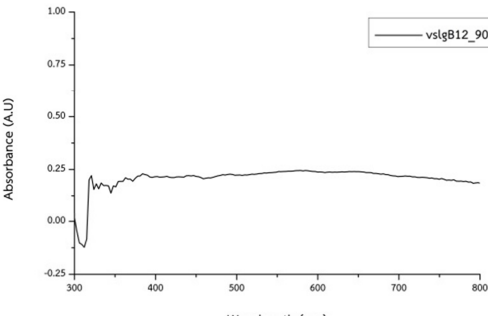


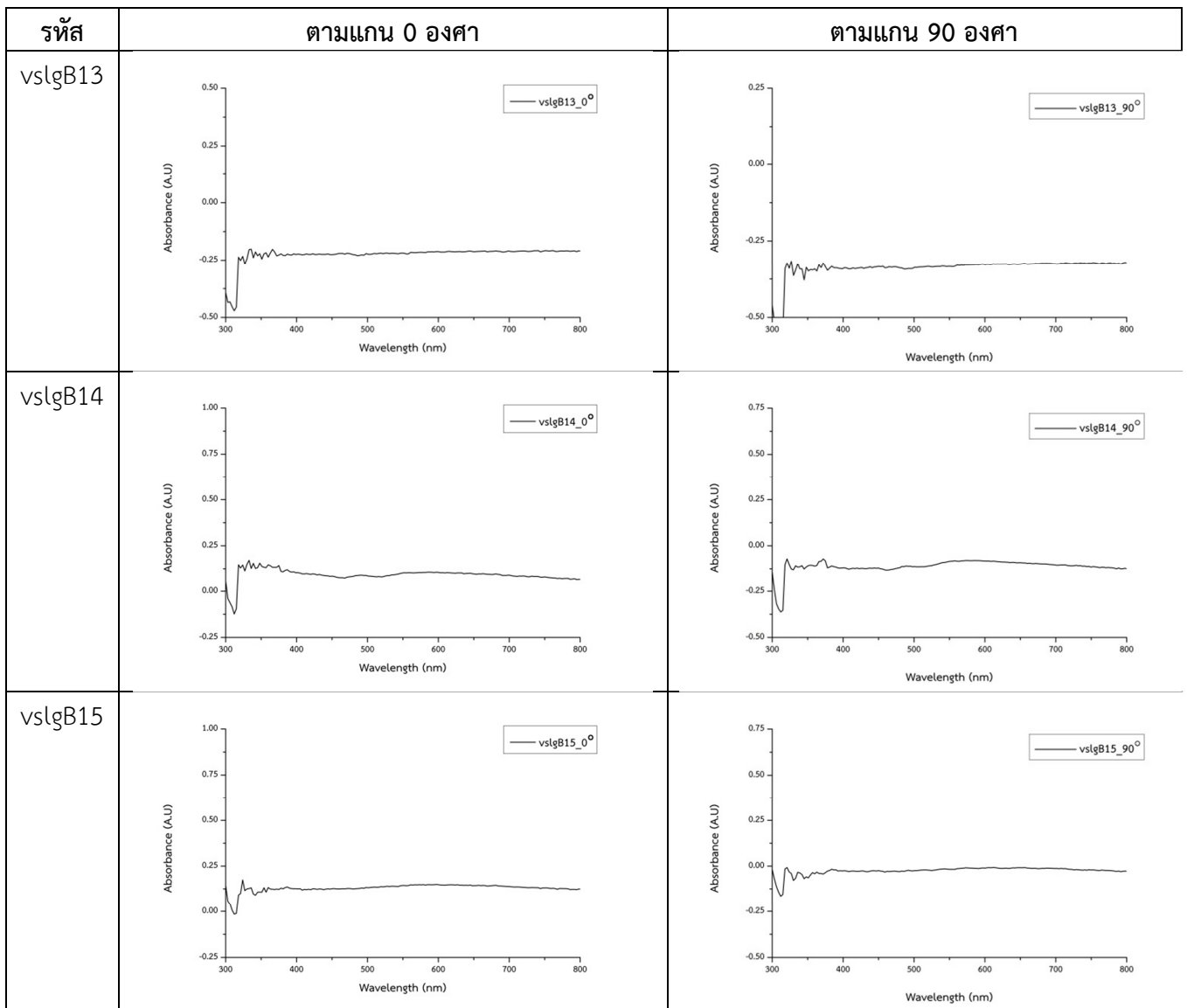
การทดลองวัดการดูดกลืนของพอลิเมอร์สีย้อมอินทรีย์ จากแหล่งศรีลังกา ดังตารางที่ 4.15 จะพบว่าจะมีการดูดกลืนสีเหลือง จาก $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ 450 นาโนเมตร และ Fe^{3+} ที่ 490 นาโนเมตร ส่วนสีน้ำเงิน $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 565 นาโนเมตร แต่ไม่ชัดเจนมากจึงทำให้เห็นพอลิเมอร์เป็นสีย้อมอินทรีย์ จากตารางที่ 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุให้สีที่วิเคราะห์จากตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.15 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพอลิเมอร์สีย้อมอินทรีย์ จากแหล่งศรีลังกา



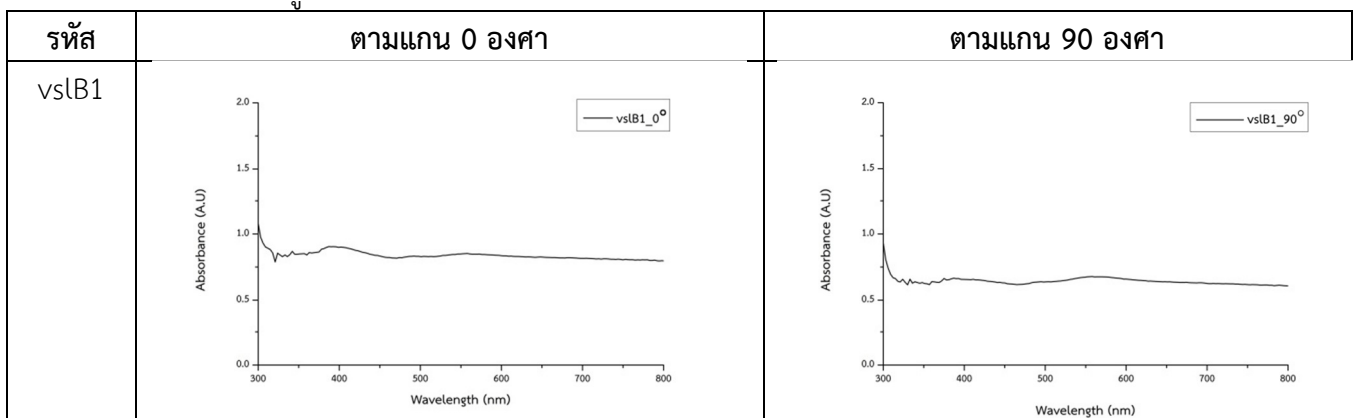
รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
vslgB3		
vslgB4		
vslgB5		
vslgB6		
vslgB7		

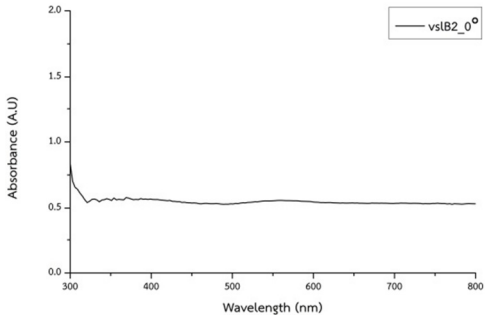
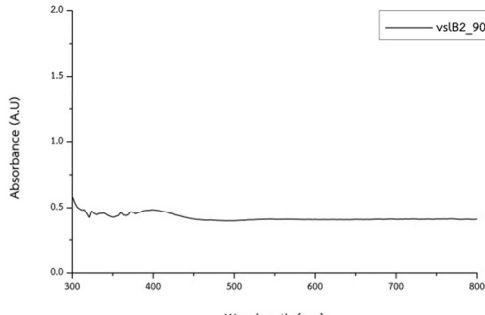
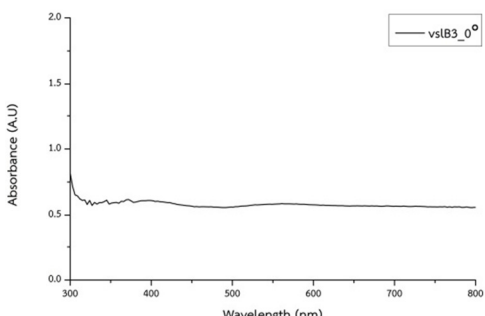
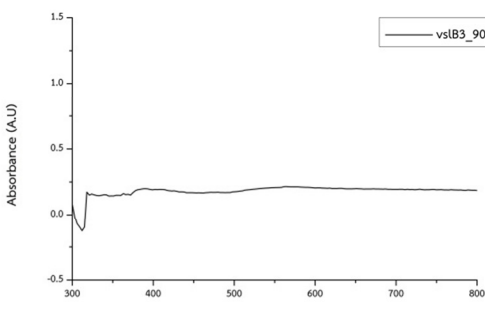
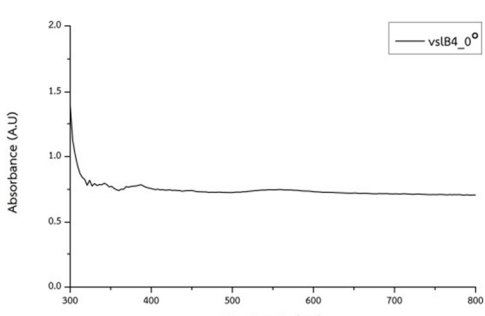
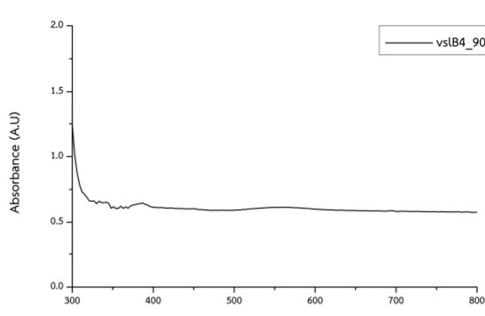
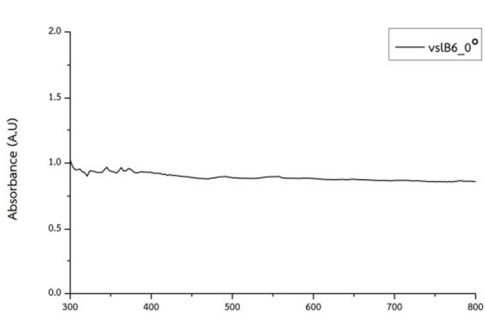
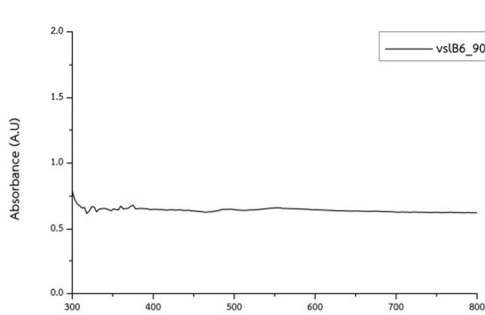
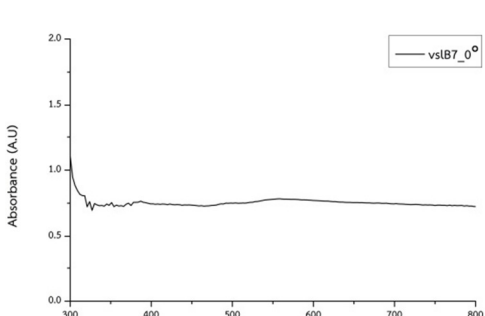
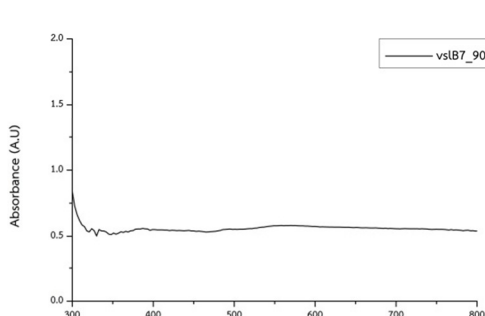
รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
vslgB8		
vslgB9		
vslgB10		
vslgB11		
vslgB12		

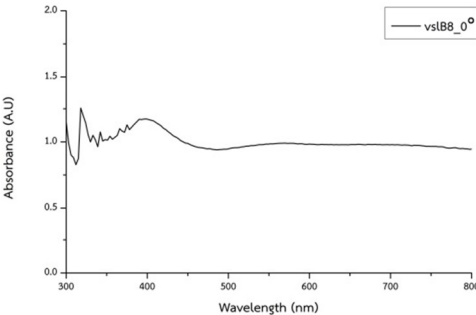
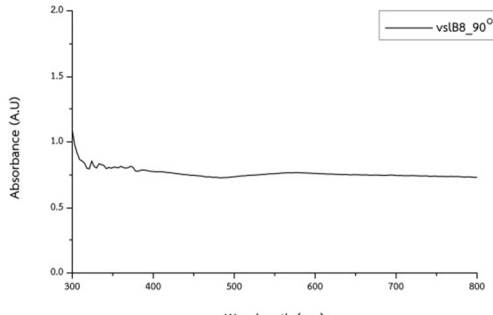
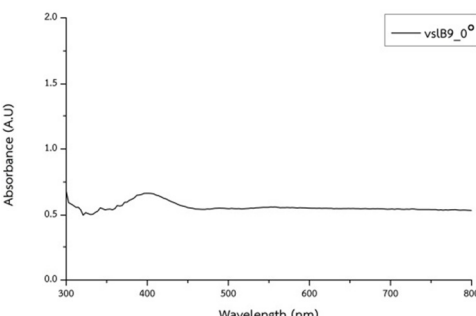
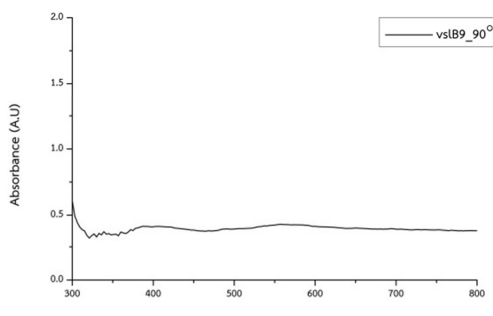
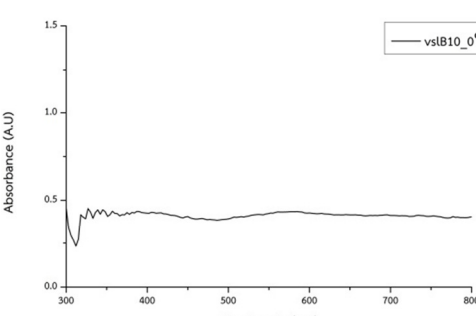
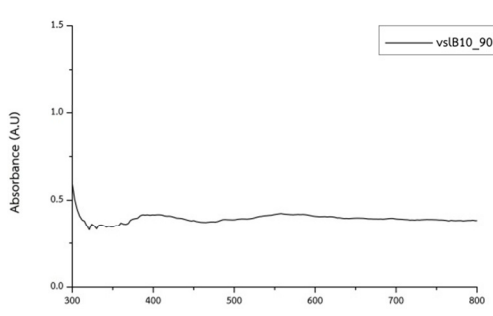
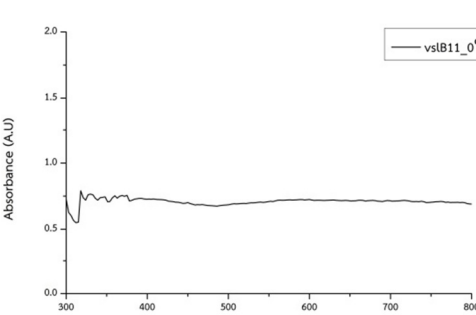
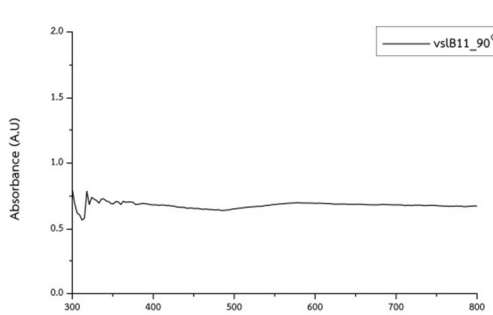
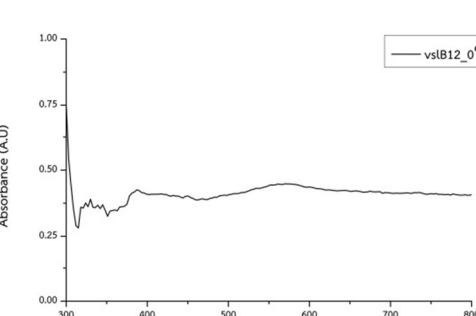
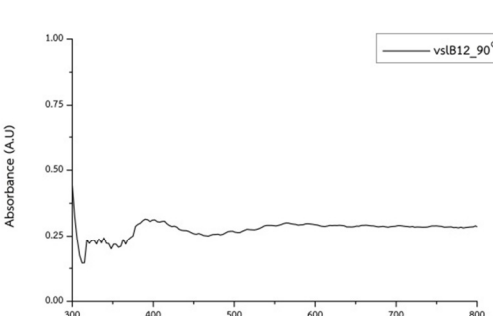


ในกรณีการดูดกลืนของพอลิเมอร์ไฟรอสีอ่อนโทนฟ้าเทาจากแหล่งศรีลังกา ดังตารางที่ 4.16 จะพบว่าจะมีการดูดกลืนสีเหลือง จาก $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ ที่ 450 นาโนเมตร และ Fe^{3+} ที่ 490 นาโนเมตร ส่วนสีน้ำเงิน $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ ที่ 565 นาโนเมตร แต่ไม่ชัดเจนมากจึงทำให้เห็นพอลิเมอร์เป็นสีอ่อนโทนฟ้าเทา จากตารางที่ 4.11 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณธาตุให้สีที่วิเคราะห์จากตารางที่ 4.12

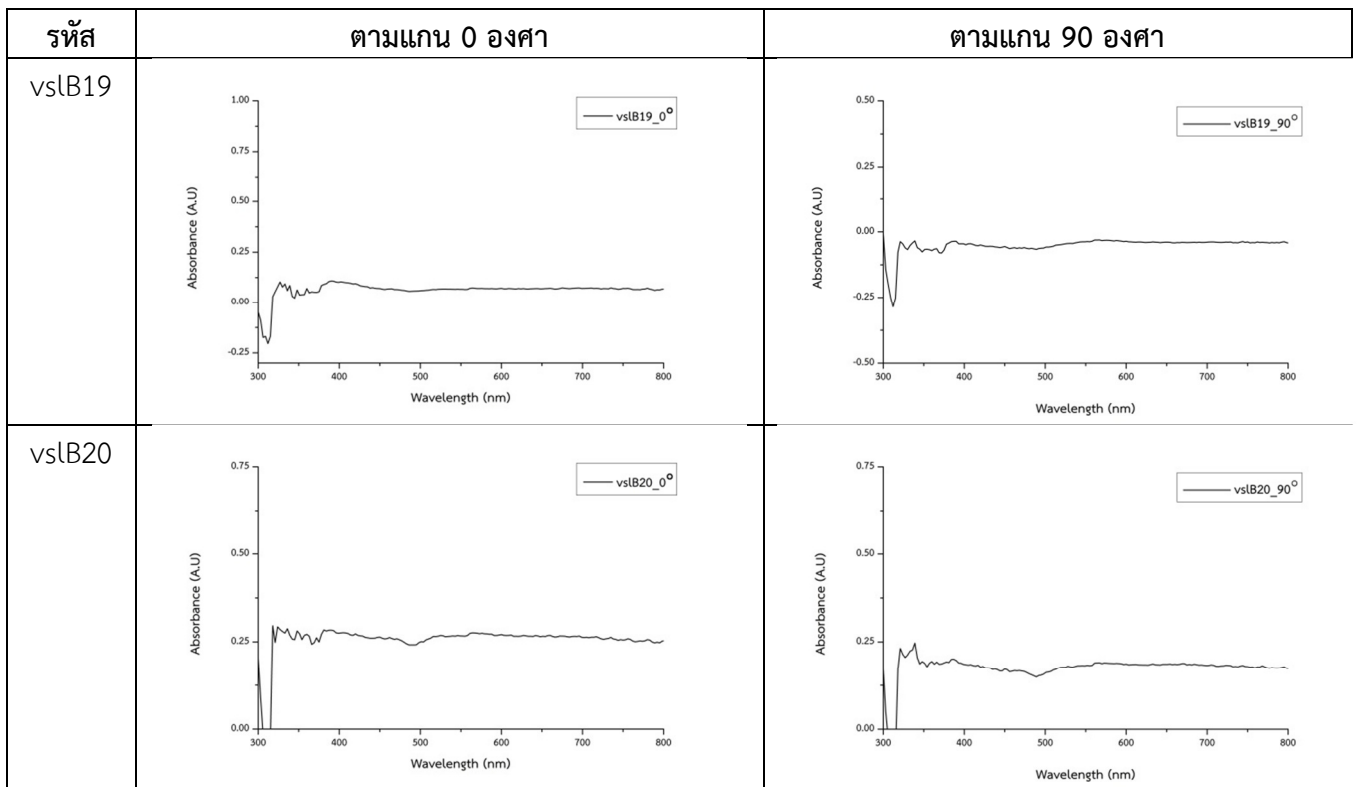
ตารางที่ 4.16 ผลการดูดกลืนแสงช่วง UV-VIS-NIR ของพอลิเมอร์ไฟรอสีอ่อนโทนฟ้าเทา จากแหล่งศรีลังกา



รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
vsLB2		
vsLB3		
vsLB4		
vsLB6		
vsLB7		

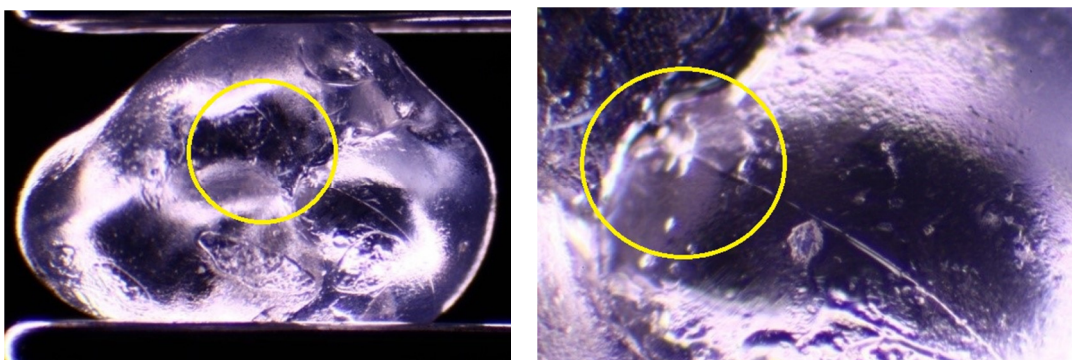
รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
vsLB8		
vsLB9		
vsLB10		
vsLB11		
vsLB12		

รหัส	ตามแกน 0 องศา	ตามแกน 90 องศา
vsLB13		
vsLB14		
vsLB15		
vsLB17		
vsLB18		

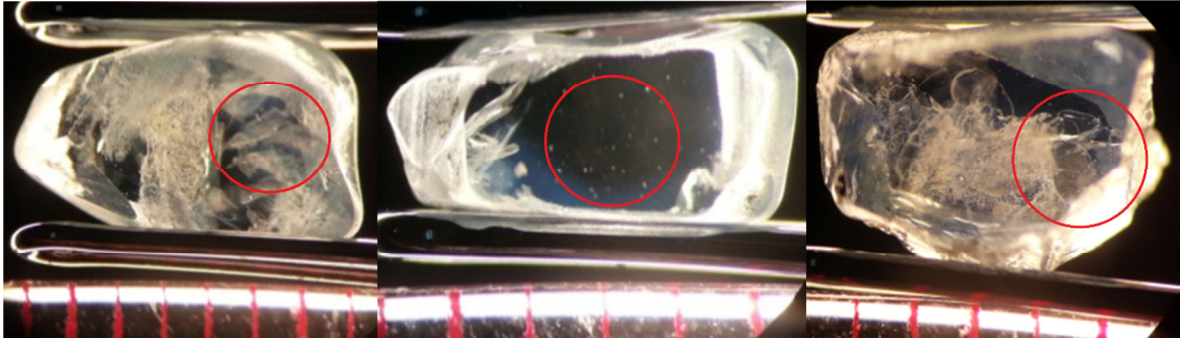


4.4 รวบรวมชนิด มลทินแร่ มลทินต่างๆ

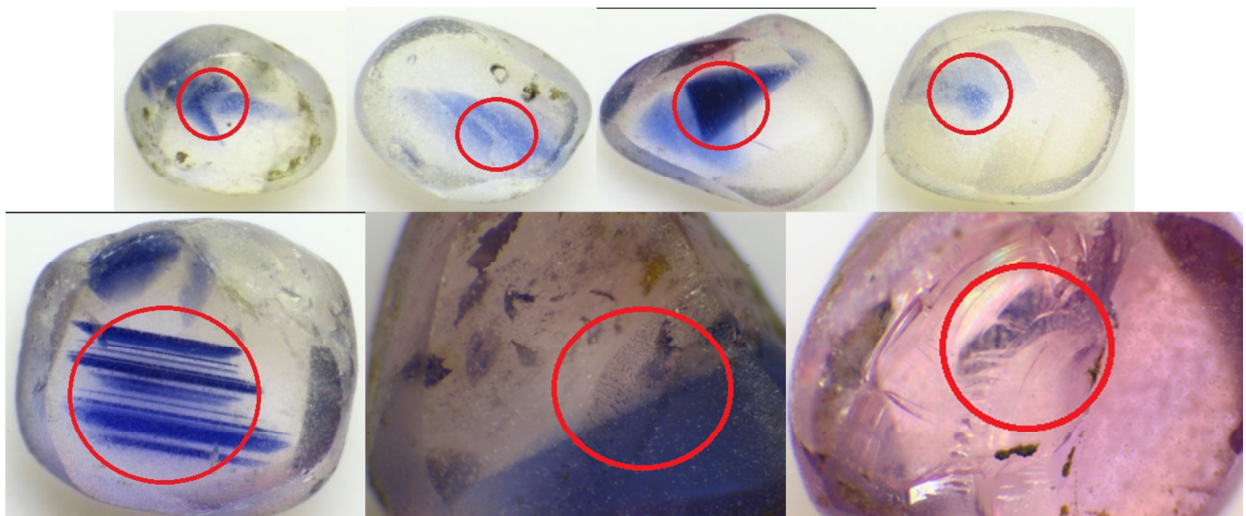
การวิเคราะห์ลักษณะภายในของตัวอย่าง โดยทำการตรวจสอบลักษณะของมลทิน ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อณูมณีแบบสเตรียออสโคปด้วยกำลังขยาย 40 เท่า ทั้งชนิดปรกติและชนิดจุ่มของเหลวหนืด ภาพถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิทัลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ซึ่งผลการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อณูมณีลักษณะมลทินภายในของพลอยแซฟไฟร์ไร้สี แหล่งมาดากัสการ์ มลทินเหล่านี้เป็นเครื่องบ่งชี้ว่า เป็นตัวอย่างของแซฟไฟร์ธรรมชาติที่พบ เช่น มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) ออกไซด์ของเหล็ก (Fe_2O_3) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) และมลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) แสดงดังในรูปที่ 4.30-4.33



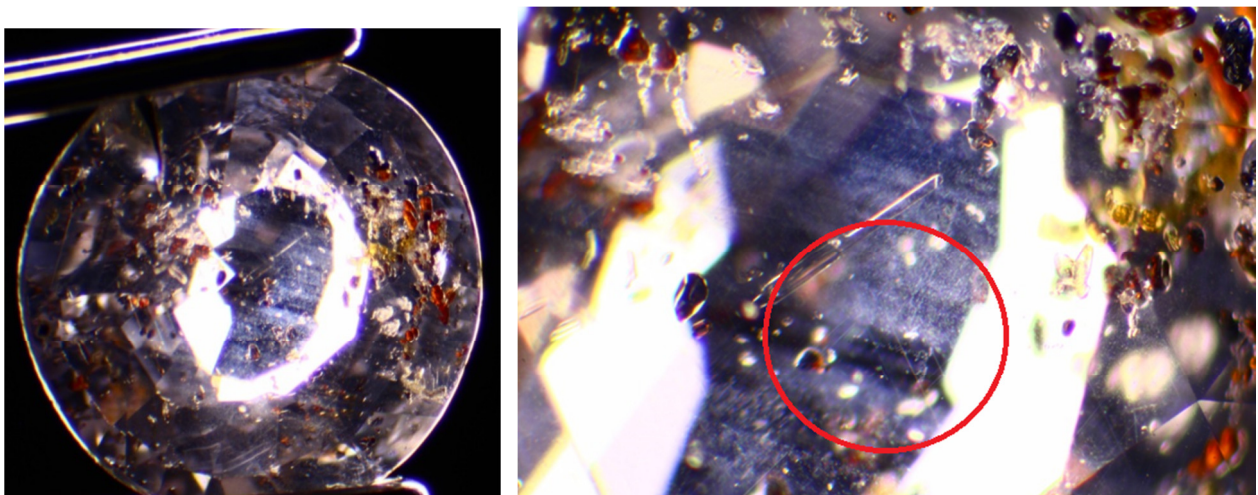
รูปที่ 4.30 ลักษณะมลทินชนิด มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ดำหนึชนนก (feather) และมลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อนโทนม่วง จากแหล่งศรีลังกา

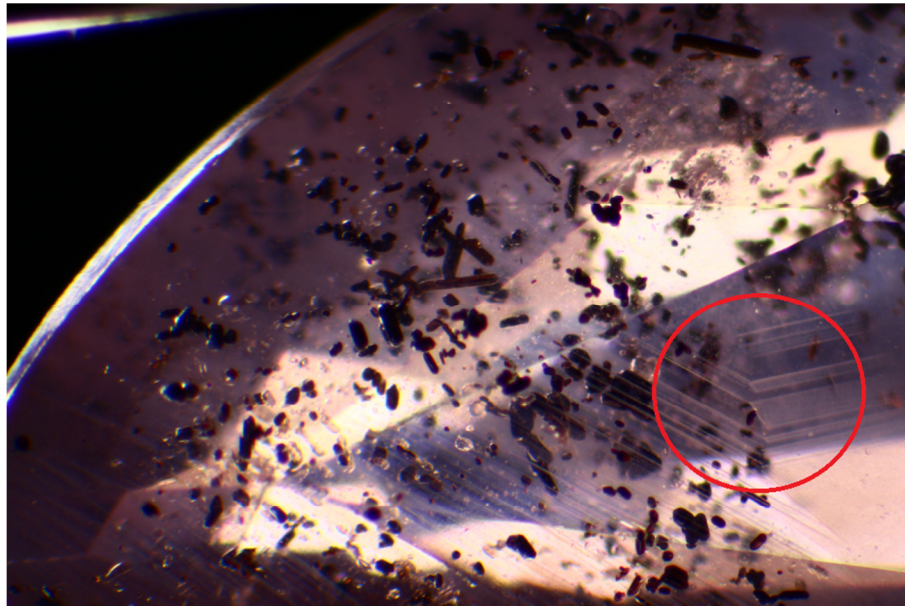


รูปที่ 4.31 ลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ตำหนิขนนก (feather) และมลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีฟ้าอ่อน จากแหล่งมาดากัสการ์



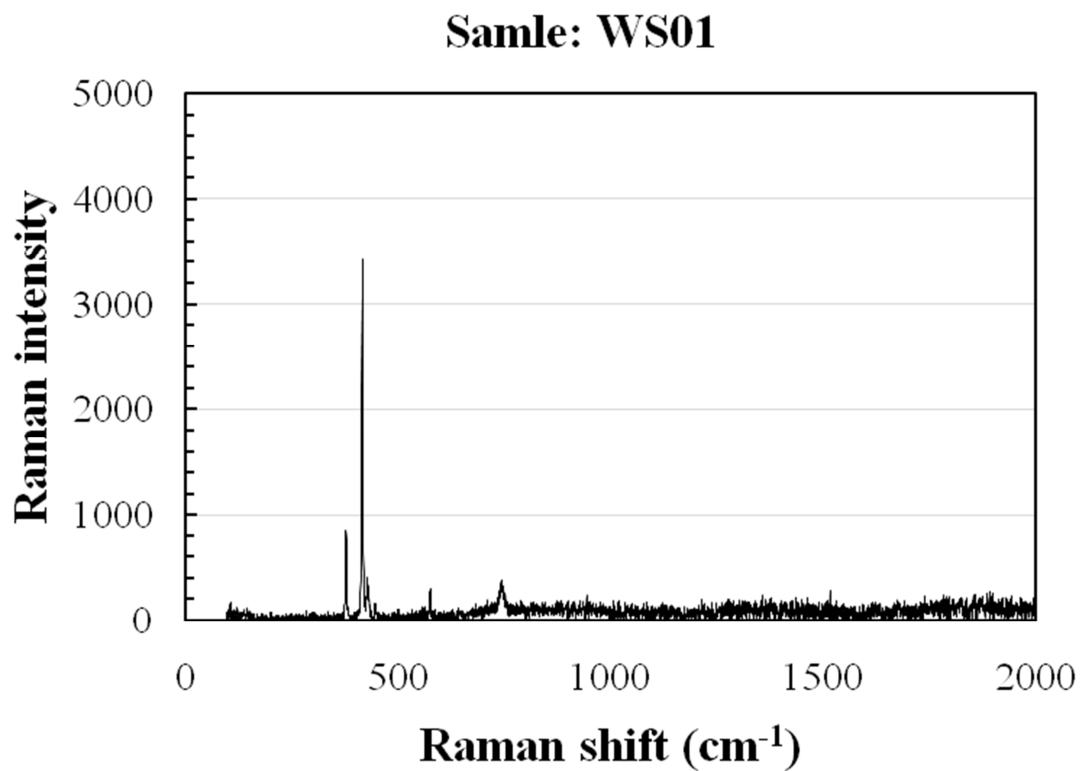
รูปที่ 4.32 ลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ตำหนิขนนก (feather) มลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อน และแถบสี (color zoning) จากแหล่งเวียดนาม

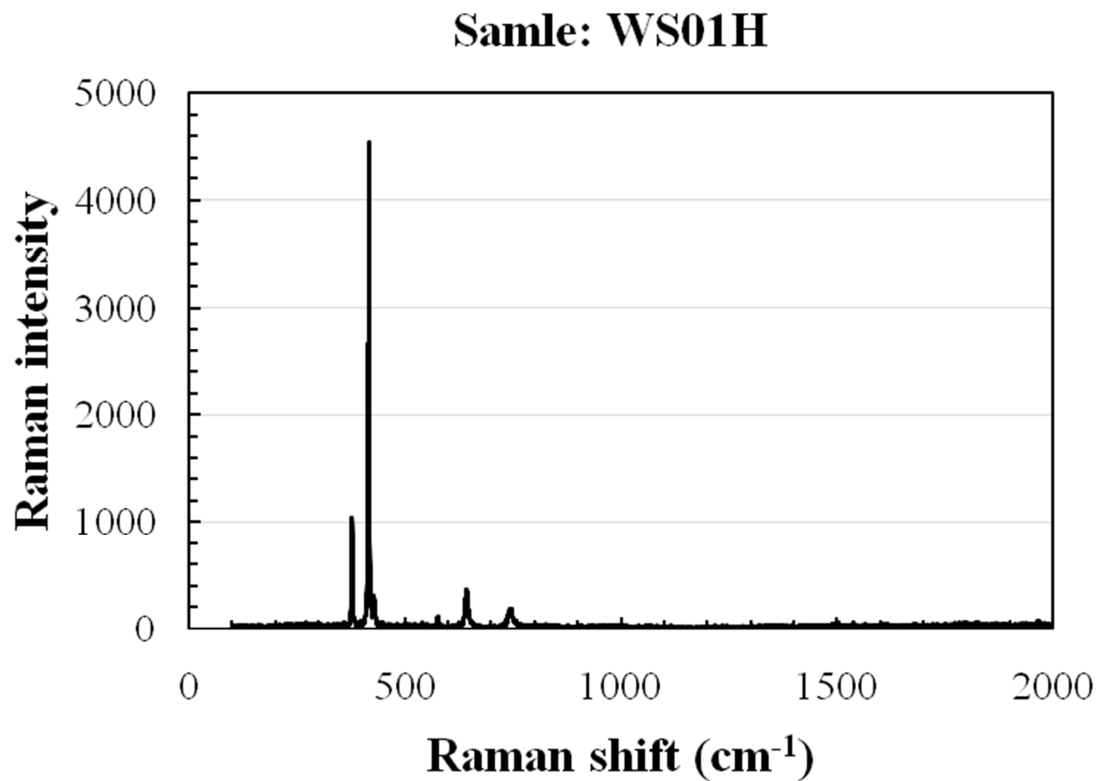




รูปที่ 4.33 พลอยแหล่งมาบิล่า ประเทศไนจีเรีย แสดงลักษณะมลทินชนิด มลทินเส้นสีหักมุม (Angular color banding) มลทินฝุ่น (Cloud of dust particle) ตาหินขนนก (feather) มลทินรอยนิ้วมือ (Fingerprint) ที่พบในพลอยแซฟไฟร์สีอ่อน แถบสี (color zoning) และ ผลึกแร่ต่างๆ

4.4.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง Raman Spectroscopy





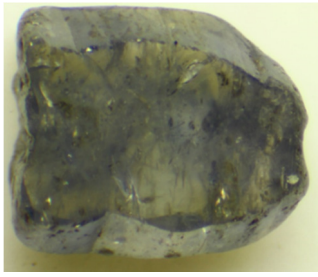
รูปที่ 4.34 กราฟจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy

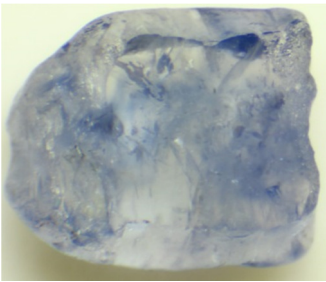
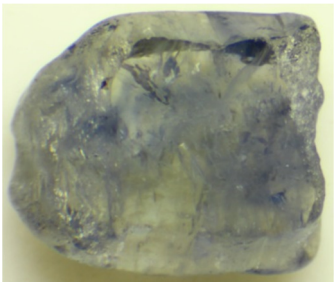
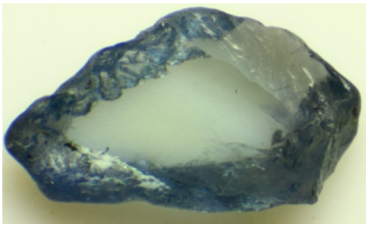
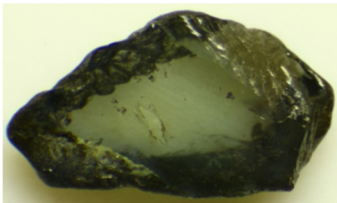
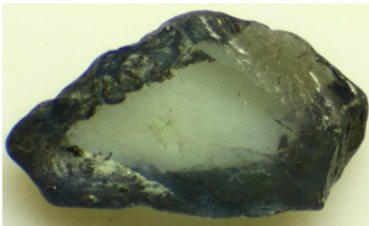
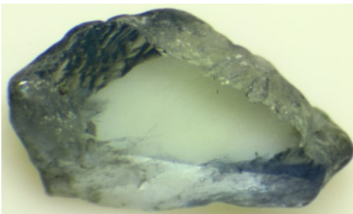
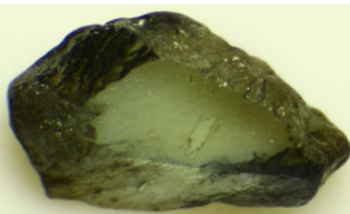
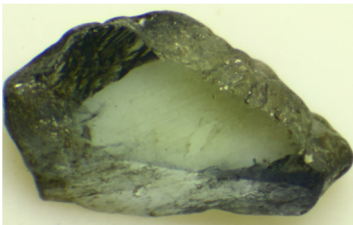
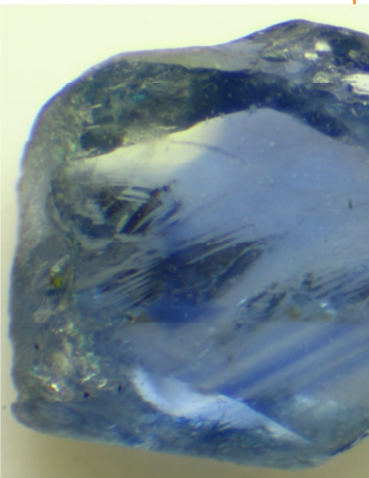
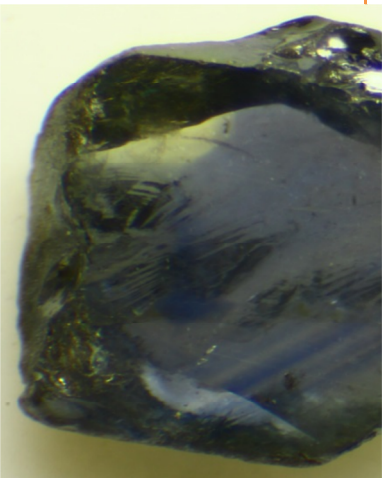
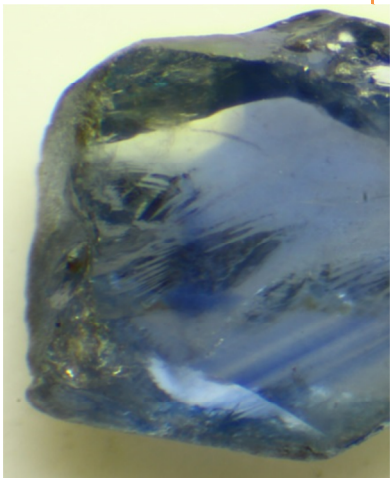
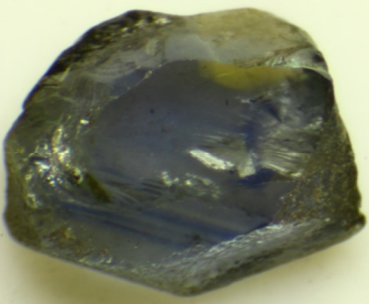
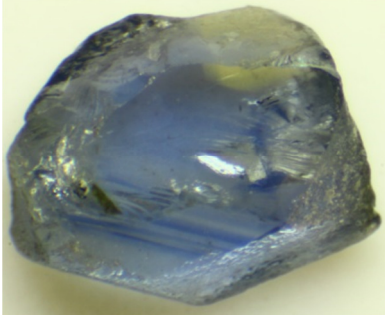
กราฟรามานดังในรูป 4.34 แสดงตำแหน่งโหมดที่ active ของคอร์ันดัมจำนวน 7 โหมด ดังนี้ 378 (E_g), 418 (A_{1g}), 432 (E_g), 451 (E_g), 578(E_g), 645(A_{1g}), 751 (E_g) cm^{-1} โดยไม่ได้แสดงว่ามีอินคลูชันที่เด่นชัด

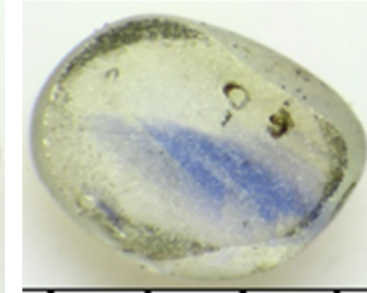
4.5 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน

ตารางที่ 4.17แสดงผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพพลอย ด้วยไนโตรเจนไอออนสะสมโดสจนถึง โดส 8×10^{17} atom/ cm^2 พบว่า พลอยจากแหล่งต่างๆ ศรีลังกา (CL01) มาร์ดากัสกา (MD01) แพร่ (P003) เวียดนาม(VN01) มีการเพิ่มขึ้นของสีเหลือง และสีน้ำเงิน ทำให้โดยรวมเห็นพลอยเป็นสีเขียวมากขึ้น และที่ผิวพลอยสียึดขึ้น แต่เมื่อนำไปทำความสะอาดด้วยพลาสมาไนโตรเจนอาร์กอนพบว่าพลอยสะอาดขึ้น

ตารางที่ 4.17 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันทั้งด้านหน้าพลอยและหลังพลอย

รหัส	ก่อนทดลอง	โดส 8×10^{17} atom/ cm^2	พลาสมาไนโตรเจนอาร์กอน
CL01 - 01 ด้านหน้า			

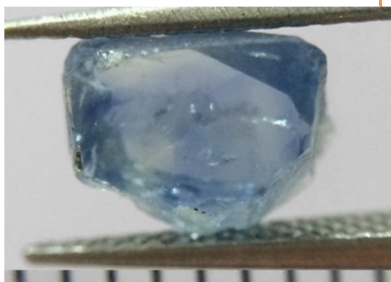
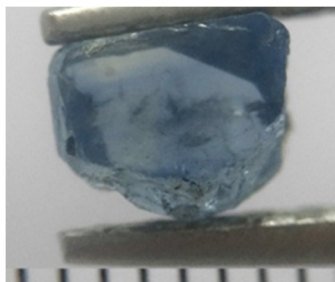
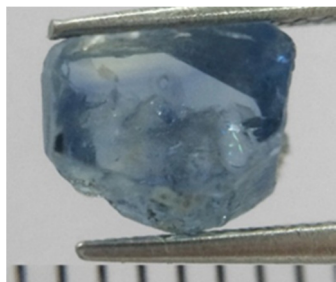
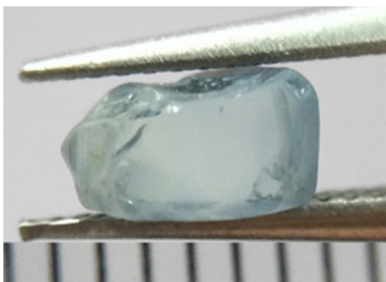
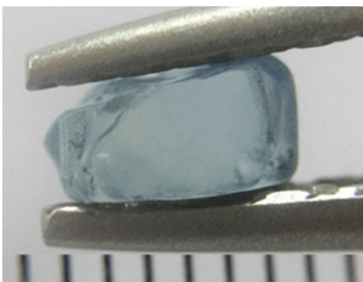
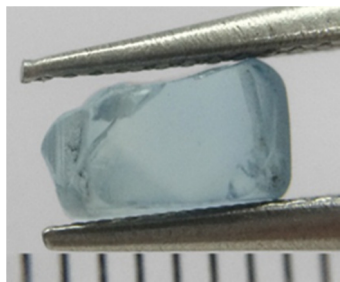
รหัส	ก่อนทดลอง	โดส $8 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^2$	พลาสมาไนโตรเจนอาร์กอน
CL01 - 02 ด้านหลัง			
MD01 - 01 ด้านหน้า			
MD01 - 02 ด้านหลัง			
P003 - 01 ด้านหน้า			
PO03 - 02 ด้านหลัง			

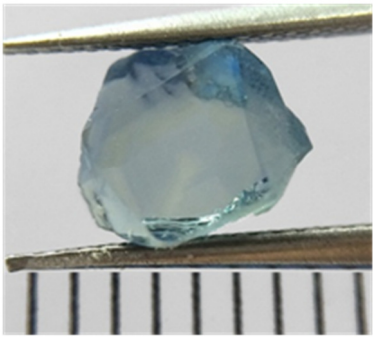
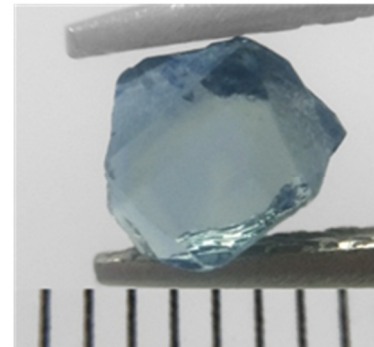
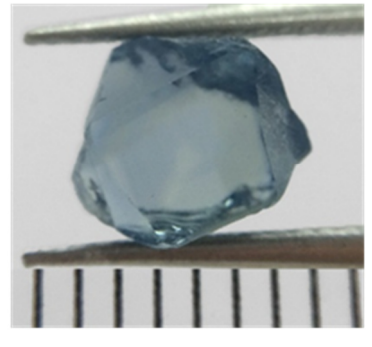
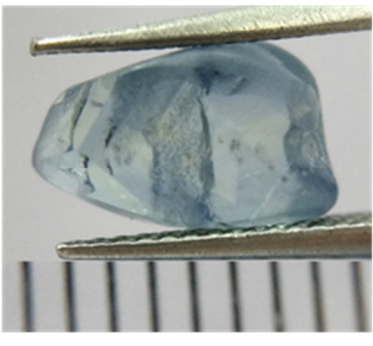
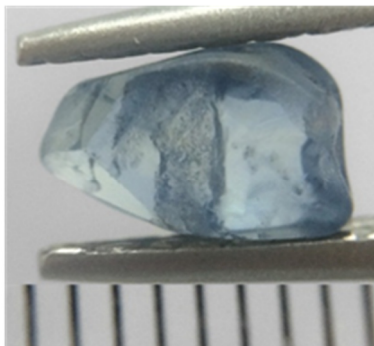
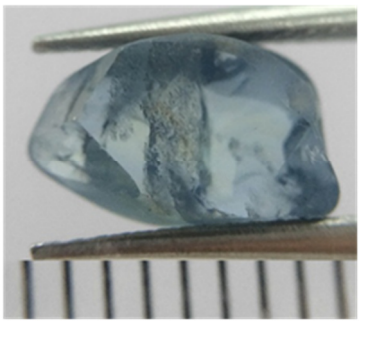
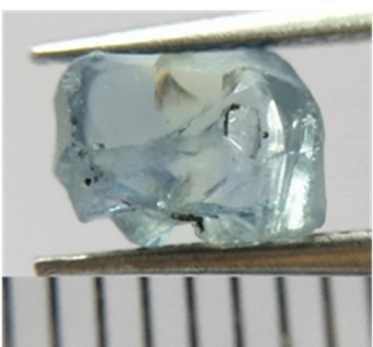
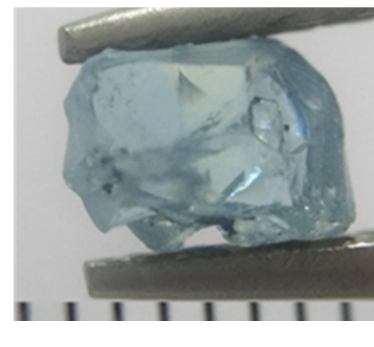
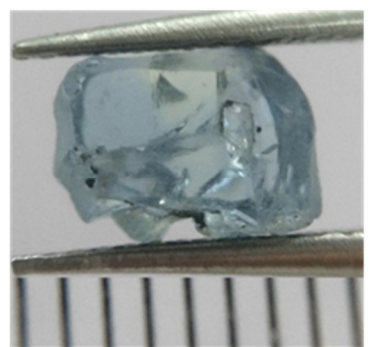
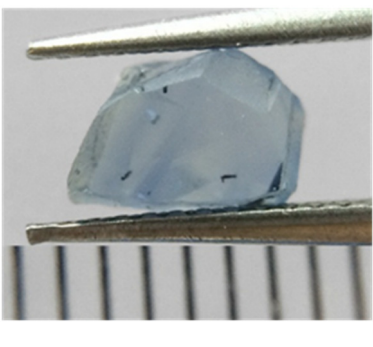
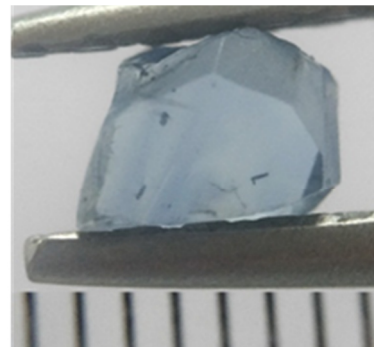
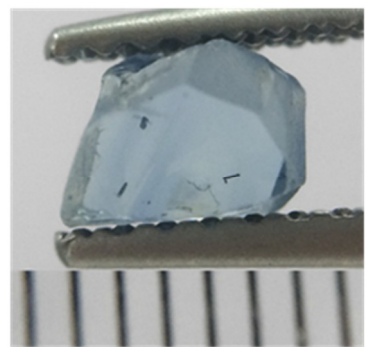
รหัส	ก่อนทดลอง	โดส $8 \times 10^{17} \text{ atom/cm}^2$	พลาสมาไนโตรเจนอาร์กอน
VN01			

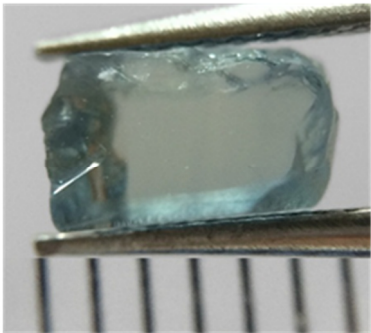
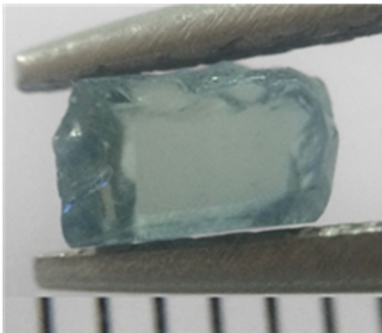
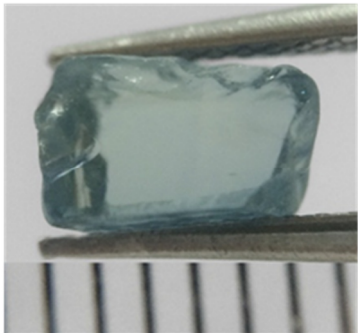
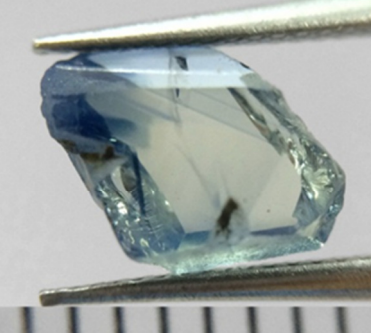
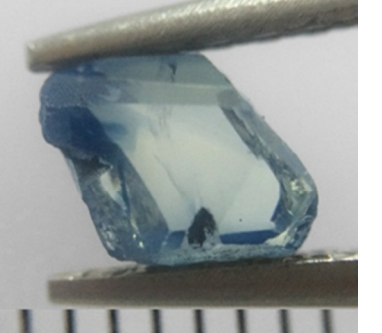
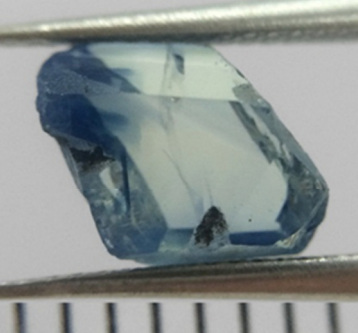
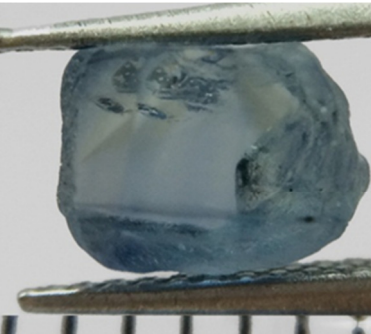
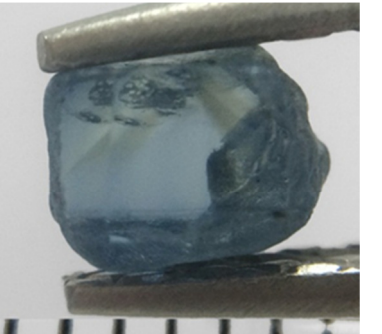
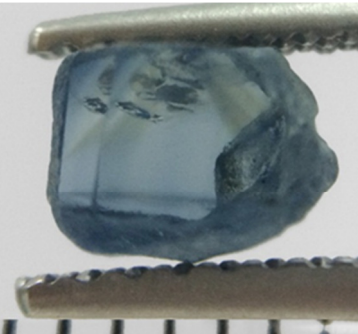
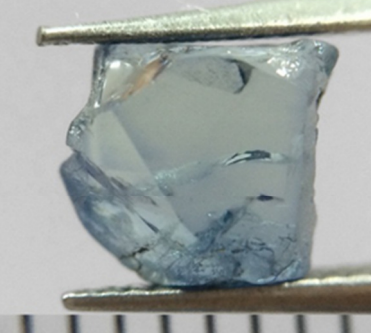
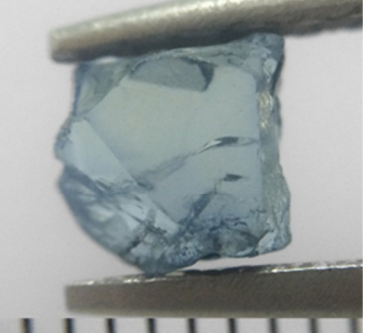
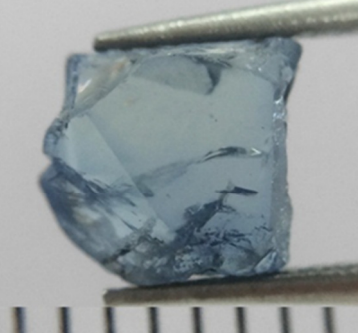
4.6 การทดลองไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันแล้วทดลองอบอ่อน

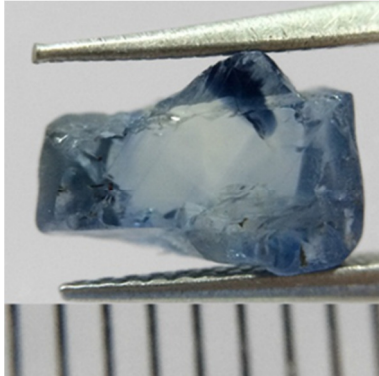
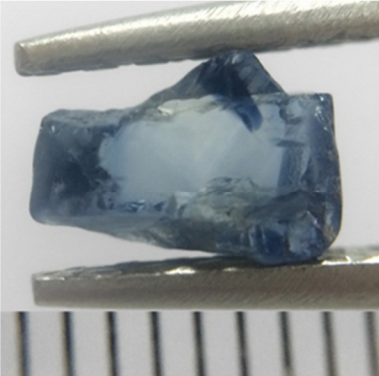
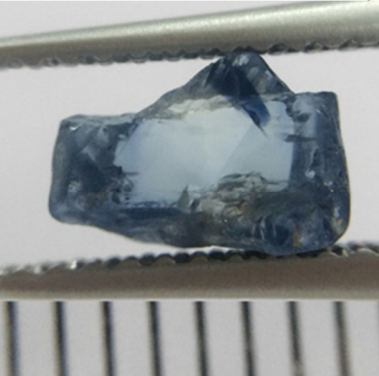
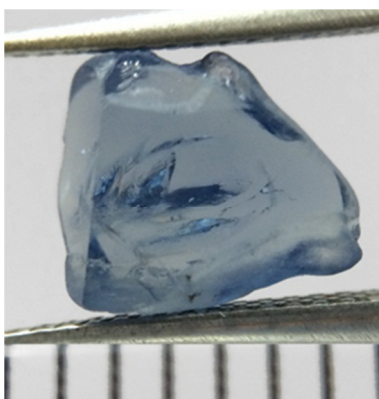
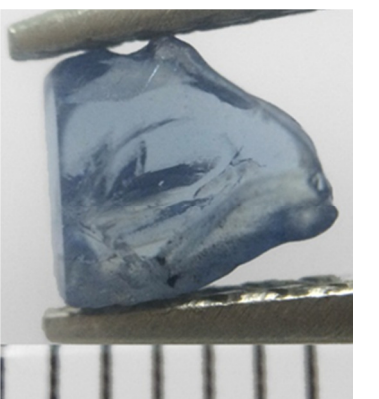
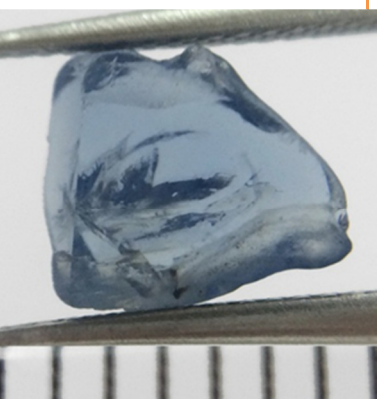
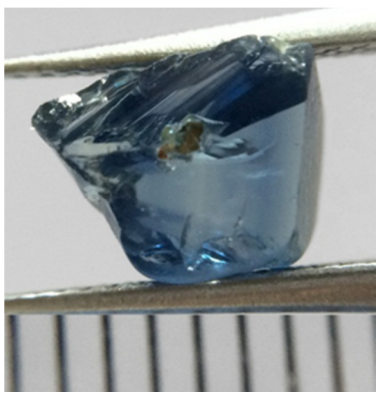
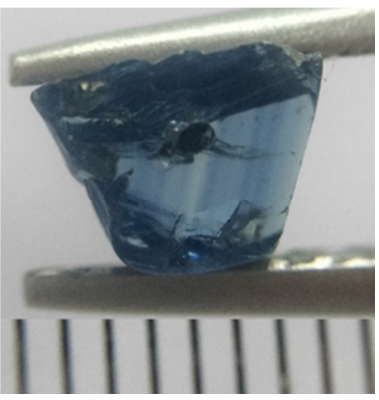
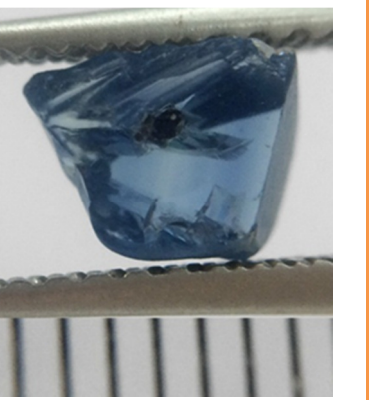
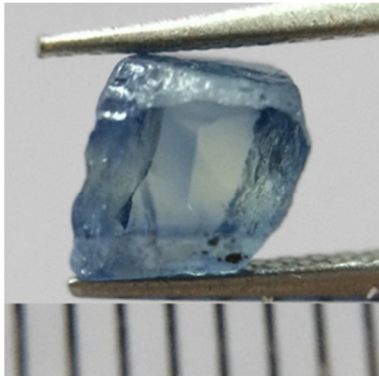
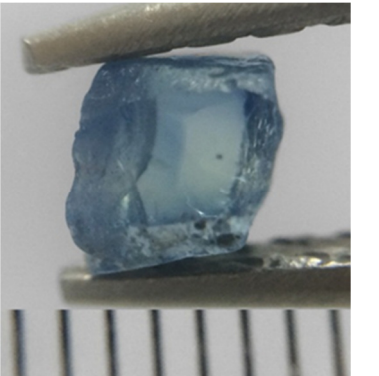
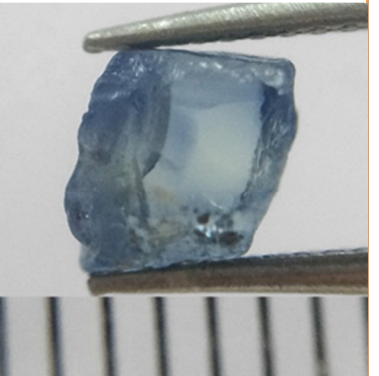
ได้ปรับการทดลองโดยใช้ไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันพลังงาน 50 keV เวลา 5 ชั่วโมงต่อ 1 ครั้ง ทดลองซ้ำ 4 ครั้งแล้วนำมาทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเวลา 5 ชั่วโมง ผลการเปลี่ยนแปลงพบว่าผิวพลอยสะอาดขึ้น สีเหลืองที่อยู่ในพลอยลดลง พลอยมีสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น การกระจายของสีน้ำเงินสม่ำเสมอ และพลอยใสสะอาดมากขึ้น แสดงในตารางที่ 4.18 และ 4.19

ตารางที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างจากแหล่งมาดากัสการ์ ที่ผ่านไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันใช้พลังงาน 50 keV เวลา 5 ชั่วโมง ต่อ 1 ครั้ง ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง แล้วมาทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

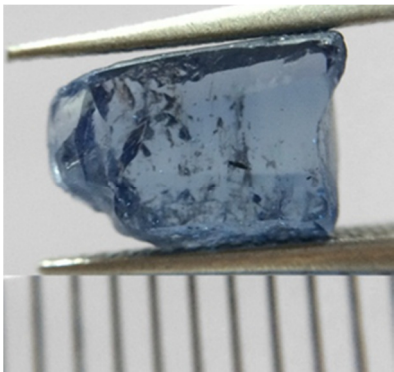
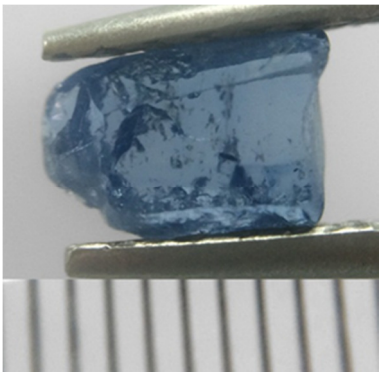
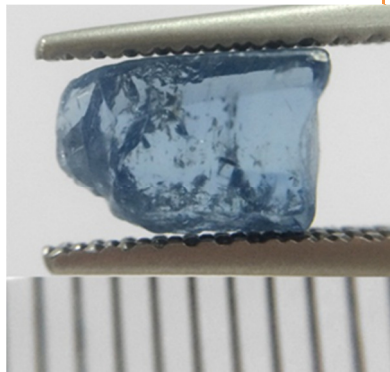
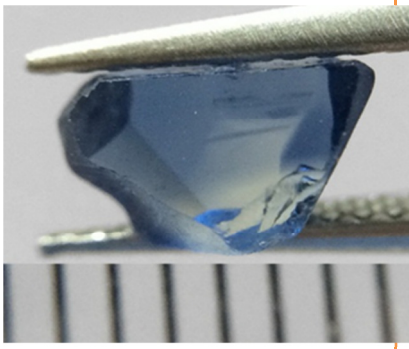
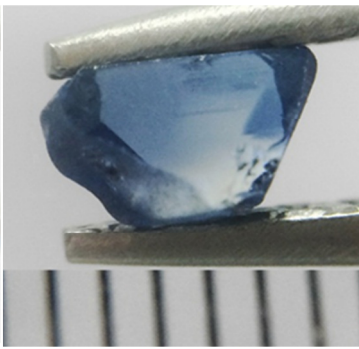
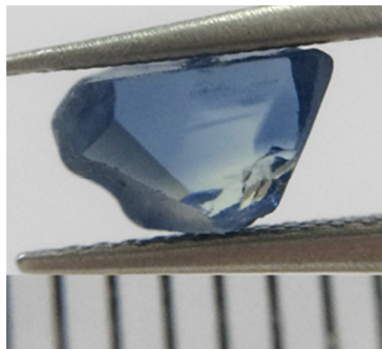
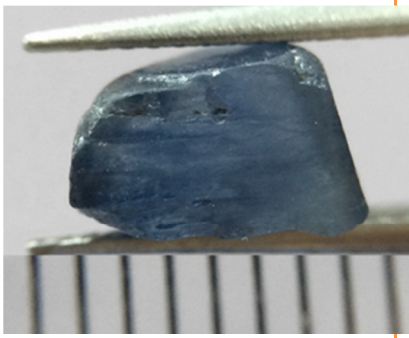
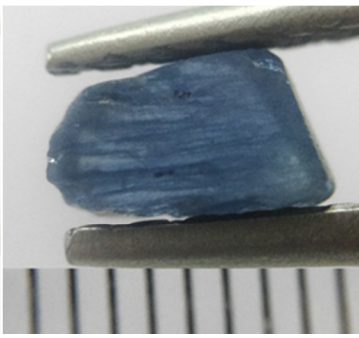
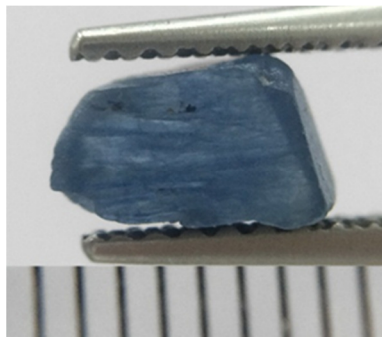
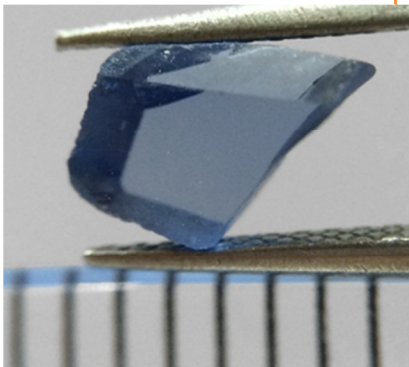
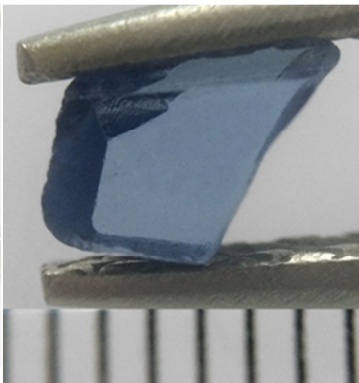
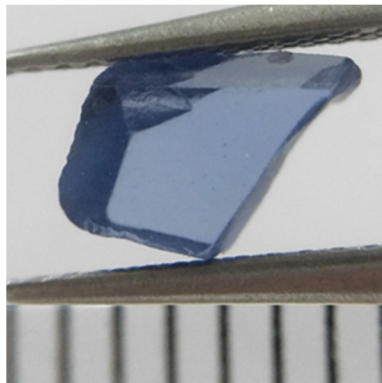
พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		

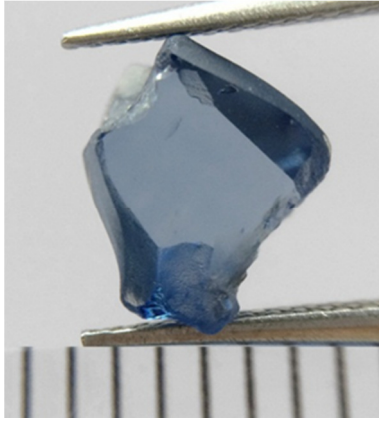
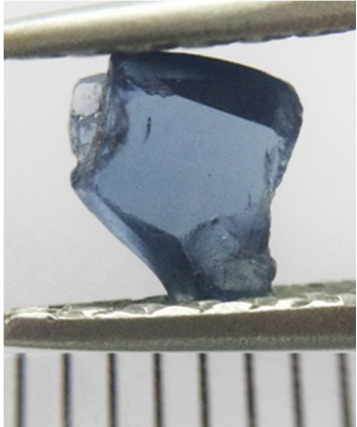
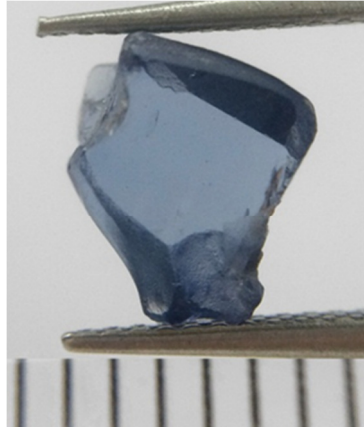
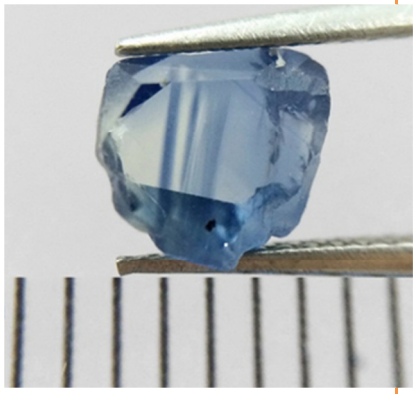
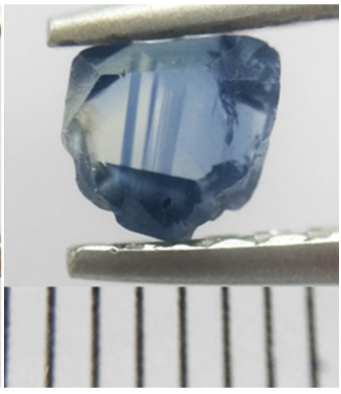
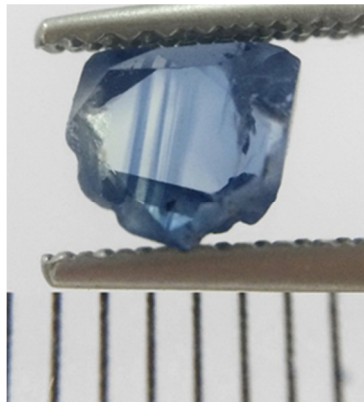
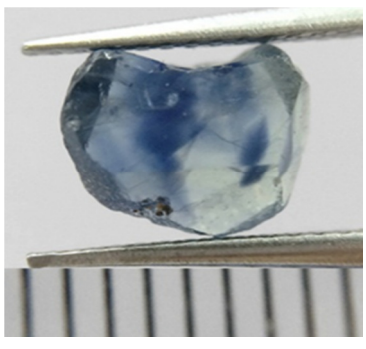
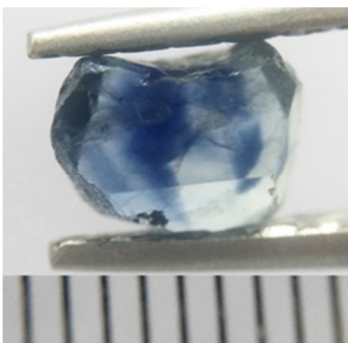
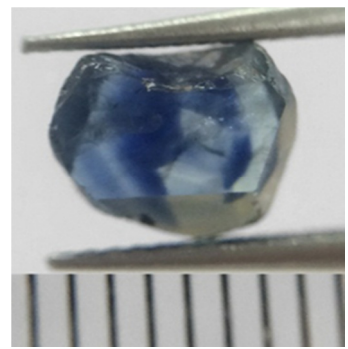
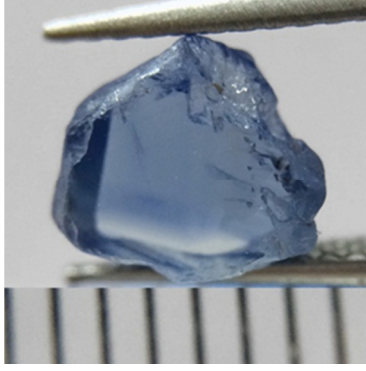
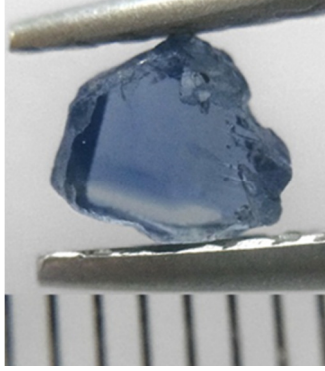
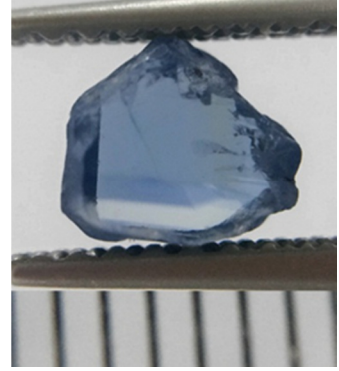
พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

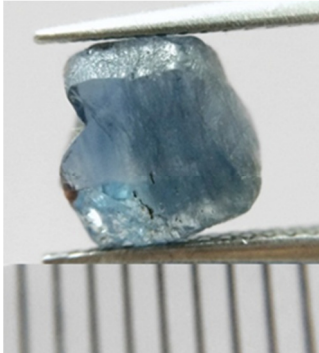
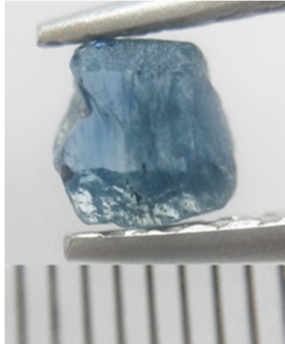
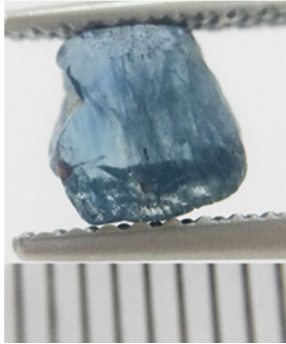
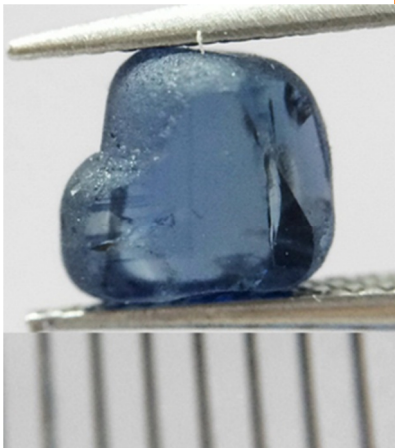
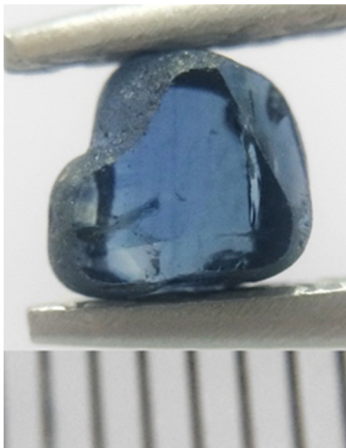
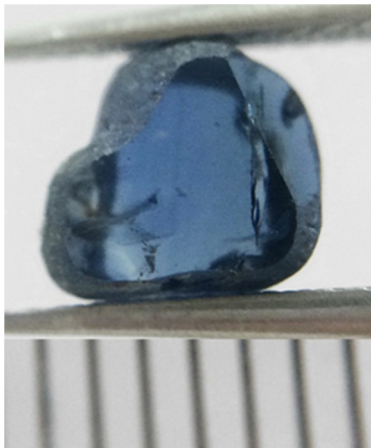
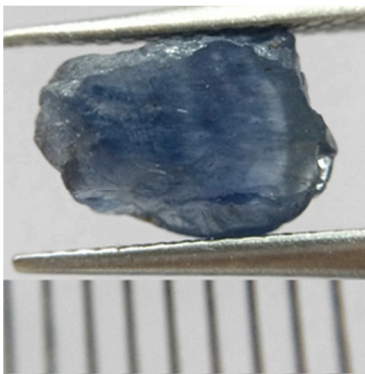
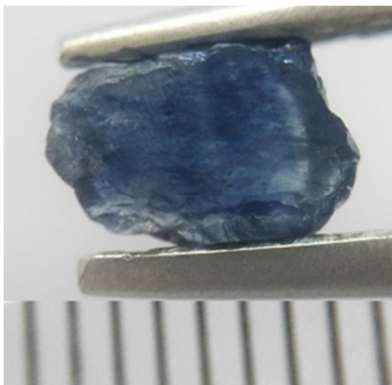
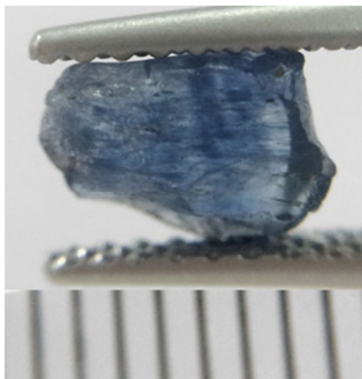
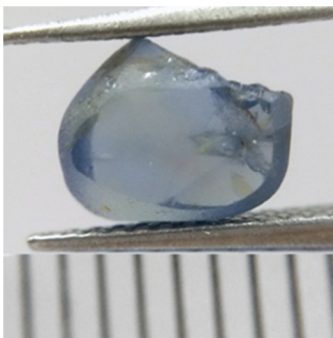
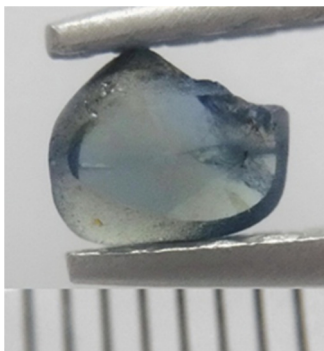
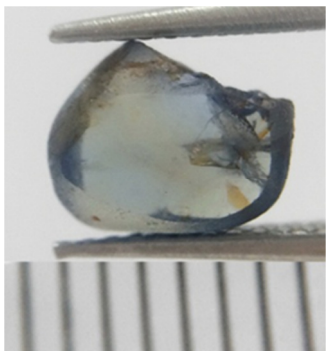
พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

ตารางที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงของพลอยตัวอย่างจากแหล่งเด่นชัย ประเทศไทย ที่ผ่านไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันใช้พลังงาน 50 keV เวลา 5 ชั่วโมง ต่อ 1 ครั้ง ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง แล้วมาทดลองอบอ่อนที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

พลอยก่อนทดลอง	หลังไนโตรเจนไอออนครั้งที่ 4	หลังอบอ่อน
		
		
		
		

เป็นที่ทราบกันถึงสาเหตุการเกิดสีในพลอยคอร์ันดัม มีกระบวนการเกิดสี ได้แก่ การดูดกลืนไอออนของธาตุโลหะในกลุ่มธาตุทรานซิชันการถ่ายเทพาระหว่างไอออนของธาตุทรานซิชัน และการเกิดศูนย์กลางสี

การดูดกลืนไอออนของธาตุโลหะ (Metal ions) ปริมาณของธาตุทรานซิชันเพียงเล็กน้อยในพลอยสามารถดูดกลืนพลังงานแสงตามกระบวนการปลดปล่อยพลังงานเมื่อถูกกระตุ้นออกมาให้เราสามารถมองเห็นได้ ดังนั้นเมื่อธาตุที่ให้สีอยู่ในรูปของไอออนแพร่กระจายในโครงสร้างผลึกจึงเกิดการมองเห็นสีที่แตกต่างกันออกไปในโครงสร้างผลึกของพลอยแต่ละชนิดที่ต่างไป

การถ่ายเทประจุ (Charge transfer) มาจากการเคลื่อนที่ไปมาของอิเล็กตรอนระหว่างไอออนและเลือกดูดกลืนพลังงานและช่วงแสง ผลจึงทำให้เห็นสี และจะเห็นความเข้มของสีและประสิทธิภาพดีกว่าการเกิดสีของการดูดกลืนไอออนของธาตุโลหะ

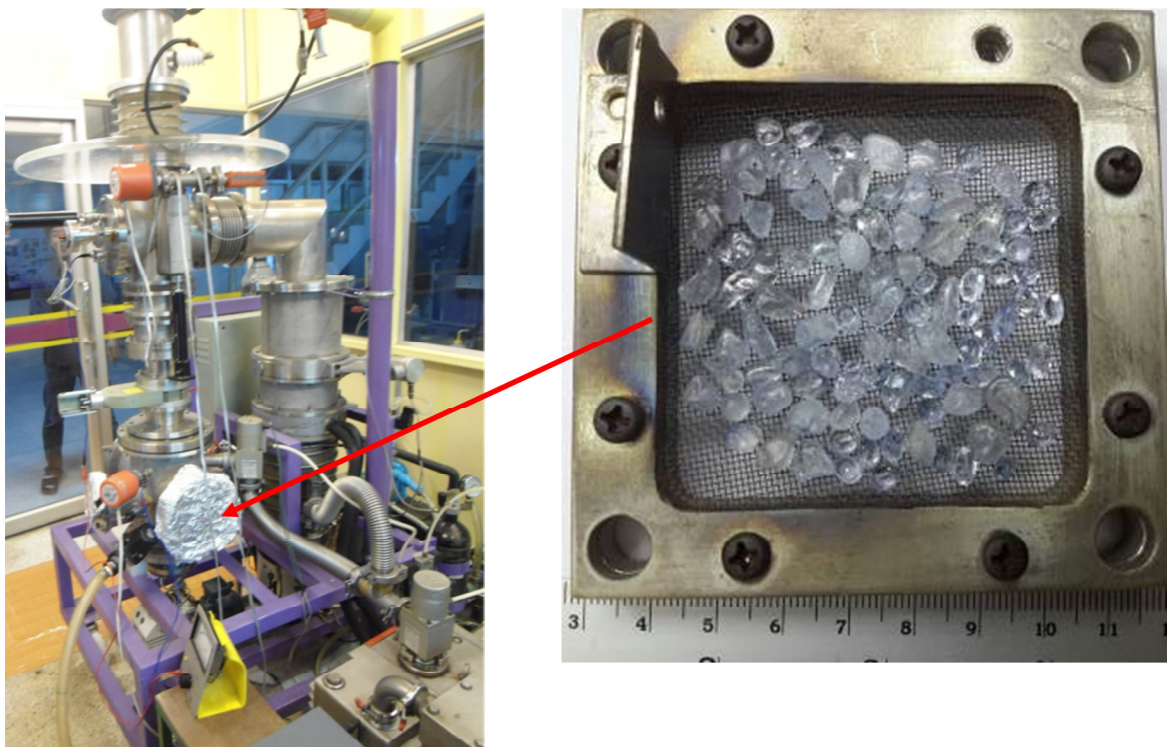
ศูนย์กลางของสี (Color centers) จะเกิดจากความผิดปกติของโครงสร้างผลึก (crystal defects) ที่สามารถดูดกลืนแสงในบางช่วงพลังงาน ความผิดปกติเหล่านี้อาจเกิดมาพร้อมกับการเกิดผลึก หรือสร้างให้เกิดภายหลัง เช่น การใช้พลังงานสูง เพื่อให้มีการเคลื่อนออกจากตำแหน่งของอะตอมให้เกิดเป็นช่องว่าง (vacancy color center) หรือให้อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายจากวงจรปกติ (electron color center)

กรณีของคอร์ันดัมซึ่งเป็นพลอยชนิดที่เรียกว่า “Allochromatic” ซึ่งการเกิดสีเนื่องมาจากธาตุเจือที่อยู่ในพลอย [3] ผลของไอออนที่มีต่อการเปลี่ยนสีของคอร์ันดัมนี้มีหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของมลทิน (impurity) ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่ให้สี การแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) การเกิด color center และการเกิด defect ในเนื้อพลอย [4] ซึ่งในงานวิจัยของคณะผู้วิจัย พบว่า ในกรณีของพลอยสีฟ้าอ่อนและมีธาตุเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ซึ่งให้สีน้ำเงินหลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจนพบว่าสีน้ำเหลืองเจือจางลงหรือหายไปทำให้ได้สีน้ำเงินเพิ่มขึ้นโดยคาดว่าเกิดการ reduction ในพลอยตัวอย่างที่มีสีน้ำเงินอมเขียวจากเฟอร์ริก (Fe^{3+}) หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจนพบว่าทำให้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้น สีเขียวเจือจางลงเกือบหายไป คล้ายคลึงกับการให้ความร้อนกับพลอย ส่งผลให้สารประกอบรูไทล์ (TiO_2) เมื่อได้รับการกระตุ้นจะสลายตัวเข้าไปในโครงสร้างของพลอยและทำให้ Ti^{4+} เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{2+} , เกิด $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ intervalence charge transfer [6] ทำให้มีสีน้ำเงิน ในการเปลี่ยนแปลงของการทดลองนี้ เป็นผลมาจากการเกิด reduction ในพลอยจากไอออนของไนโตรเจน

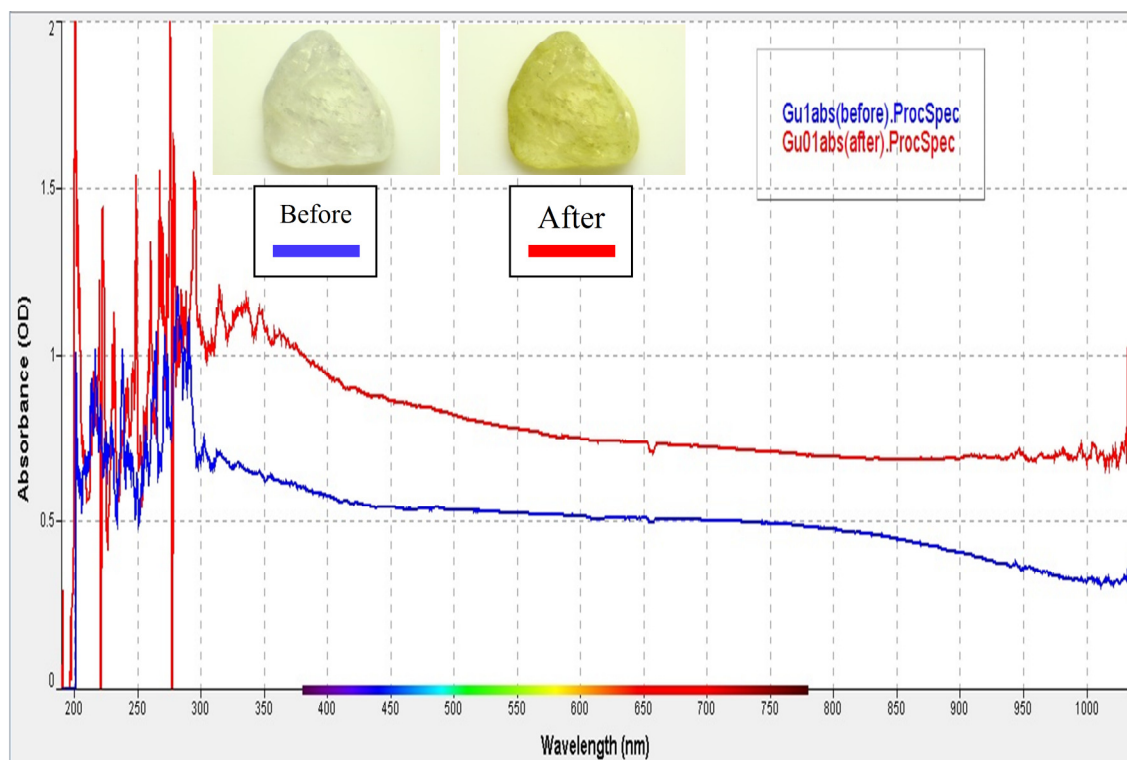
เมื่อพิจารณากลุ่มพลอยสดจากตัวอย่างทั้งหมด ทั้งมาดากัสการ์และแอฟริกาใต้ ดังตารางที่ 4.18-4.19 พบว่าพลอยทั้งหมดมีสีฟ้าอ่อน บางตัวอย่างขุน และบางส่วนกึ่งโปร่งแสง การทดลองนี้พบว่ามลทินต่างๆ พลอยมีความสะอาดขึ้น พลังงานไอออนน่าจะมีผลต่อการสลายมลทินต่างๆ ที่มีอยู่ เช่น ในรูปภาซต่างๆ และมลทินของไหล (liquid fluid inclusion) ซึ่งมลทินขนาดเล็กเหล่านี้เป็นสาเหตุทำให้เกิดเป็นสีขาวขุ่น อีกทั้งมลทินต่างๆ เหล่านี้เป็นมลทินขนาดเล็กมาก (nano inclusions) ภายใต้กล้องจุลทรรศน์จึงทำให้มองเห็นลักษณะและชนิดของมลทินบางอย่างได้ไม่ชัดเจน

4.7 การปรับปรุงคุณภาพผิวของพลอยแซฟไฟร์สีขาวยด้วยเทคนิคไอออนบ่อ่อน

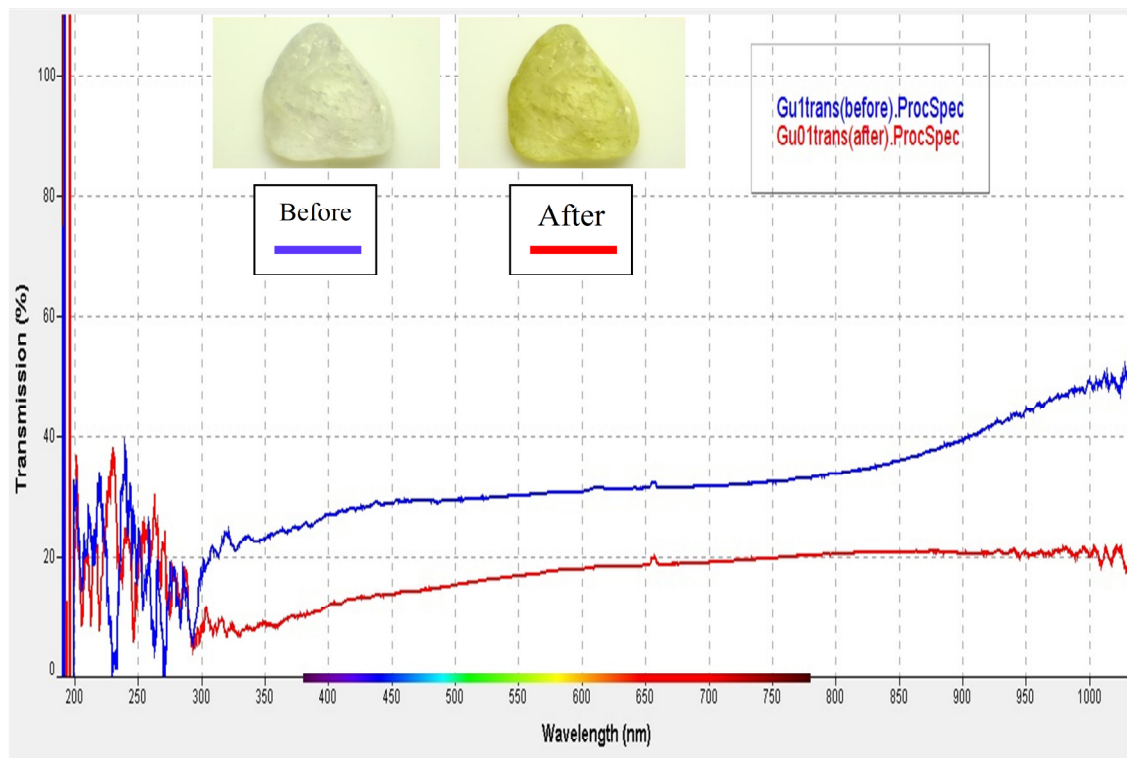
ในการทดลองด้วยเทคนิคการบ่อ่อนร่วมกับไนโตรเจนไอออน พบว่ามีส่วนทำให้ผิวของพลอยมีความสะอาดมากขึ้น การทดลองในส่วนนี้ประกอบด้วย การศึกษาผลของการบ่อ่อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในขณะที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไอออนและการให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยไนโตรเจนเหลว ดังแสดงในรูป 4.35 พลอยจะถูกนำไปวางในที่ว่างพลอยที่มีระบบการให้ความร้อน จากนั้นจะเก็บข้อมูลเปรียบเทียบความใสสะอาด ด้วยการวัดการทะลุผ่านของแสงและการเปลี่ยนแปลงของสีพลอยตัวอย่าง



รูปที่ 4.35 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบคอมแพคพร้อมระบบบอบอ่อนและที่วางพลอย (sample holder)



รูปที่ 4.36 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda01

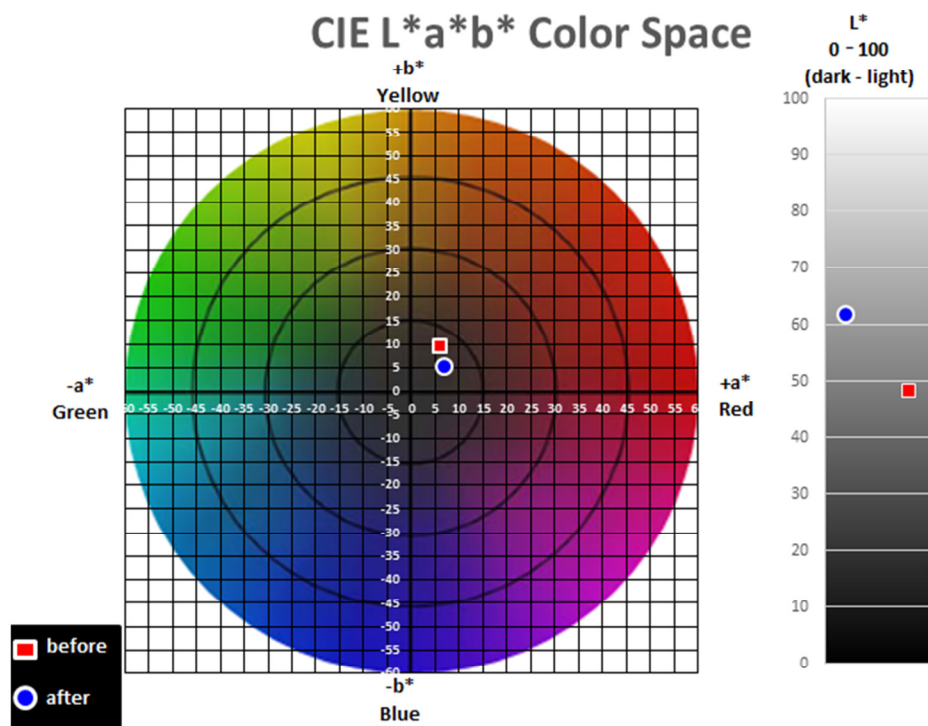


รูปที่ 4.37 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda01

นอกจากนั้นมีการทดลองวัดสีด้วยเครื่องวัดสี (colorimeter) ผลการวัดในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เป็นดังนี้ เมื่อ L^* คือค่าความสว่าง มีค่าเป็น 0 จะแสดงถึงสีดำและมีค่า 100 จะแสดงถึงสีขาว (สีขาว) เมื่อ a^* คือค่าสีแดง/เขียว เมื่อ a^* มีค่าเป็นบวกจะแสดงถึงสีแดง เมื่อ a^* มีค่าเป็นลบจะแสดงถึงสีเขียว ค่า a^* มีค่าอยู่ในช่วง -60 ถึง $+60$ ค่า b^* คือสีเหลือง/สีน้ำเงิน เมื่อ b^* มีค่าเป็นบวกจะแสดงถึงสีเหลือง เมื่อ b^* มีค่าเป็นลบจะแสดงถึงสีน้ำเงิน ค่า b^* มีค่าอยู่ในช่วง -60 ถึง $+60$

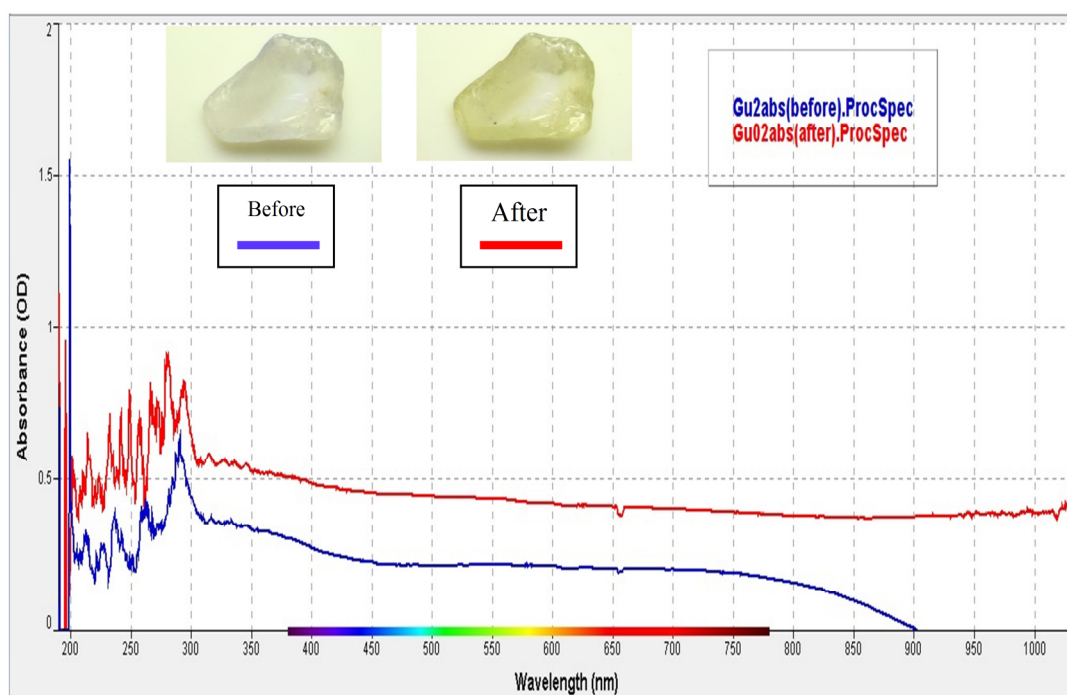


รูปที่ 4.38 พลอยตัวอย่าง Gueda01 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุน จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อน

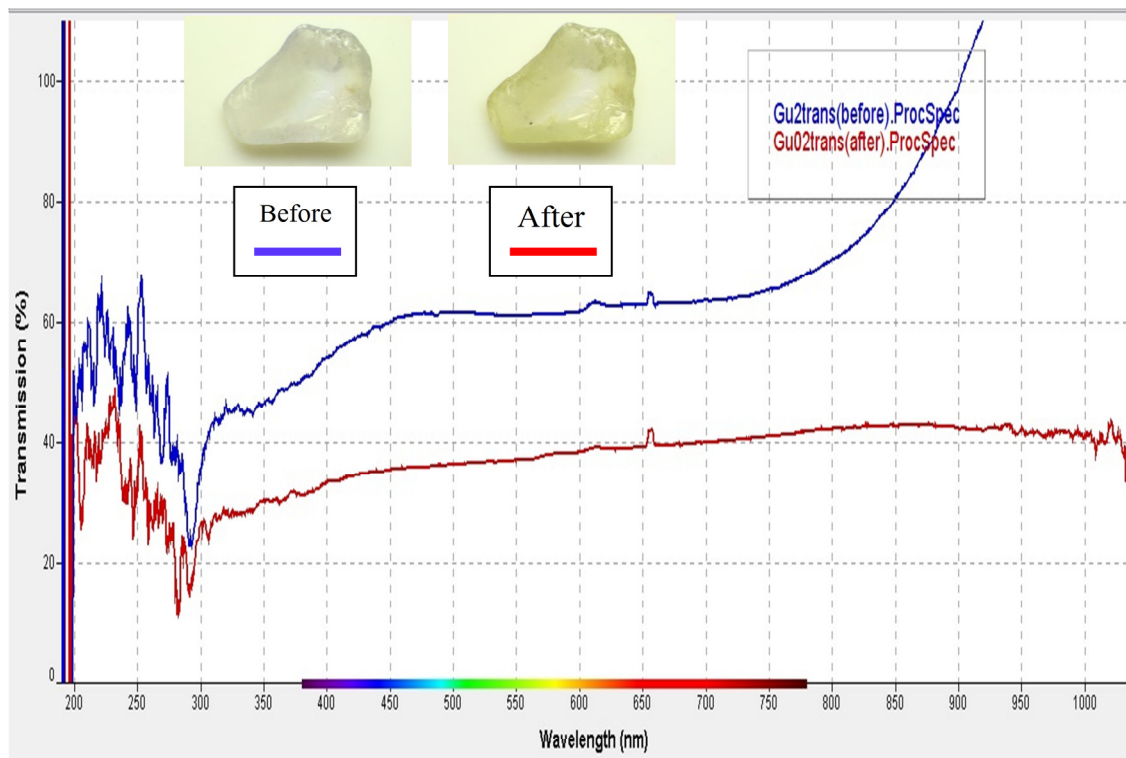


รูปที่ 4.39 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda01 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุ่น

ผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนบอ่อนพลอยตัวอย่าง Gueda01 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุ่น พบว่า พลอยให้สีเหลืองขึ้น และการทะผ่านของแสงมากขึ้น จากค่าก่อนทดลอง $L^* = 48.1$ หลังทดลองเป็น $L^* = 61.9$ และสีเหลือง ค่าก่อนทดลอง $b^* = 5.1$ หลังทดลองเป็น $b^* = 9.4$ ดังรูปที่ 4.36-4.39



รูปที่ 4.40 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จาก แหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda02

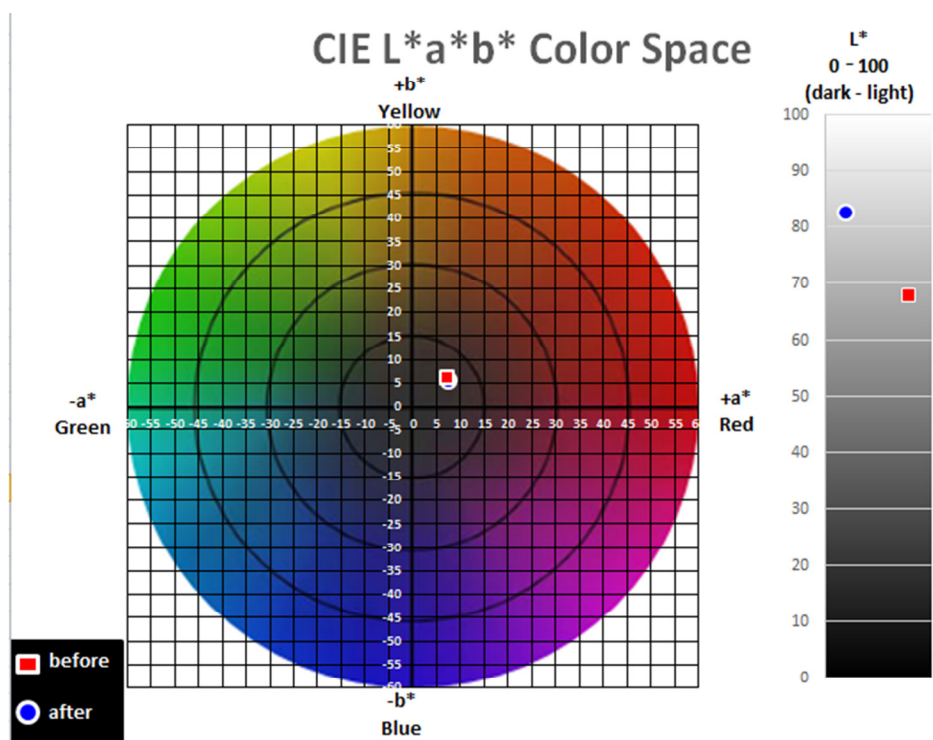


รูปที่ 4.41 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda02



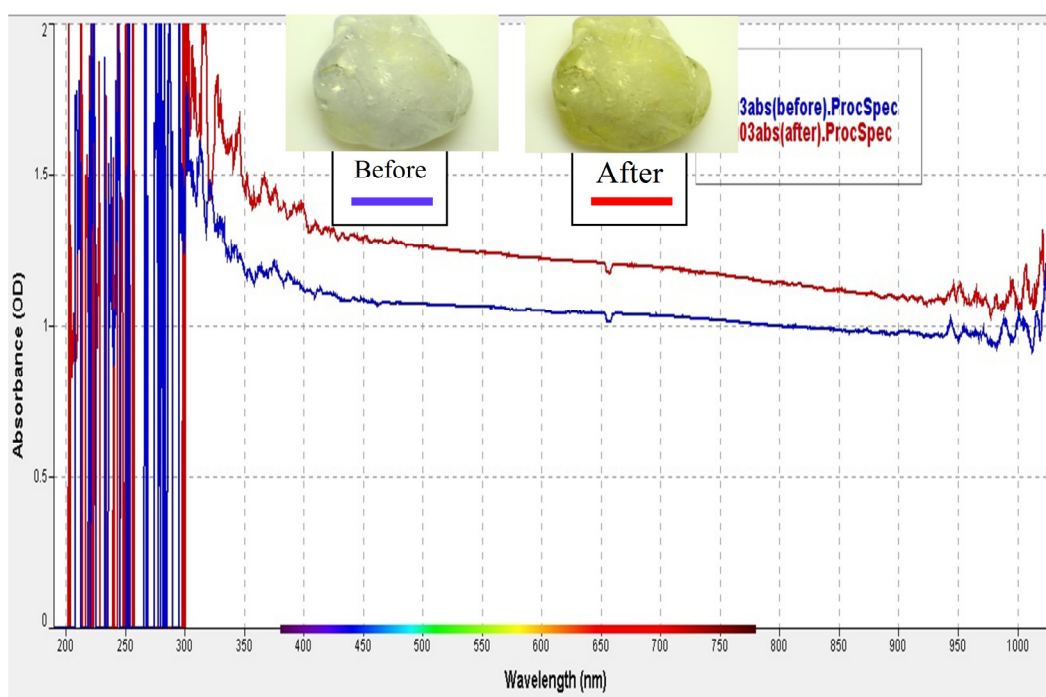
รูปที่ 4.42 พลอยตัวอย่าง Gueda02 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อน

ผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อนพลอยตัวอย่าง Gueda02 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส พบว่า พลอยให้สีเหลืองขึ้นเล็กน้อย และสว่างมากขึ้น จากค่าก่อนทดลอง $L^* = 67.6$ หลังทดลองเป็น $L^* = 82.7$ และสีเหลือง ค่าก่อนทดลอง $b^* = 5.6$ หลังทดลองเป็น $b^* = 6$ ดังรูปที่ 4.40-4.43

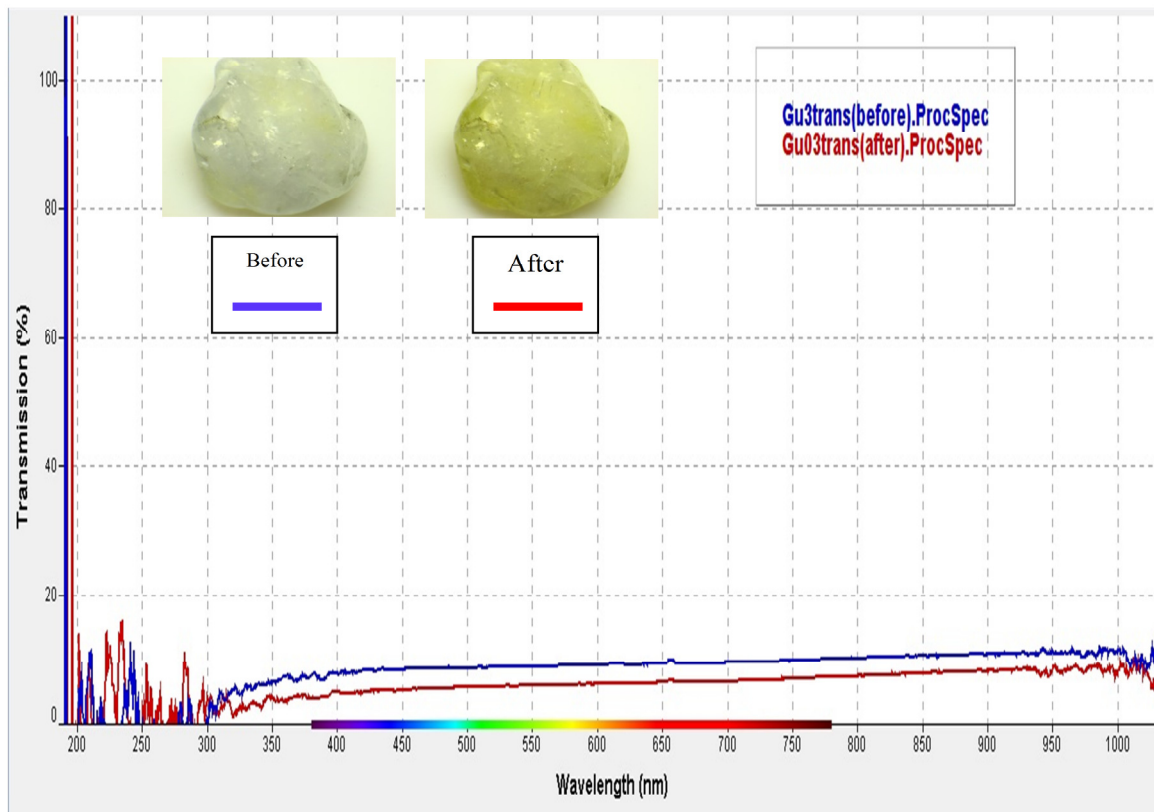


รูปที่ 4.43 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda02 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส

เมื่อพิจารณาผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนอบอ่อนพลอยตัวอย่าง Gueda03 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุ่นทึบ พบว่าพลอยให้สีเหลืองขึ้นและการทะลุผ่านของแสงมากขึ้น จากค่าก่อนทดลอง $L^* = 29$ หลังทดลองเป็น $L^* = 35.6$ และสีเหลือง ค่าก่อนทดลอง $b^* = 3.7$ หลังทดลองเป็น $b^* = 4.9$ ดังรูปที่ 4.44-4.47



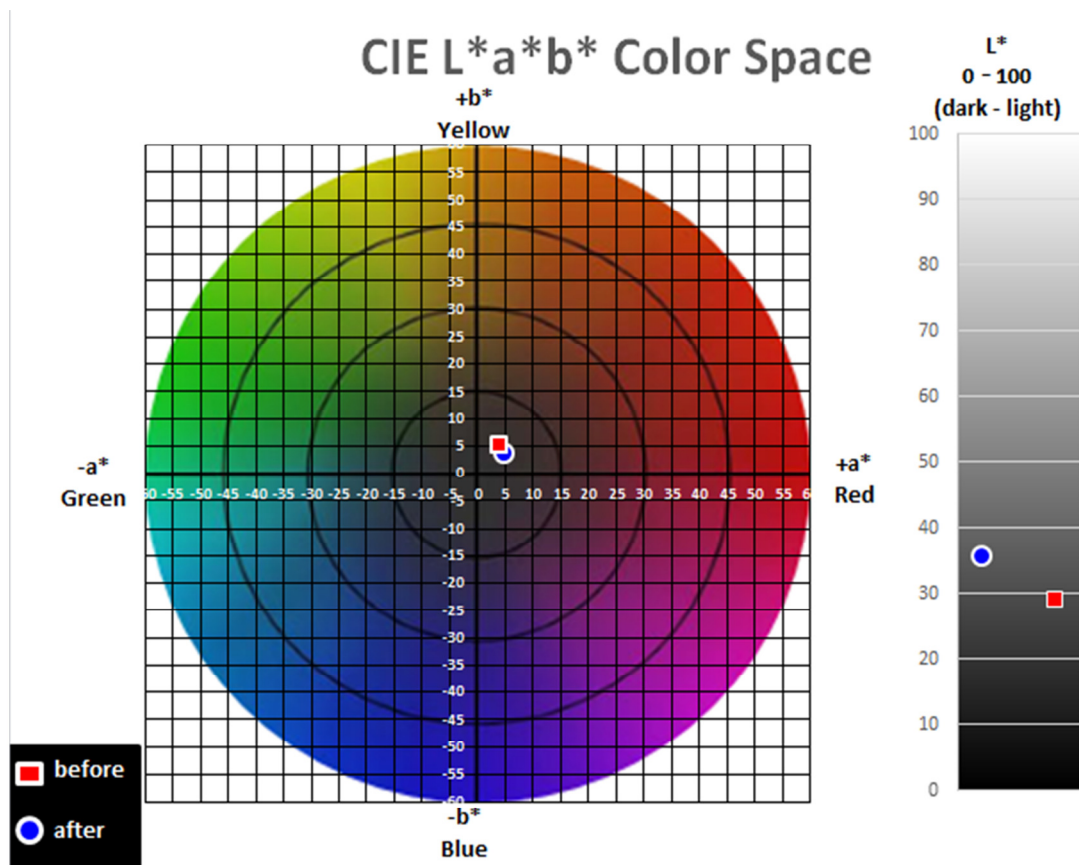
รูปที่ 4.44 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุ่นทึบ จาก แหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda03



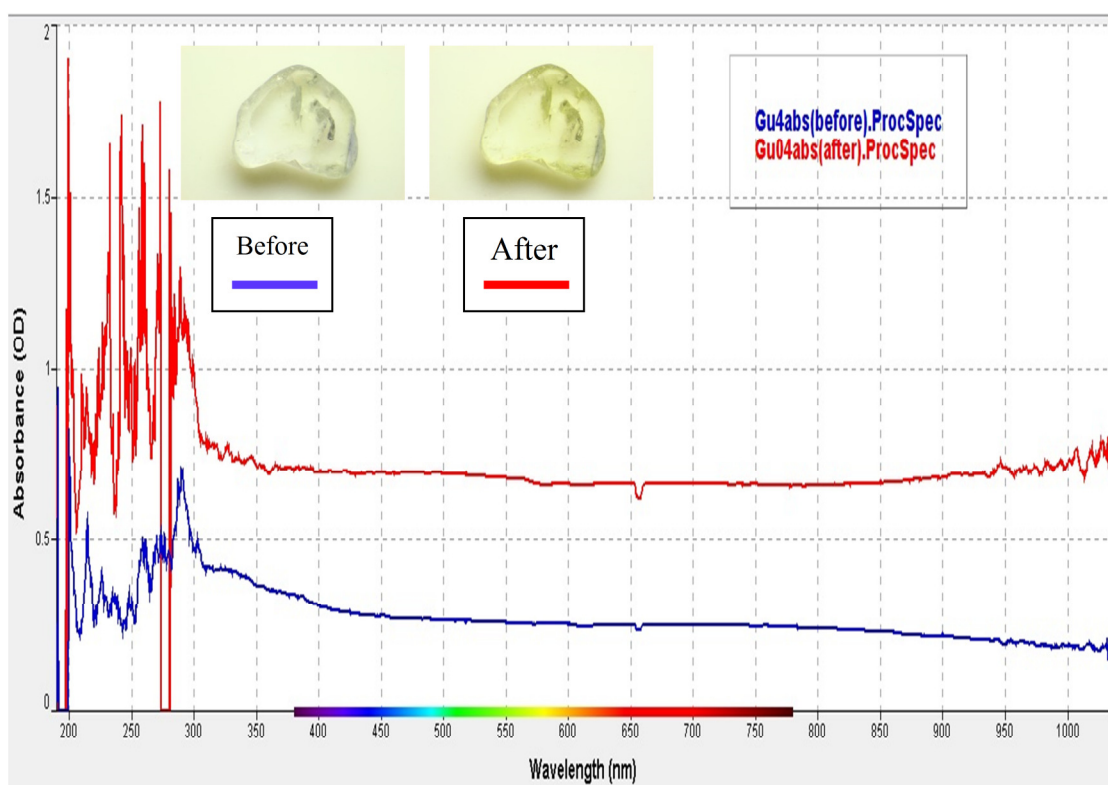
รูปที่ 4.45 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุนทิบ จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda023



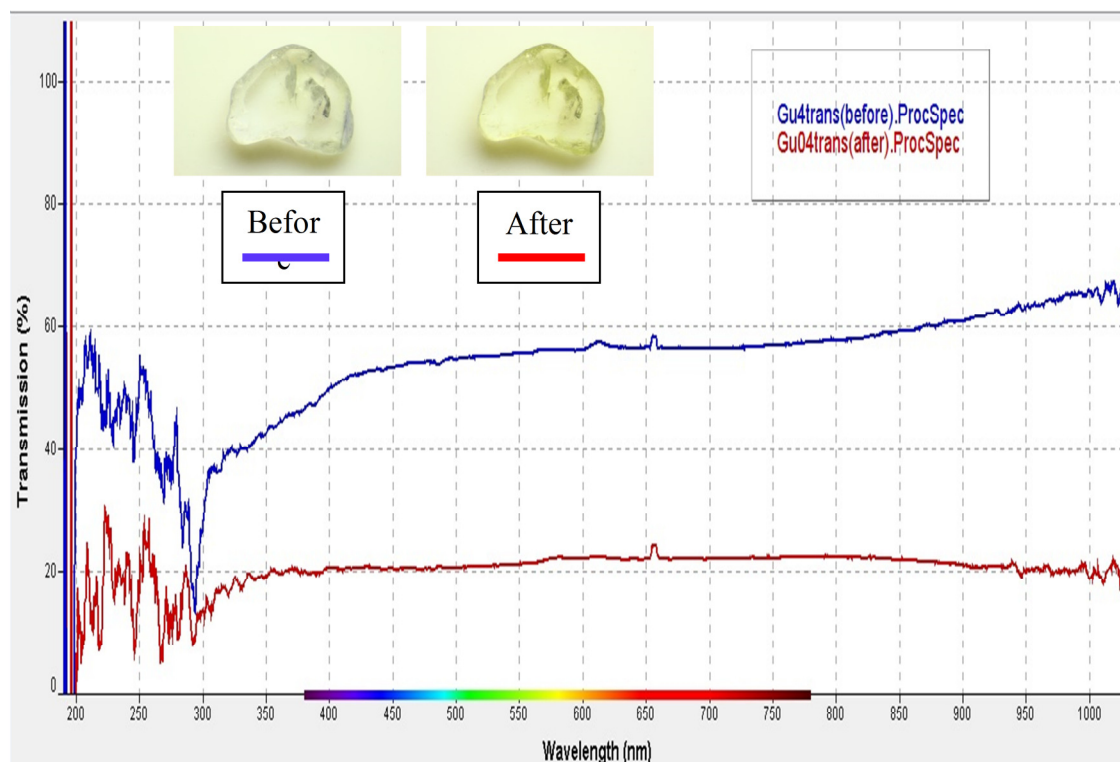
รูปที่ 4.46 พลอยตัวอย่าง Gueda03 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อขุนทิบ จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อน



รูปที่ 4.47 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda03 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อขุนทึบ



รูปที่ 4.48 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda04



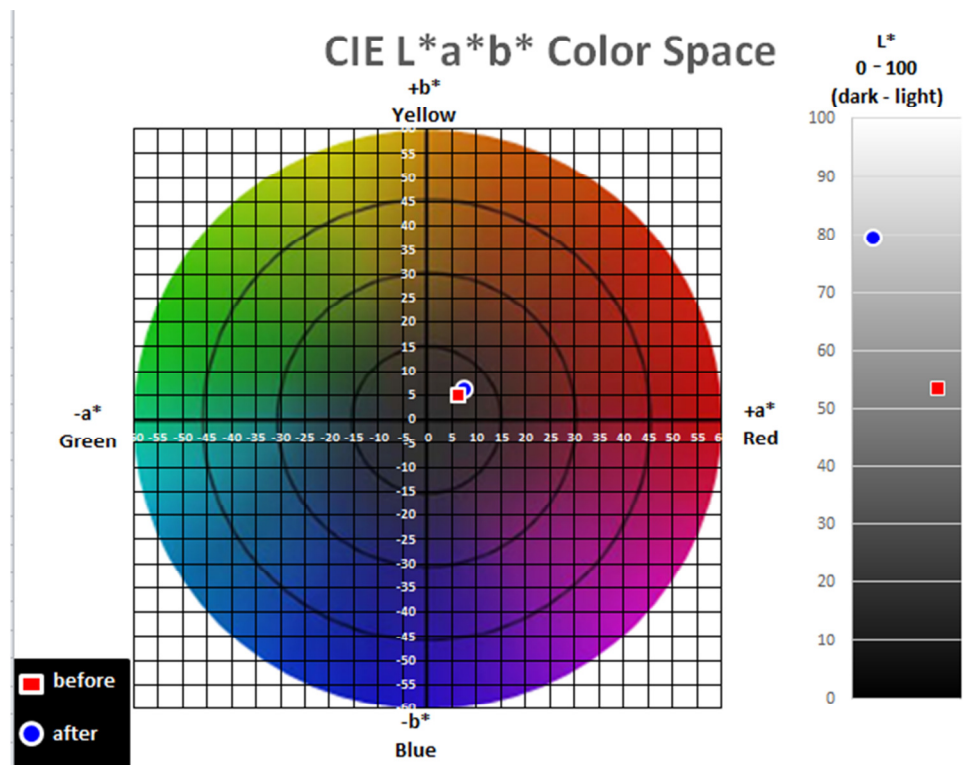
รูปที่ 4.49 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda04



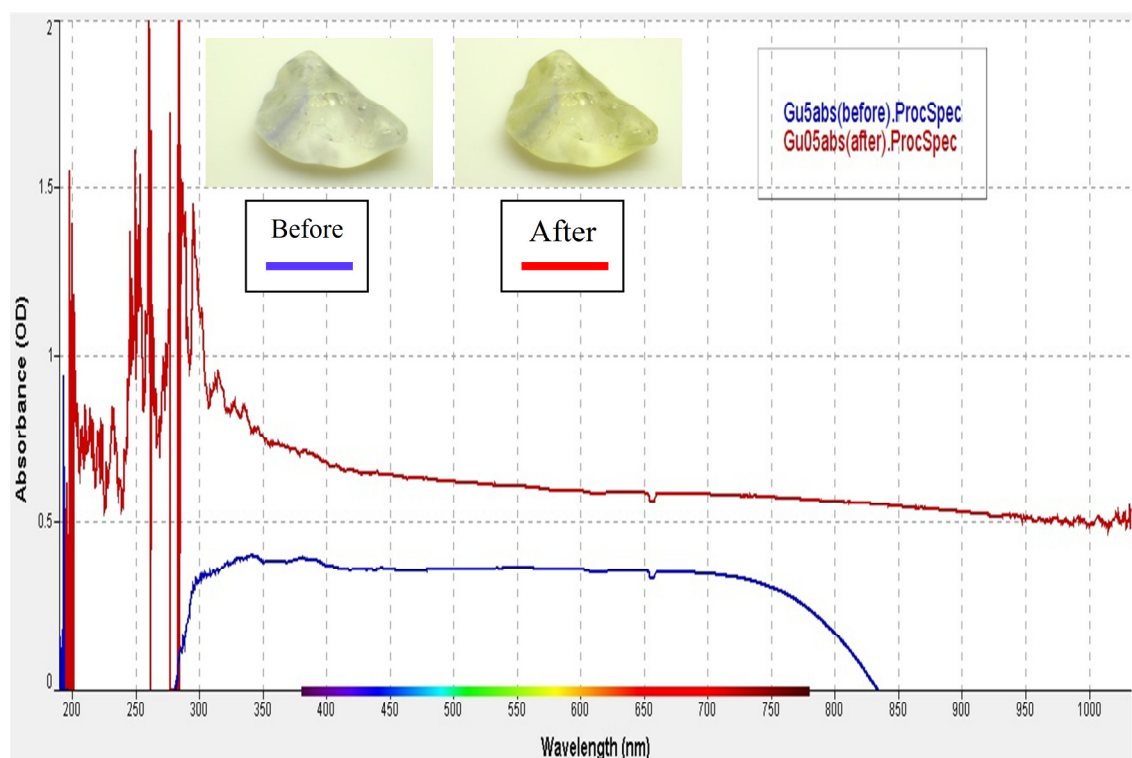
รูปที่ 4.50 พลอยตัวอย่าง Gueda04 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อน

ผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อนพลอยตัวอย่าง Gueda04 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส พบว่า พลอยให้สีเหลืองขึ้นเล็กน้อย และแสงทะลุผ่านมากขึ้นทำให้ พลอยใสสว่างมากขึ้น จากค่าก่อน

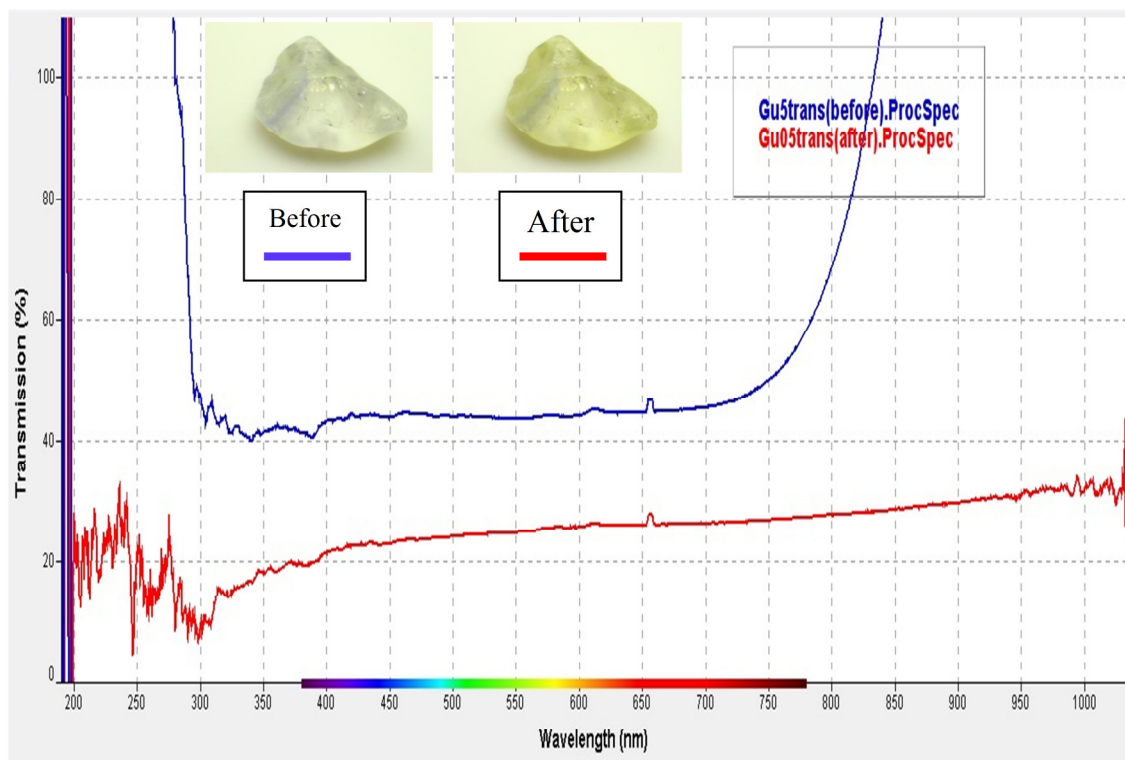
ทดลอง $L^* = 53.4$ หลังทดลองเป็น $L^* = 79.5$ และสีเหลือง ค่าก่อนทดลอง $b^* = 6.2$ หลังทดลองเป็น $b^* = 4.5$ ดังรูปที่ 4.48-4.51



รูปที่ 4.51 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda04 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส



รูปที่ 4.52 การวัดผลการดูดกลืน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda05



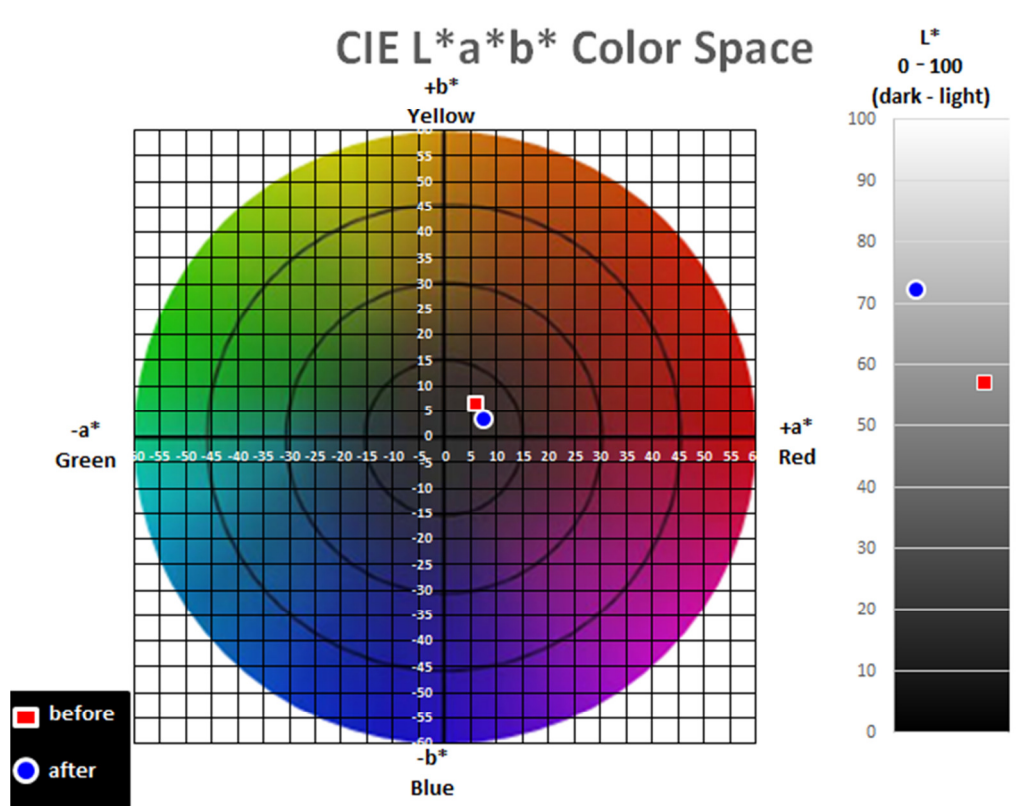
รูปที่ 4.53 การวัดผลการทะลุผ่าน UV-VIS-NIR Spectroscopy ของตัวอย่างพลอยแซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ตัวอย่าง Gueda05



รูปที่ 4.54 พลอยตัวอย่าง Gueda05 แซฟไฟร์ไม่มีสี เนื้อใส จากแหล่งศรีลังกา ก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไนโตรเจนไอออนออบอ่อนพลอยตัวอย่าง Gueda05 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส พบว่าพลอยให้สีเหลืองขึ้น และการทะลุผ่านมากขึ้น ทำให้พลอยสว่างมากขึ้น จากค่าก่อน

ทดลอง $L^* = 57$ หลังทดลองเป็น $L^* = 72.3$ และสีเหลือง ค่าก่อนทดลอง $b^* = 3.5$ หลังทดลองเป็น $b^* = 6.1$ ดังรูปที่ 4.52-4.55



รูปที่ 4.55 ผลการทดลองผลการวัดสี พลอยตัวอย่าง Gueda05 แหล่งศรีลังกา ไม่มีสี เนื้อใส

ผลการทดลองศึกษาผลของการใช้เทคนิคไอออนอิมпланเตชันอ่อน พบว่ามีต่อคุณภาพผิวของพลอยแซปไฟร์สีขาว พบว่าพลอยโปร่งแสงมากขึ้นมีค่า L^* ซึ่งมีผลต่อความแวววาวของพลอย ดังนั้นจึงใช้เงื่อนไขการทดลองปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยไอออนอิมпланเตชันอ่อนกับพลอยที่มีขนาด 3-5 มิลลิเมตร เพื่อให้ได้พลอยแซปไฟร์สีขาวเหมาะสมนำไปเป็นเครื่องประดับ ตามจุดประสงค์ของโครงการ ที่ต้องการผลิตพลอยเพื่อทดแทนการใช้งานเพชร จึงต้องมีการขึ้นรูปเพื่อแสดงผลความพึงพอใจของผู้ประกอบการหลังการปรับปรุงคุณภาพพลอย ก่อนขั้นตอนการสรุปและเผยแพร่งานวิจัย

4.8 ขั้นตอนการทำตัวเรือนเครื่องประดับ

ขั้นตอนแรกจะเป็นการออกแบบสัดส่วนหลักและขนาดตามความเหมาะสม โครงการนี้เลือกออกแบบเป็นนกอินทรียัชนะเกาะบนไม้กางเขนเตรียมบิน เพราะมีลักษณะ สง่างาม มั่งคั่ง สามารถฝังพลอยทั้งสี่น้ำเงินแถมเขียวจากโครงการย่อยที่ 1 และพลอยสีสีขาวจากโครงการย่อยที่ 2 พลอยที่ใช้จะใช้พลอยแซปไฟร์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเทคนิคไอออนอิมпланเตชันทั้งหมด เจียรไนแล้วทุกเม็ด



รูปที่ 4.56 รูปแบบร่างนกอินทรีด้วยโปรแกรม Jew Cad

4.8.1 การออกแบบเบื้องต้นโดยใช้โปรแกรม Jew Cad

กำหนด ให้มีช่องฝังพลอยตามขนาดที่กำหนด ข้อดีคือให้ความแม่นยำสูงกับชิ้นงานที่มีรายละเอียดมาก และรูปที่ 4.57 แสดงรูปแบบจำลองใกล้เคียงกับรูปแบบเมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว



รูปที่ 4.57 แสดงรูปแบบจำลองใกล้เคียงกับรูปแบบเมื่อขึ้นรูปเสร็จแล้ว

4.8.2 การขึ้นรูปแว็กซ์โดยใช้เครื่อง Computer Numerical Control (CNC)

แยกแบบขึ้นรูปแว็กซ์เป็นส่วนๆ บางส่วนสำหรับการทดลองหล่อพร้อมฝัง



รูปที่ 4.58 รูปแว็กซ์เป็นส่วนๆ บางส่วนสำหรับการทดลองหล่อพร้อมฝัง

4.8.3 การขึ้นรูปเครื่องประดับโดยการหล่อด้วยโลหะทองเหลือง



รูปที่ 4.59 แบบทดลองหลังหล่อด้วยโลหะทองเหลือง



รูปที่ 4.60 ขึ้นส่วนโลหะทองเหลืองเมื่อมาประกอบเป็นตัวเรือน



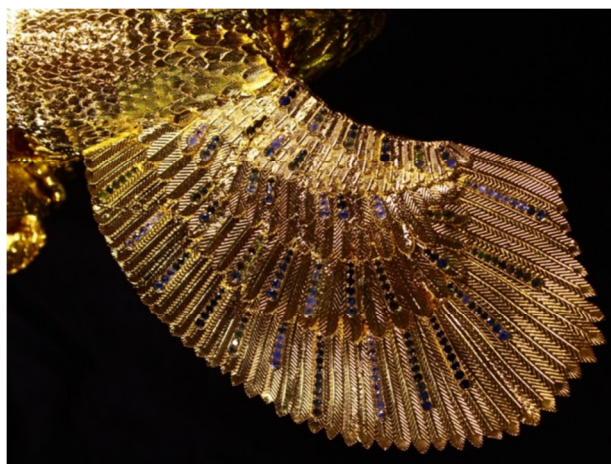
รูปที่ 4.61 รูปร่างเมื่อเป็นตัวเรือน

4.8.4 นำตัวเรือนโลหะทองเหลืองไปชุบทอง

นำตัวเรือนโลหะฝังพลอยที่ได้จากการทดลอง เสร็จแล้วไปทำการชุบทอง



รูปที่ 4.62 รูปร่างหลังชุบเป็นตัวเรือน



รูปที่ 4.63 พลอยที่อยู่ในตัวเรือนไม่มีการเปลี่ยนแปลงยังคงมีประกายและให้สีคงเดิม

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 อภิปรายและวิจารณ์ผล

พลอยแซฟไฟร์ในธรรมชาติมักจะไม่มียสี การเกิดสีต่างๆ ที่มองเห็นมาจากธาตุที่ให้สีเจือปนอยู่ในโครงสร้างของพลอยซึ่งจะมีปริมาณน้อย เช่น การเห็นเป็นสีน้ำเงิน เนื่องจากมีไอออนของธาตุเหล็ก (Fe^{2+}) และ ไทเทเนียม (Ti^{4+}) หรือสีเขียวจากเหล็ก (Fe^{3+}) และ ธาตุแกเลียม (Ga^{3+}) การทดลองของโครงการนี้จะใช้เทคนิค PIXE และ EDXRF เพื่อตรวจสอบ ชนิดของธาตุ พร้อมกับปริมาณธาตุต่างๆ เพื่อออกแบบการทดลองให้พลังงานโดยตรงและเหมาะสมด้วยเทคนิคการฝังไนโตรเจนไอออน (Nitrogen Ionimplantation) ด้วยเครื่อง Compact Ion Implanter ให้พลังงานที่เหมาะสมกับพลอยให้เกิดการออกซิเดชันและรีดักชัน พร้อมการอบอ่อน ปรับเปลี่ยนสภาวะที่เหมาะสมของธาตุให้สมบัติที่ดี เช่น ความใสสะอาด สี ความแวววาว ในพลอยทำให้ได้พลอยตรงตามตลาดพลอยต้องการได้

5.1.1 กรณีการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ตัวอย่างที่มีสีซีดจางมาก (near colorless) แต่ยังพอเห็นเป็นสีบ้าง เช่น พลอยตัวอย่างที่มีอ่อน อมฟ้า อมเหลืองและอมเขียว ผลการปรับปรุงคุณภาพให้พลอยพบว่าเนื้อพลอยใสสะอาดมากขึ้น และมีสีที่เข้ม ซึ่งอาจเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันของธาตุให้สีในพลอยตัวอย่างเมื่อได้รับพลังงานจากไนโตรเจนไอออน เช่นผลของเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุให้สีหลักในพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน หลังจากได้รับพลังงานจากการชนของลำไนโตรเจนไอออนทำให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชัน เรียกว่าการย้ายอิเล็กตรอนในระหว่างธาตุทรานสิชัน (Intervalence charge transfer) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ส่งผลโดยตรงกับการดูดกลืนแสง และการมองเห็นสีน้ำเงินที่มากขึ้นในพลอยสีอ่อน อมฟ้า อมเขียว เป็นพลอยสีฟ้าเข้มขึ้น สอดคล้องกับผลการตรวจวัดค่าการดูดกลืนพลังงานแสงของธาตุให้สีได้โดยเครื่อง UV-Vis-NIR spectroscopy ในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดย Fe^{3+} จะแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงคลื่น 450 นาโนเมตร ทำให้เรามองเห็นสีพลอยเป็นสีเหลือง Fe^{2+} แลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนให้กับ Ti^{4+} จะแสดงค่าการดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ทำให้เรามองเห็นสีพลอยเป็นสีน้ำเงินขึ้น ในประเภทกลุ่มที่มีหย่อมสีเหลืองของทุกแหล่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร ที่ทำให้เห็นสีเหลืองมากขึ้นเมื่อรวมกับสีเดิมจึงมีผลให้สีเข้มขึ้น

5.1.2 กรณีการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ตัวอย่างที่ไม่มีสี (colorless) การทะลุผ่านของแสงเป็นแบบกึ่งโปร่งแสง และโปร่งแสง พบว่าหลังจากการทดลองใช้ไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชัน เป็นจำนวน 4-10 ครั้ง ต่อพลังงาน 50 keV ใช้เวลา 5 ชั่วโมงต่อครั้ง จะทำให้พลอยเปลี่ยนโปร่งแสงมากขึ้น

5.2 การปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันบ่ออ่อน

ที่อุณหภูมิ 150°C กับแซปไฟร์สีอ่อนถึงโปร่งแสงด้วยกระบวนการไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันที่กระแส 50 keV เป็นเวลา 5 ชั่วโมงต่อครั้ง ที่อุณหภูมิ 150°C จำนวน 4 ครั้ง เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงความโปร่งใสที่เพิ่มขึ้น มีโทนสีที่ลดลงและหยาบ สีมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งความโปร่งใสที่เพิ่มขึ้นมาจากการที่อะตอมของไนโตรเจนพุ่งเข้าชนกับอะตอมของกลุ่มพลอยตัวอย่างซึ่งเมื่ออะตอมเกิดการชนกันจะทำให้เกิดแรงโมเมนต์ตัม เกิดการชนกันต่อไปเรื่อยๆ ภายในอะตอมของกลุ่มพลอยตัวอย่างจนกว่าพลังงานนั้นจะสิ้นสุดลง การชนกันนั้นทำให้เกิด Defect ภายในกลุ่มพลอยตัวอย่างส่งผลให้ Nano inclusions ที่อยู่ภายในสลายออกไปทำให้กลุ่มพลอยตัวอย่างมีความโปร่งใสมากขึ้น

กรณีการนำพลอยที่มี มลทิน แบบต่างๆ นำไปหล่อขึ้นรูปแบบหล่อพร้อมฝัง จากการศึกษาตัวอย่างพลอย จากแหล่ง อำเภอด่านซ้าย จังหวัดแพร่ จำนวน 30 ตัวอย่าง ศึกษามลทินภายในด้วยกล้องไมโครสโคป พบมลทินลายนิ้วมือ (fingerprint) รอยแตกคล้ายขนนก (feather) มลทินของเหลว (liquid) รอยแตก (fracture) และคราบสนิมเหล็ก (Fe-oxide) ด้วยการทดลองปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปหล่อพร้อมฝัง ได้แก่

กลุ่มที่ 1 การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

กลุ่มที่ 2 การปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีการไอออนอิมพลานเตชัน

กลุ่มที่ 3 ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ

พบว่าพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยไอออนจะเกิดความเสียหายจากการหล่อพร้อมฝังน้อยที่สุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

การปรับปรุงคุณภาพพลอยสิ่งที่เป็นปัจจัยหลักคือ ธาตุให้สี และชนิดของมลทิน โดยเฉพาะเมื่อต้องการสลายมลทินที่มีผลต่อความขุ่นมัวของพลอย การวิเคราะห์ชนิดของมลทินที่ถูกต้องแม่นยำจะทำให้ผลของการทดลองเป็นไปตามที่กำหนด ซึ่งปัญหาหลักคือต้องใช้เครื่องมือขั้นสูงเช่น Raman spectroscopy หรือกล้องขยายกำลังสูงและการทำลายพลอยซึ่งมีผลต่อการจำนวนตัวอย่างพลอยที่ใช้ อีกทั้งพลังงานที่ใช้ในการยิงพลอยต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในมลทินแร่บางชนิด ซึ่งต้องใช้เครื่องมือของต่างประเทศ หากสามารถพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจะสามารถปรับปรุงคุณภาพในพลอยที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ละ 2-3 กระรัต เป็น ขนาดเม็ด 5-10 กระรัต และใช้เวลาที่สั้นลงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] G.W. Arnold, G.B. Kreft, C.B. Norris, Appl. Phys. Lett. 25 (1974) 540.
- [2] C.J. McHargue, P.S. Sklad, J.C. McCallum, C.W. White, A. Perez, E. Abonneau, G. Marest, Nucl. Instr. Methods B46 (1990) 74.
- [3] K. Sickafus, N. Yu, R. Devanathan, M. Nastasi, Nucl. Instr. Methods B106 (1995) 573.
- [4] Y. Aoki, N.T. My, S. Yamamoto, H. Naramoto, Nucl. Instr. Methods B114 (1996) 276.
- [5] J.N. Mitchell, R. Devanathan, N. Yu, K.E. Sickafus, C.J. Wetteland, V. Gopalan, M.A. Nastasi, K.J. McClellan, Nucl. Instr. Methods B141 (1998) 461.
- [6] N.K. Huang, B. Tsuchiya, K. Neubeck, S. Yamamoto, K. Narumi, Y. Aoki, H. Abe, A. Miyashita, H. Ohno, H. Naramoto, Nucl. Instr. Methods B143 (1998) 479.
- [7] Y. Saito, H. Horie, S. Suganomata, Nucl. Instr. Methods B59/60 (1991) 1173.
- [8] S. Intarasiri, D. Bootkul, L.D. Yu, T. Kamwanna, S. Singkarat, T. Vilaithong, Surface and Coating Technology 203 (17–18) (2009) 2788.
- [9] Richard W. Hughes, Ruby & Sapphire, White Lotus, Bangkok, 1991, p. 136.
- [10] P.D. Townsend, P.J. Chandler, and L. Zhang, Optical Effects of Ion Implantation, Cambridge University Press, London.

ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ในงานแถลงผลงานรัฐบาลครบรอบ ๑ ปี

วันที่ ๒๓-๒๕ ธันวาคม ๒๕๕๘ ณ ตึกสันติไมตรี ทำเนียบรัฐบาล

ที่ วช ๐๐๐๔/๓๕๕๒



กองบริหารแผนและงบประมาณการวิจัย
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
๑๙๖ ถ.พหลโยธิน จตุจักร กทม.๑๐๙๐๐

๑๕ ธันวาคม ๒๕๕๘

เรื่อง เชิญเข้าร่วมจัดนิทรรศการในงานแสดงผลงานรัฐบาลในรอบ ๑ ปี

เรียน ดร. ดวงแข บุตรกุล

สิ่งที่ส่งมาด้วย (ร่าง) กำหนดการจัดนิทรรศการงานแสดงผลงานรัฐบาลในรอบ ๑ ปี จำนวน ๑ ฉบับ

ด้วย รัฐบาลกำหนดจัดงานแสดงผลงานรัฐบาลในรอบ ๑ ปี ในวันที่ ๒๓-๒๕ ธันวาคม ๒๕๕๘ ณ ตึกสันติไมตรี (หลังนอก) ทำเนียบรัฐบาล ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) เห็นว่าโครงการวิจัย เรื่อง “การพัฒนาคุณภาพอัญมณี โดยเทคโนโลยีเครื่องเร่งลำอนุภาค” ของท่านเป็นโครงการที่มีผลผลิต ผลลัพธ์ของโครงการที่เป็นประโยชน์ต่อประชาชนในวงกว้าง

ในการนี้ วช. ขอเชิญท่านนำผลงานวิจัยเข้าร่วมจัดนิทรรศการในงานแสดงผลงานรัฐบาล และใคร่ขอความอนุเคราะห์ท่านเชิญเกษตรกร ผู้ประกอบการ หรือผู้ที่ใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัยของท่านเข้าร่วมงานแสดงผลงานรัฐบาลในวัน และสถานที่ดังกล่าว โดยขอให้ท่านหรือผู้แทนนำเสนอผลงาน ณ จุดแสดง นิทรรศการตลอดระยะเวลาการจัดงาน ทั้งนี้ท่านสามารถนำผลงานเข้าจัดนิทรรศการได้ในวันที่ ๒๒ ธันวาคม ๒๕๕๘

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาดำเนินการ และขอขอบคุณในความร่วมมือมา ณ โอกาสนี้

ขอแสดงความนับถือ

(นางนิตยา พุทธิโกษา)

ผู้อำนวยการกองบริหารแผนและงบประมาณการวิจัย

ฝ่ายบริหารแผนงานและโครงการพิเศษและเร่งด่วน

โทร. ๐ ๒๕๖๑ ๒๔๔๕ ต่อ ๔๘๙, ๐ ๒๕๗๙ ๒๒๘๔ (ปริศนา/อุไร)

โทรสาร ๐ ๒๕๗๙ ๐๕๖๖

E-mail: technonano.nrct@gmail.com

ได้รับเชิญให้นำผลงานวิจัยเข้าร่วมในงานแสดงผลงานรัฐบาลครบรอบ ๑ ปี

วันที่ ๒๓-๒๕ ธันวาคม ๒๕๕๘ ณ ตึกสันติไมตรี ทำเนียบรัฐบาล



รองนายกรัฐมนตรี พลอากาศเอก ดร.ประจิน จั่นตอง เข้าชมงานและให้กำลังใจทีมคณะนักวิจัย

วันที่ ๒๓ ธันวาคม ๒๕๕๘



รองนายกรัฐมนตรี พลอากาศเอก ดร.ประจิน จั่นตอง เข้าชมงาน โครงการพัฒนาคุณภาพภูมิณี

โดยเทคโนโลยีเครื่องเร่งลำอนุภาค ในวันที่ ๒๓ ธันวาคม ๒๕๕๘



รัฐมนตรีประจำสำนักรัฐมนตรี นายสุพันธ์ ตันยวรรธนะ เข้าชมงาน โครงการพัฒนาคุณภาพภูมิณี

โดยเทคโนโลยีเครื่องเร่งลำอนุภาค ใน วันที่ ๒๓ ธันวาคม ๒๕๕๘



ให้สัมภาษณ์นักข่าวร่วมกับผู้ประกอบการพลอยและการปรับปรุงคุณภาพพลอย

กลุ่มอุตสาหกรรมเขตเศรษฐกิจพิเศษ อำเภอมะสออด จังหวัดตาก



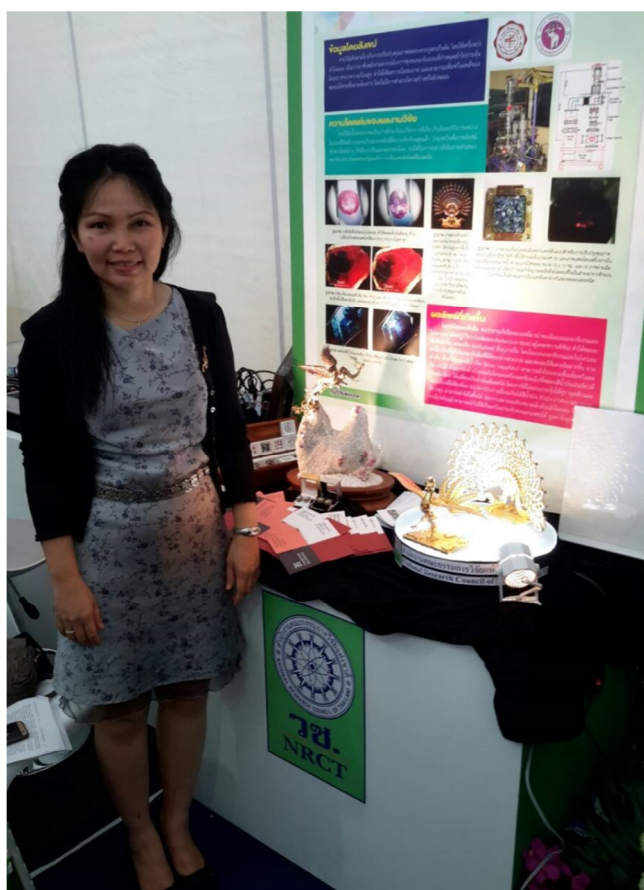
รัฐมนตรีประจำสำนักรัฐมนตรี หม่อมหลวงปนัดดา ดิศกุล เข้าชมงาน โครงการพัฒนาคุณภาพภูมิณี

โดยเทคโนโลยีเครื่องเร่งลำอนุภาค ในวันที่ ๒๔ ธันวาคม ๒๕๕๘



นายกรัฐมนตรี พลเอกประยุทธ์ จันทร์โอชา เข้าชมงาน โครงการ พัฒนาคุณภาพภูมิณี

โดยเทคโนโลยีเครื่องเร่งลำอนุภาค ใน วันที่ ๒๕ ธันวาคม ๒๕๕๘



อธิการบดีมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ รศ. ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล

เข้าชมงานและให้กำลังใจทีมคณະนักวิจัย มศว. ใน วันที่ ๒๕ ธันวาคม ๒๕๕๘



วงการอัญมณี เฮ! เมื่อ นักวิจัย มศว ทำสิ่งนี้

ดร.ดวงแข บุตรกุล และคณะนักวิจัยของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (มศว) เพิ่มมูลค่าอัญมณี ด้วยเทคโนโลยีเครื่องไอออน แห้งแรกของโลก

PR
SWU

ศูนย์สารสนเทศและการประชาสัมพันธ์



PRSWU



PRSWU



PR_SWU



@PRSWU

ได้รับความสนใจ มีการนำเสนอข่าวงานวิจัย โดยสื่อมวลชนหลายรูปแบบ เฟสบุ๊ค สื่อสิ่งพิมพ์ วารสาร ต่างๆ

เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้
และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาปริมาณและชนิดของมลพิษในพลอยแซปไฟร์สีขาว ที่มีผลต่อสมบัติการดูดกลืนแสง (absorption) ของพลอยชนิดนี้
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติเชิงแสง ความโปร่งใส และลดมลพิษ ของพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่น ด้วยเทคนิคลำไอออน
- 3) เพื่อศึกษาวิธีการทำความสะอาดผิวและปรับปรุงคุณภาพผิวพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่น ด้วยเทคนิคการอบอ่อนและพลาสมา
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการนำพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่นที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคลำไอออน รวมทั้งทดสอบความเสถียรของพลอย เมื่อนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ

กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ แสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

กิจกรรม	ผลที่ได้รับ
1. ตรวจสอบพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาวเบื้องต้นด้วยเทคนิคต่างๆเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างชนิดและปริมาณธาตุเจือ และปริมาณมลทินที่มีต่อสมบัติทางแสงของพลอย	ได้ฐานข้อมูลสมบัติต่างๆของพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว ทั้งประเภทไร้สี (colorless) และ สีจางมาก (near colorless) นำไปสู่การหาวิธีปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มมูลค่า
2. ศึกษาลักษณะภายนอกที่สังเกตได้ของพลอยสีขาวจาก 5 แหล่ง แหล่งดีโอโกประเทศมาดากัสการ์ ประเทศเวียดนาม ประเทศศรีลังกา แหล่งมาบิลารประเทศไนจีเรีย และ แหล่งอำเภอด่นชัย จังหวัดแพร่ เพื่อจัดกลุ่มพลอยสามารถแบ่งพลอยออกเป็นกลุ่มๆ ตามคุณภาพเบื้องต้น ที่สามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพได้	ได้พลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว ที่เหมาะสมจะนำมาปรับปรุงคุณภาพด้วยเทคนิคลำไอออน
3. ข้อมูลการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์สีขาวด้วยเทคนิคลำไอออนเพื่อกำหนดขั้นตอนที่เหมาะสมในการนำเทคนิคลำไอออนมาประยุกต์ใช้กับพลอยแซปไฟร์สีขาว	ได้ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซปไฟร์สีขาวด้วยเทคนิคลำไอออน
4. ตรวจสอบและวิเคราะห์พลอยแซปไฟร์สีขาวหลังการปรับปรุงคุณภาพเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและมูลค่าเพิ่มของพลอย	ได้ข้อมูลสำหรับผู้ประกอบการ ให้สามารถนำไปต่อยอดเชิงธุรกิจได้
5. ทดลองขึ้นรูปพลอยแซปไฟร์สีขาว ให้เป็นเครื่องประดับ เริ่มต้นการคิดแบบแสดงตามกลุ่มพลอยแหล่งต่างๆ ลักษณะของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และความเหมาะสมกับคุณภาพ และจำนวนตัวอย่างพลอยที่ใช้ฝัง	ได้ข้อมูลของพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีขาว ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน และการนำไปขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ
6. ขั้นตอนการสรุปและเผยแพร่งานวิจัย	ได้ผลการประเมิน ประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ของงานวิจัย