



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนงาน การประยุกต์เครื่องเร่งลำอนุภาค
สำหรับเพิ่มมูลค่าพลอยธรรมชาติ

Applications of Particle Beam Accelerators
for Value Adding of Natural Gemstones

โดย รศ. ดร. อีรวรรณ บุญญวรรณ และคณะ

ธันวาคม 2558

สัญญาเลขที่ RDG5750132

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

แผนงาน การประยุกต์เครื่องเร่งลำอนุภาค
สำหรับเพิ่มมูลค่าพลอยธรรมชาติ

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ธีรพรรณ บุญญวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
3. อุดมรัตน์ ทิพวรรณ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
4. ดวงแข บุตรกุล	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
5. เสวต อินทศิริ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. ภูวดล วรรณชะชัยแสง	มหาวิทยาลัยบูรพา
7. บงกช พิชัยกำจรวุฒิ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ชุดโครงการ การพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย วช.-สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัย ขอขอบคุณ นายช่างเทคนิคและวิศวกรวิจัย ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วย นายระเบียบ สุวรรณโกสุม และ นายวิชฌ บัญสุช สำหรับการดูแลรักษา และปรับปรุงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ นายโถม ทองเหลือง สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็ม นายชาญชัย อุโมงโน สำหรับการดูแลรักษาและปรับปรุงเครื่องพลาสมา ขอขอบคุณ นายรัฐพล อ่ำพล นายชัยพัฒน์ แผงเกษร และ นางสาวธัญพร เต็งชัยศรี สำหรับการช่วยบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลพลอยคอร์ันดัม ขอขอบคุณ นักศึกษาชั้นปีที่ 4 จากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และจากภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป สาขาอัญมณีและเครื่องประดับ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เข้าร่วมในบางส่วนของงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ คณะผู้วิจัย ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับงบประมาณในการดำเนินงานโครงการ

คณะผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2558

แบบสรุปผู้บริหาร

[Executive Summary]

1. รายละเอียดเกี่ยวกับแผนงาน

- 1.1 ชื่อเรื่อง การประยุกต์เครื่องเร่งลำอนุภาคสำหรับเพิ่มมูลค่าพลอยธรรมชาติ
- 1.2 รายชื่อคณะผู้วิจัย
- | | | |
|---------------|---------------------------------|----------------------------|
| หัวหน้าแผนงาน | รศ. ดร. อธิวัฒน์ บุญญวรรณ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| ผู้ร่วมแผนงาน | รศ. ดร. ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| | ผศ. ดร. อุดมรัตน์ ทิพวรรณ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| | อ. ดร. ดวงแข บุตรภู | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| | ดร. เสวต อินทศิริ | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| | อ. ดร. ภาวดี วรธนะชัยแสง | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| | อ. ดร. บงกช พิชัยกำจรวุฒิ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |

หน่วยงานที่เสนอแผนงาน

ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค
ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถ. ห้วยแก้ว ต. สุเทพ อ. เมือง จ. เชียงใหม่ 50202
โทรศัพท์ 053-943379 โทรสาร 053-222776

ผู้ประกอบการร่วมวิจัย

บริษัท แซปไฟร์วัลเลย์ (ประเทศไทย) จำกัด
นายสุธี กุลเมธา เจ้าของกิจการขายส่งอัญมณี

1.3 งบประมาณและระยะเวลาทำโครงการ

ได้รับงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 รวมงบประมาณทั้งสิ้น 4,150,080.- บาท
[งบประมาณที่ได้รับจาก สกว. 3,490,080.- บาท และงบประมาณจากผู้ร่วมให้ทุน 660,000.- บาท]
ระยะเวลาทำวิจัย ตั้งแต่ กันยายน 2557 ถึง ตุลาคม 2558

2. สรุปแผนงาน

2.1 ที่มาและความสำคัญของแผนงานวิจัย

พลอยตระกูลคอรัันดัม (corundum) จัดเป็นอัญมณีสำคัญที่เป็นจุดแข็งของไทย สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้มากที่สุด แต่พลอยธรรมชาติที่มีความใสสะอาดและสีสดนั้นมีน้อยและหายาก ในขณะที่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบในประเทศเริ่มขาดแคลนและหายากขึ้น จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในปัจจุบันพลอยคอรัันดัมสีต่างๆที่ซื้อขายกันในตลาดส่วนใหญ่ มักผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนหรือที่เราเรียกกันว่า การเผา ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความใสสะอาด (clarity) ทำให้มูลค่าของพลอยดิบคุณภาพต่ำสูงขึ้น เทคนิคนี้ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปในตลาดพลอย อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่ว่าพลอยทุกเม็ดจะสามารถเผาให้สวยได้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแร่มลทิน

โครงสร้างผลึกของพลอย แหล่งกำเนิดที่มีแร่ลทินหลัก ปริมาณธาตุเจือที่มีในโครงสร้างผลึกพลอย ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการและเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือ เพื่อลดข้อจำกัดของการปรับปรุงคุณภาพแบบเดิม

โดยปกติคอร์รันดัมซึ่งมีสูตรเคมีเป็น Al_2O_3 ในระบบผลึกไตรโกนอล (Trigonal) เป็นแร่ที่มีสีใสไม่มีสี การเกิดสีของคอร์รันดัมจะมีลักษณะการเกิดแบบ “Allochomatic” ซึ่งเกิดจากธาตุร่องรอยที่เจืออยู่ในเนื้อพลอยในปริมาณเล็กน้อย โดยธาตุแต่ละชนิดที่เจือจะให้สีแตกต่างกัน และธาตุบางชนิดเมื่อมีเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ที่แตกต่างกันก็จะให้สีที่ต่างกัน ธาตุเจือเหล่านี้สามารถพบได้ในคอร์รันดัมหลายรูปแบบ เช่น อาจพบได้ในรูปแบบของการแทนที่ในโครงสร้างของคอร์รันดัม ซึ่งหากธาตุร่องรอยเหล่านั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับอลูมิเนียม (Al^{3+}) ก็จะสามารถเข้าแทนที่ในโครงสร้างได้ ซึ่งการเจือในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคอร์รันดัม ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุเจือที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดสีแดง และคู่ธาตุเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ในโครงสร้างของคอร์รันดัมซึ่งให้สีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังอาจพบธาตุเจือเหล่านี้ในรูปแบบของมลทิน ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ระดับนาโนเมตรซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจนถึงระดับมิลลิเมตรซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลกับความใสสะอาดของคอร์รันดัม ธาตุเจือเหล่านี้เป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดสีต่างๆในแร่คอร์รันดัม

การยิงฝังไอออน (ion implantation) เป็นการเร่งไอออนให้มีพลังงานสูง แล้วไปชนกับเป้าที่ติดตั้งภายในเครื่องเร่งลำไอออน (ion implanter) ไอออนที่มีพลังงานสูงนี้ เมื่อถูกฝังเข้าไปในวัสดุ จะถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุ ทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ตำแหน่งนั้นจึงเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมดังกล่าวอาจจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะค่อยๆสูญเสียพลังงาน และจะหยุดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แล้วอาจเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลเดิม กลายเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ อันตรกิริยาระหว่างไอออนและอะตอมของเป้าทำให้คุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์เดิมของเป้าเกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงนี้อยู่ในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ไม่สามารถย้อนกลับมาสภาพเดิมได้อีก

เครื่องเร่งลำไอออน หรือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออนที่ซึ่งไอออนของธาตุที่ต้องการได้ถูกสร้างขึ้น ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำปีม โดยทั่วไปถัดจากนี้มักจะมีส่วนกรองไอออน ที่ซึ่งลำปีมจะถูกคัดเลือกด้วยสนามแม่เหล็ก ให้เหลือเฉพาะไอออนชนิดที่ต้องการผ่านไปได้ หลังจากนั้นจึงถึงส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น และส่วนห้องเป้า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ในกรณีที่ลำปีมมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ที่ต้องการฝังไอออน จำเป็นต้องมีส่วนกวาดลำปีม ที่ซึ่งลำปีมถูกบังคับให้กระจายอย่างสม่ำเสมอไปบนเนื้อวัสดุ ท้ายที่สุด จะมีส่วนพาราเดย์คัพ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุ เมื่อได้ปริมาณที่ต้องการก็จะหยุดการทำงาน จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นต่อเวลา เรียกว่า “กระแสไอออน” และปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุจะเรียกว่า “โดส” ซึ่งก็คือ ผลคูณระหว่างกระแสไอออนกับเวลาต่อพื้นที่ของการฝังไอออน ไอออนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง จะกระจายเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุที่มีความลึกค่าต่างๆ ความลึกเฉลี่ยจะเรียกว่า “พิสัย” โดยที่ จะขึ้นกับชนิดและพลังงานของไอออน และองค์ประกอบเชิงเคมีของวัสดุเอง โดยทั่วไปแล้วไอออนที่มีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีพิสัยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร

เทคนิคการยิงฝังไอออนมีการใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมานานแล้ว โดยเป็นเทคนิคหลักในการได้ปสารกึ่งตัวนำ ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของ

ไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณเฉพาะที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้าง จึงกลมกลืนกับเนื้อวัสดุเดิมมาก นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย

2.2 สรุปผลการดำเนินงานในส่วนแผนงานวิจัย

เครื่องเร่งลำไอออนโดยทั่วไปมักสร้างไอออนได้ในปริมาณที่น้อย (ในหน่วยไมโครแอมแปร์) ดังนั้น การฝังไอออนจึงทำได้ในปริมาณโตสต่ำๆ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณน้อยๆเท่านั้น ในงานพลอยต้องการสร้างสภาวะออกซิเดชันหรือรีดักชันให้กับพลอย จึงต้องการไอออนในปริมาณมากกว่าปกติ โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดอินคลูชัน เช่น ของแข็งจากธาตุชนิดอื่นของเหลว หรือ ก๊าซ ในแผนงานวิจัยนี้ จึงได้มีการปรับปรุงเครื่องเร่งลำไอออนต้นแบบสำหรับงานพลอย ให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถยิงไอออนที่โตสสูงๆได้ โดยที่การบำรุงรักษาและการจัดวางชิ้นงานทำได้ง่าย โดยแบ่งการปรับปรุงเครื่องออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ก. การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)

- เพิ่มประสิทธิภาพของ filament ของ ion source ทำให้ลดเวลาการเปลี่ยน filament ลง
- เพิ่มประสิทธิภาพการทำสภาพสุญญากาศภายใน ion source
- ปรับปรุงการควบคุมก๊าซ (ที่ใช้สร้างพลาสมาเพื่อผลิตลำไอออน หรือ feed gas) ให้มีความแม่นยำและสามารถทำซ้ำได้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น
- ศึกษาความเกี่ยวพันของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลำไอออน
- เพิ่มประสิทธิภาพการดึงและการโฟกัสลำไอออนของ einzel lens

ข. การปรับปรุงห้องยิงพลอย

- เพิ่มขนาดของช่องทางขาเข้าของลำไอออน โดยการเพิ่มขนาดของ gate valve
- ปรับปรุงงานใส่พลอยให้จัดวางพลอยได้ง่าย พลอยถูกยิงด้วยไอออนอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น
- มี heater สำหรับอุ่นชิ้นงานขณะยิงไอออน
- มีถังใส่ไนโตรเจนเหลวสำหรับนำชิ้นงานไปเก็บหลังยิงไอออน ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาโครงสร้างผลึกของชิ้นงานให้คงสภาพ
- ปรับปรุงระบบวัดความเข้มของไอออนที่ชนงานใส่พลอยให้แม่นยำ และสะดวกกับการใช้งานมากขึ้น

ค. การปรับปรุงระบบป้อนไฟแรงสูง

- ปรับปรุง isolation transformer ให้สามารถทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 70 kV (จากปัจจุบันที่ทนได้ไม่เกิน 35 kV)

ผลการปรับปรุงเหล่านี้ ทำให้ได้เครื่องมือตลอดจนเทคนิคที่สามารถสร้างไอออน ที่ให้พลังงานที่ผลิตแล้ว ผ่านระบบการเร่งให้มีความเร็วสูง ที่มีปริมาณไอออนจำนวนมากพอที่จะวิ่งเข้าชนกับพลอย เพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงความสะอาดในเนื้อพลอย และการกำหนดสีของพลอยได้อย่างเหมาะสม ในขั้นตอนต่อไป คณะผู้วิจัยจะเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนได้เข้ามาทดลองใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เครื่องนี้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยของตน ซึ่งเมื่อผู้ประกอบการทั่วไปสามารถใช้เครื่องได้ง่ายขึ้นด้วย จะส่งผลให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมของตน

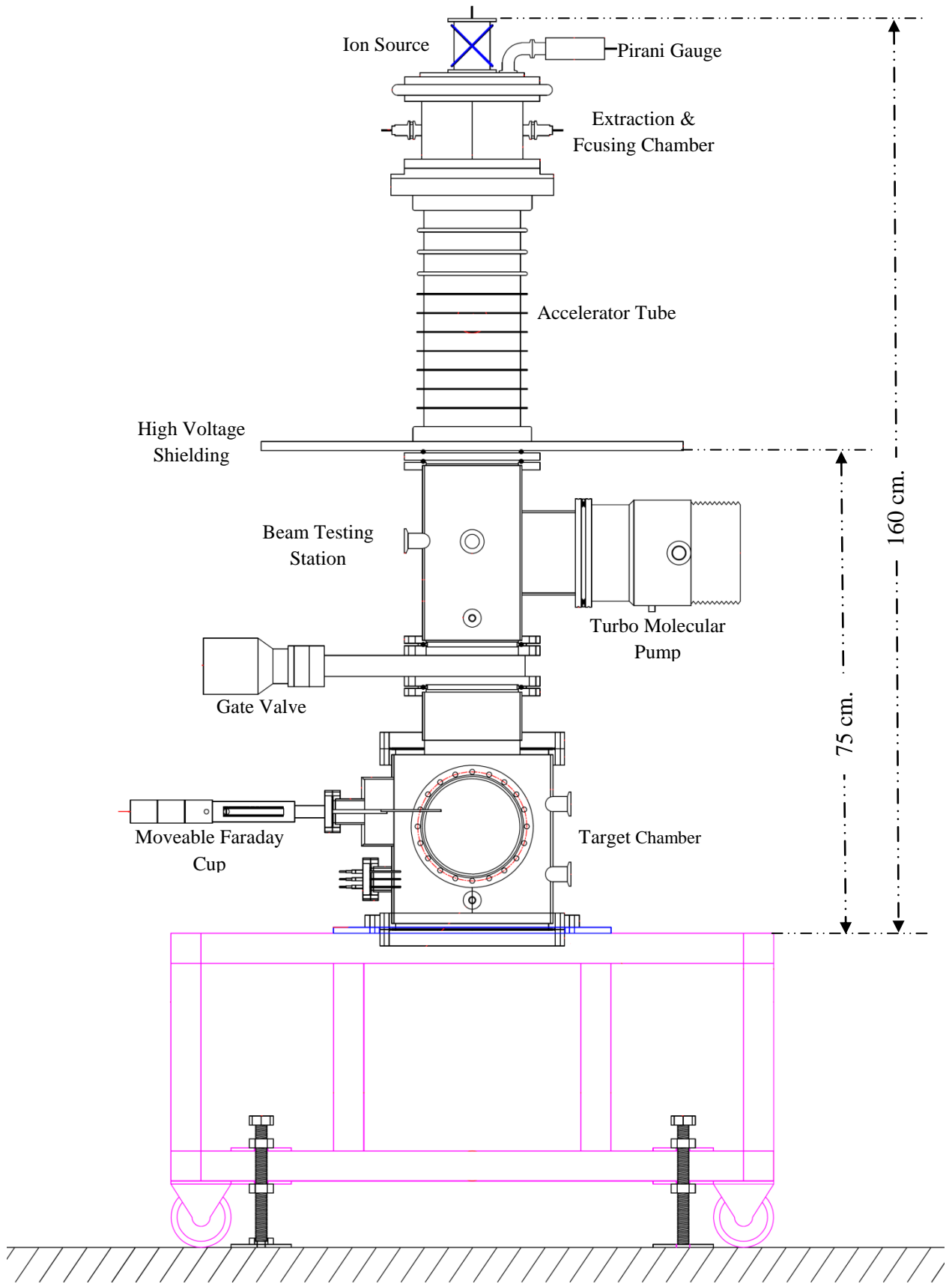
ในระหว่างการดำเนินการปรับปรุงเครื่องเร่งลำไอออนต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องเร่งลำไอออนสำหรับ SMES ในงบประมาณไม่เกิน 5 ล้านบาทขึ้น โดยประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออน ได้เลือกเป็นแบบ RF ซึ่งสามารถสร้างไอออนไนโตรเจนและออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับงานพลอย ในเรือนมิลลิแอมป์ได้ ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำปีมและโพกัสลำปีม เครื่องเร่งลำไอออนที่ออกแบบขึ้นนี้ไม่มีส่วนกรองไอออน เนื่องจากในความเป็นจริงสามารถหาก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่บริสุทธิ์สูงได้ไม่ยาก ส่วนที่สำคัญคือส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น โดยตั้งเป้าหมายไว้ที่ 100 กิโลโวลต์ และส่วนห้องเป้า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ซึ่งภายในห้องเป้าได้กำหนดให้มีฮีทเตอร์สำหรับอุ่นพลอยขณะยิงไอออนด้วย โดอะแกรมของแบบสร้างเครื่องเร่งลำไอออนสำหรับงาน SMEs แสดงดังในรูปที่ 1

อนึ่ง ในแผนงานวิจัยนี้ ยังได้ติดตั้งและปรับปรุงเครื่องมือวิจัยอื่นๆ เพื่อช่วยให้งานในแต่ละโครงการย่อยในแผนงานวิจัย ได้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การติดตั้งเครื่อง Optical spectrophotometer สำหรับวิเคราะห์การดูดกลืนแสงและสีของพลอย และการปรับปรุงเครื่องทำพลาสมาสำหรับงานพลอย ได้แก่ เครื่องขัดผิวพลอยด้วยพลาสมา และเครื่องพลาสมาอบอ่อน

2.3 สรุปผลการดำเนินงานโครงการย่อยที่ 1

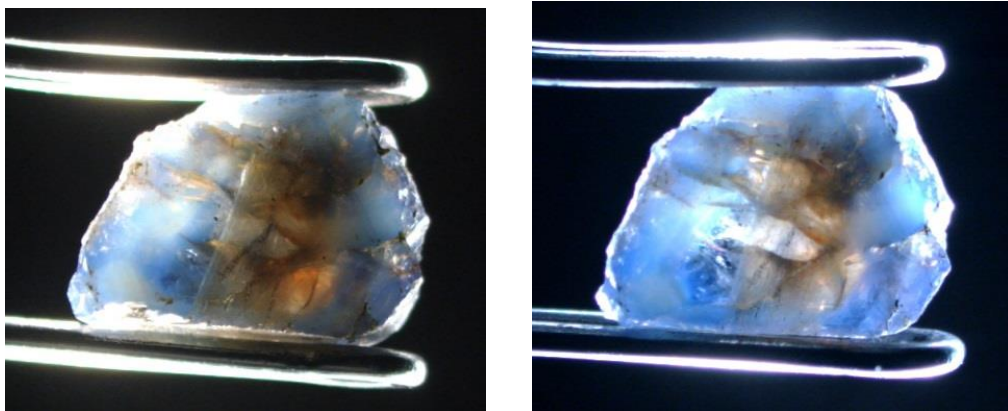
โครงการย่อยที่ 1 เป็นการใช้เทคนิคไนโตรเจนไอออนอิมพลานเตชันเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงแสงพลอยธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว ในโครงการวิจัยนี้ ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลของความร้อนจากการเผาที่สภาวะต่างๆ ที่มีต่อพลอย และการศึกษาผลของลำไอออนชนิดต่างๆที่มีต่อพลอย

ในการศึกษาการเผาพลอย ได้ทดลองใช้การเผาทั้งในแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1200 – 1750 °C และเตาแก๊สที่อุณหภูมิ 1900 °C โดยใช้เทคนิคแบบเผายก และการเผาแบบบริดจ์ขึ้นในเตาน้ำมันดีเซลอุณหภูมิ 1900 °C โดยใช้เทคนิคแบบเผาอบ การพัฒนาเทคนิคการเผาพลอยเป็นเสมือนการพัฒนาเทคนิคการเปลี่ยนสภาพของเชื้อสีซึ่งเป็นธาตุเจือในคอร์นัคม ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเลขออกซิเดชันของธาตุเจือเหล่านั้น รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งที่อยู่ของธาตุเจือและการแปรสภาพของมลทินขนาดเล็ก ให้เกิดการแพร่แทนที่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์นัคม ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีและความสะอาดของคอร์นัคมได้ โดยเทคนิคเหล่านี้จะมีเงื่อนไขตัวแปรหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแหล่งพลังงานในการเผา อุณหภูมิในการเผาและอุณหภูมิสูงสุดในการเผา จำนวนครั้งที่เผา บรรยากาศในขณะทำการเผา ความแรงของการเพิ่มและการลดอุณหภูมิในการเผา และสารเคมีที่ใช้ร่วมกับการเผา เป็นต้น โดยผลจากการทดลองพบว่า การเผาแบบออกซิเดชันช่วยให้พลอยที่มีสีเข้ม-มืด และขุ่นมัว ให้มีสีอ่อนลงและใสขึ้น ส่วนการเผาแบบบริดจ์ขึ้น ช่วยให้พลอยที่มีสีอ่อน ให้เข้มขึ้น และช่วยให้สีน้ำเงินกระจายทั่วทั้งเม็ด นอกจากนี้ ยังช่วยกำจัดเกลือสีเขียวด้วย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองด้วยลำไอออนซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 1 ไดอะแกรมแสดงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงานพลอยในอุตสาหกรรม SMEs

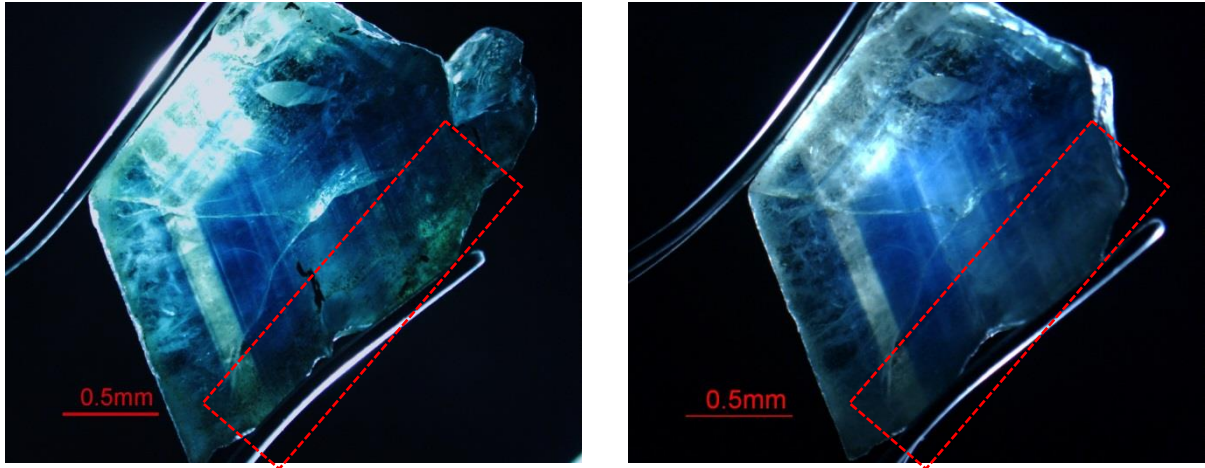
ในการทดลองยิงพลอยด้วยลำไอออนไนโตรเจนในสถานะสุญญากาศ พบว่ามีความน่าสนใจคือไนโตรเจนไอออนไม่ได้เป็นสารแปลกปลอมเพราะเป็นสิ่งที่สามารถพบได้ในพลอยธรรมชาติ ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสร้างไนโตรเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ไนโตรเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสถานะรีดักชันได้รวดเร็วแม้ในสถานะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี คือพลอยสีน้ำเงินอมเขียวซึ่งมีสีเหลืองจากสีของเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้าง หลังการยิงไอออนไนโตรเจนสีเหลืองจางลงจนเห็นสีน้ำเงินเข้มชัดเจนขึ้น ทำให้พลอยสีน้ำเงินอมเขียวเปลี่ยนเป็นเป็นสีน้ำเงินเข้มสม่ำเสมอ เกิดจากการเปลี่ยนเลขออกซิเดชันจากเฟอร์ริกไปเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์ันดัม ผลที่ได้คือจะทำให้สีเขียวจางลงหรือหายไป ในกรณีของการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจน พบว่าพลอยน้ำเงินเข้มที่บสแสงหลังการยิงไอออนด้วยลำออกซิเจนส่งผลให้พลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้นและทำให้เห็นสีน้ำเงินสดเข้มขึ้นด้วย กระบวนการสร้างออกซิเจนไอออนและเร่งให้ไอออนมีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนกับตัวอย่างพลอย ออกซิเจนไอออนจะถูกฝังเข้าไปในเนื้อพลอยและถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรงอย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดสถานะออกซิเดชันได้รวดเร็วแม้ในสถานะที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ทำให้เกิดความเสียหายทางกายภาพแก่พลอย แต่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงแสงและเคมี โดยจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่ตรงข้ามกับการทดลองยิงด้วยลำไนโตรเจน ออกซิเจนไอออนที่ฝังเข้าไปในคอร์ันดัมจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของของเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ทั้งที่เป็นธาตุเจือในโครงสร้างและที่เป็นมลทินขนาดเล็กในคอร์ันดัม เปลี่ยนไปเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญในการให้สีน้ำเงินในพลอยคอร์ันดัม ส่งผลให้สีน้ำเงินที่บสแสงเปลี่ยนแปลงไปโดยมีลักษณะของสีที่น้ำเงินที่สว่างขึ้น ตัวอย่างผลการยิงไอออนแสดงดังในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ตัวอย่าง PhrDkC18_2 เปรียบเทียบก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออนออกซิเจน จะเห็นว่าพลอยโปร่งแสงขึ้น สีสนิมลดลง และสีน้ำเงินเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นผลจากการเผาพลอยที่อุณหภูมิและบรรยากาศต่างๆ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลของการยิงตัวอย่างพลอยด้วยลำไอออน จะพบว่ามีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันอย่างมาก โดยทั้งสองวิธีจะมีตัวแปรที่สำคัญคือบรรยากาศออกซิเดชันและรีดักชันในการปรับปรุงคุณภาพพลอย โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเลขออกซิเดชันของเหล็กที่จะส่งผลให้มีสีของพลอยคอร์ันดัมที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของมลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยได้เช่นเดียวกัน แต่ในการยิงลำไอออนจะเป็นการเปลี่ยนสภาพของธาตุเจือให้สีโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่จะพบว่าด้วยพลังงานของลำไอออนหรือจำนวนโดสที่ใช้ในการทดลองยังไม่มากเพียงพอจะทำให้เกิด

การเปลี่ยนแปลงของธาตุเจือให้สีที่เด่นชัดเท่ากับการเผาด้วยความร้อน หากมีการพัฒนาเครื่องเร่งลำไอออนให้สมบูรณ์มากขึ้น และเลือกค่าพลังงานหรือจำนวนโดสที่เหมาะสมกว่านี้ น่าจะสามารถปรับปรุงคุณภาพสีของพลอยคอร์ันดัมให้เทียบเท่าการเผาได้



รูปที่ 3 ตัวอย่าง BkZn27_02 เปรียบเทียบก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออนไนโตรเจน จะเห็นว่าเหลือสีเขียวหายไป และพลอยมีความโปร่งแสงมากขึ้น

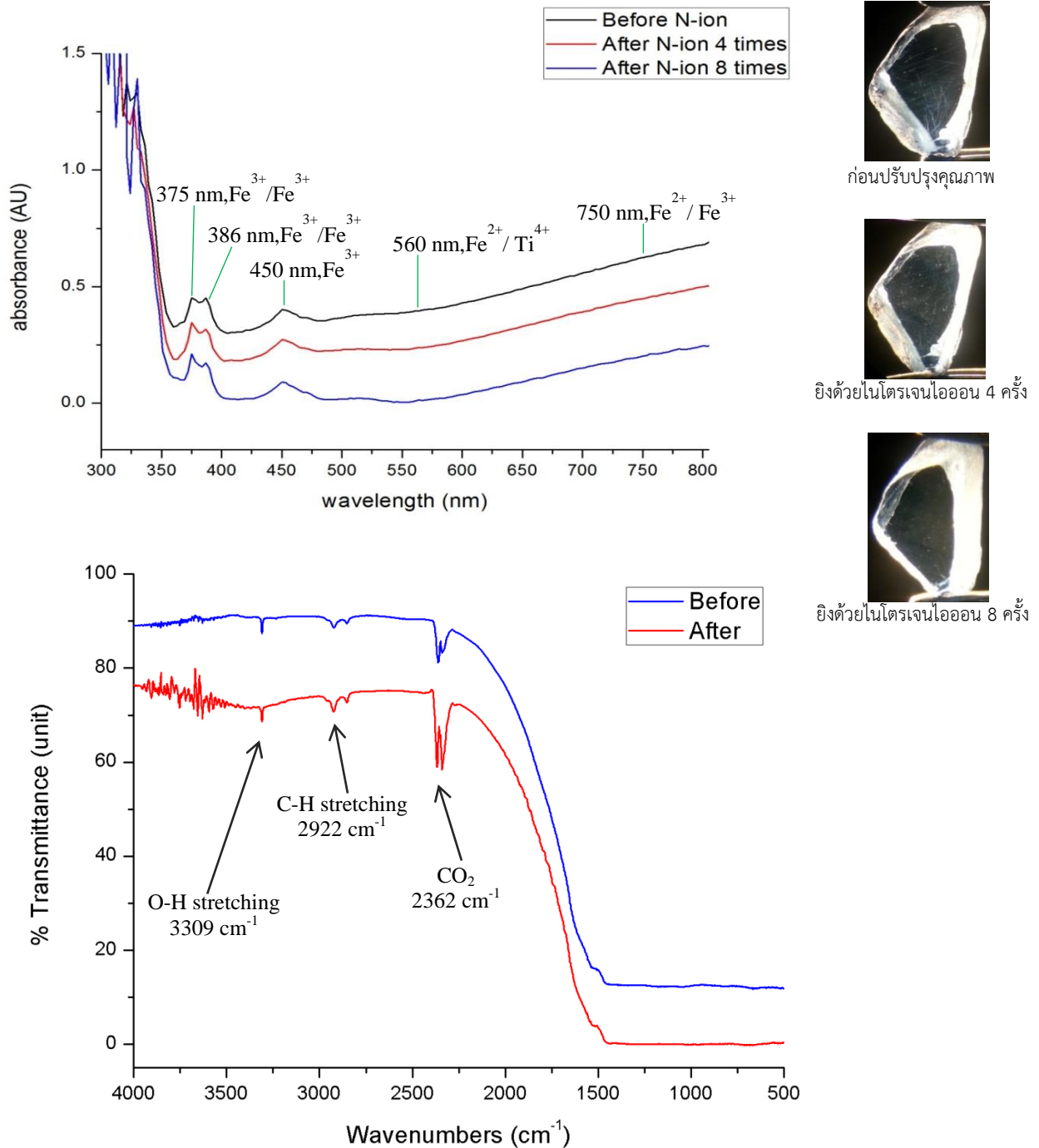
2.4 สรุปผลการดำเนินงานโครงการย่อยที่ 2

โครงการย่อยที่ 2 เป็นการปรับปรุงคุณภาพพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีขาวสำหรับทดแทนอัญมณีคล้ายเพชรโดยใช้เทคนิคลำไอออน

ในพลอยคอร์ันดัมธรรมชาติมักมีมลทินขนาดเล็กที่สามารถพบได้ทั่วไป ซึ่งมักเกิดร่วมกับธาตุเหล็กและไทเทเนียม ทำให้สามารถพบแร่มลทินที่มีองค์ประกอบของธาตุเหล่านี้ในเนื้อพลอยคอร์ันดัม เช่น แร่อิลมีไนต์ (Ilmenite; FeTiO_3) แร่รูไทต์ (Rutile; TiO_2) แร่ฮีมาไทต์ (Hematite; Fe_2O_3) แร่ไดแอสปอร์ (Diaspore; AlOOH) เป็นต้น โดยมลทินขนาดเล็กเหล่านี้จะส่งผลให้พลอยมีลักษณะขุ่นมัว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของมลทินและขนาดของมลทินด้วย เมื่อมีการยิงลำไอออนของออกซิเจนสู่พลอยคอร์ันดัมที่มีมลทินขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร จะทำให้เกิดการออกซิไดส์เกิดขึ้นในเนื้อพลอย มลทินขนาดเล็กเหล่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนสภาพโดยเหล็ก (Fe) และไทเทเนียม (Ti) เกิดการแพร่เข้าสู่โครงสร้างของคอร์ันดัมในรูปของ $\text{Fe: Al}_2\text{O}_3$, และ $\text{Ti: Al}_2\text{O}_3$ ทำให้มลทินขนาดเล็กในเนื้อพลอยแปรสภาพไปโดยอาจมีขนาดที่เล็กลงหรืออาจแพร่หายไปในการสร้างได้ ส่งผลให้พลอยคอร์ันดัมมีความสะอาดเพิ่มขึ้นหลังการยิงพลอยคอร์ันดัมด้วยออกซิเจนไอออน นอกจากนั้น ไอออนอิมพลานเตชันยังทำให้ผิวพลอยมีความแข็งเพิ่มมากขึ้น ทำให้นำไปทำเป็นวัสดุทดแทนเพชรได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างผลการยิงไอออนสำหรับพลอยแซฟไฟร์สีขาวแสดงดังในรูปที่ 4

ในส่วนท้ายของโครงการย่อยที่ 2 นี้ ได้นำเสนอกระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับแบบใหม่ เรียกว่า กระบวนการฝังพร้อมหล่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือการที่มีอัญมณีในตัวเรือนพร้อมเสร็จหลังจากการหล่อและสามารถขัดชุบได้ทันที การหล่อมีพื้นฐานเหมือนการหล่อโดยทั่วไป แต่มีส่วนที่จะแตกต่างคือ มีการการฝังอัญมณีลงบนเทียนก่อนที่จะทำการหล่อ จุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าพลอยที่ผ่านกระบวนการยิงฝังด้วยไอออน สามารถผ่านกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงในระหว่างหล่อได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ ผลผลิตที่ได้คือสินค้าสำหรับนิชมาร์เก็ต

เพื่อใช้เป็นของขวัญหรือของรางวัลที่มีความงดงามเชิงศิลป์ ในที่นี้ได้แก่พญาอินทรี ที่เป็นสัญลักษณ์ของการเป็นผู้นำ ความยิ่งใหญ่ ความสง่างามอย่างแท้จริง มีวิสัยทัศน์กว้างไกล และมองการณ์ไกล ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 (ภาพบน) UV-spectra และ (ภาพล่าง) FTIR spectra ของพลอยตัวอย่าง P5 เปรียบเทียบระหว่างก่อนยิงไอออน หลังยิงไอออน 4 ครั้ง แล้วบอ้อนด้วยพลาสมาที่ 400 °C และหลังยิงไอออน 8 ครั้ง แล้วบอ้อนด้วยพลาสมาที่ 400 °C



รูปที่ 5 ภาพถ่ายด้านหน้าและด้านหลังของประติมากรรมชื่อ พญาอินทรี มีความสูงจากพื้นถึงปลายปีก 33 ซม. ระยะจากปลายปีกถึงปลายปีก 28 ซม. ประดับด้วยพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว และพลอยสีชาวล้ำเพชร จำนวน 866 เม็ด น้ำหนักพลอยกว่าพันกะรัต ซึ่งทุกเม็ดผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน

2.5 ข้อเสนอแนะ

ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์ันดัมสำหรับพลอยจากแหล่งประเทศไทย พบว่าสามารถทำให้มีสีสวยสด และเนื้อพลอยสะอาด ลดความขุ่นมัว ทำให้พลอยหลังการเจียรระโนแล้วมีความสดใส แวววาวมากขึ้น เมื่อนำไปประกอบกับตัวเรือนเครื่องประดับ สามารถเพิ่มมูลค่าได้สูงยิ่งขึ้น คณะทำงาน คาดหวังว่าผลการศึกษานี้ จะช่วยวางรากฐานของเทคโนโลยีลำไอออนแก่ผู้สนใจที่จะนำไปศึกษาต่อไป จนสามารถนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยได้

บทคัดย่อ

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

ในแผนงานวิจัยนี้ ได้มีการปรับปรุงเครื่องไอออนอิมพลานเตอรืต้นแบบสำหรับงานพลอย ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการบำรุงรักษาได้ง่าย และสามารถจัดวางชิ้นงานได้ง่าย รวมทั้งได้ปรับปรุงส่วนต่างๆ ให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งได้ติดตั้งที่อุ่นพลอยขณะยิงไอออน เพื่อเพิ่มอันตรายกิริยาระหว่างลำไอออนและพลอยอีกด้วย ท้ายที่สุดแล้ว จึงได้เครื่องมือและเทคนิคที่สามารถสร้างไอออน ที่ผ่านระบบการเร่งให้มีพลังงานสูง ที่มีปริมาณไอออนจำนวนมากพอที่จะวิ่งเข้าชนกับพลอย เพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการปรับปรุงความสะอาดในเนื้อพลอย และการกำหนดสีของพลอยได้อย่างเหมาะสม ในแผนงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้ใช้พลอยธรรมชาติตระกูลคอร์นดัม 2 ชนิดสำหรับทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ พลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว และพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีขาว

ในกรณีของพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงินนั้น เป็นที่ทราบกันดีว่าการที่พลอยสีน้ำเงินที่มีสีเหลืองปน จนทำให้เห็นพลอยเป็นสีน้ำเงินอมเขียวนั้น จัดเป็นพลอยที่ตลาดไม่ให้ความนิยม จึงมีการนำเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี และความใสสะอาด มาปรับปรุงคุณภาพพลอยให้เป็นสีน้ำเงินสด ทำให้พลอยมีมูลค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีปัจจุบันยังทำไม่ได้ ส่วนใหญ่มักจะใช้การเผาโดยเติมธาตุเบริลเลียม เพื่อให้ได้เป็นสีเหลืองงานวิจัยส่วนนี้ เริ่มต้นโดยการรวบรวมพลอยแซฟไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอมเขียว จากแหล่งพลอยที่มีความสำคัญในตลาดอัญมณี คือ จากแหล่งวันดา ออสเตรเลีย และแหล่งพลอยของประเทศไทย 3 แหล่ง ได้แก่ จันทบุรี กาญจนบุรี และแพร่ ซึ่งเป็นแหล่งที่มีปริมาณธาตุเหล็กสูง ที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินภูเขาไฟชนิดบะซอลต์ และกลุ่มที่มีปริมาณเหล็กต่ำที่มีกำเนิดสัมพันธ์กับหินแปร เช่น มาดากัสการ์ และศรีลังกา จากนั้น ได้แบ่งพลอยออกเป็นกลุ่มๆ ตามลักษณะเด่นของพลอย ศึกษาชนิดและปริมาณของธาตุเจือที่ทำให้พลอยแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกัน

รวมทั้งศึกษาลักษณะของอินคลูชันในพลอยแต่ละกลุ่ม พลอยแต่ละเม็ดได้นำไปผ่าครึ่งแล้วนำไปพัฒนาคุณภาพ ใน 2 รูปแบบ ได้แก่ (i) การยิงฝังด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบคอมแพ็ค โดยไม่มีกระบวนการอื่นเพิ่มหลังยิง ไอออน ยกเว้นการทำความสะอาดผิวพลอยด้วยพลาสติก และ (ii) การเผาด้วยความร้อนสูงโดยไม่ใส่สารเคมี ซึ่งทำ ในหลายรูปแบบ ทั้งเผาแบบออกซิเดชันในเตาไฟฟ้า และเผาแบบรีดักชันในเตาน้ำมัน โดยใช้อุณหภูมิสูง ตั้งแต่ 1,000 องศาเซลเซียสขึ้นไป พลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วได้นำมาวิเคราะห์สมบัติทางแสง จนได้เป็น ข้อสรุปทางวิทยาศาสตร์ ถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 วิธี ท้ายที่สุดได้เปรียบเทียบ กระบวนการและผลที่เกิดขึ้น และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 2 วิธี

ในกรณีของพลอยแซฟไฟร์สีขาว พลอยคอร์ันดัมธรรมชาติที่ปราศจากธาตุเจือปนที่มีส่วนทำให้เกิดสี ผู้ประกอบการเรียกว่าพลอยขาว สามารถขุดพบได้ในทุกแหล่งที่ขุดพบพลอยคอร์ันดัมสีอื่นๆ แต่คุณภาพตามที่ต้องการเพื่อทดแทนเพชร ต้องเป็นเนื้อแก้ว โปร่งใส และเข้าข่ายไม่มีสี ถือเป็นพลอยคอร์ันดัมที่บริสุทธิ์ที่สุด และหายากที่สุด เพราะพลอยในตระกูลคอร์ันดัมมีความแข็งสูง 9 ตามสเกลของโมห์ โอกาสที่จะถูกขูดขีดให้ขุ่นมัวมี น้อย มีประกายแวววาวจากค่าดัชนีหักเหสูง เมื่อผ่านการเจียรระไนและตกแต่งเป็นเครื่องประดับจะมีมูลค่าสูงมาก แต่ที่พบบ่อยจะเป็นพลอยที่มีขนาดเล็ก และพบได้น้อยทำให้ราคาสูง หรือที่พบมากขนาดใหญ่ จะมีมลทินมาก เนื้อ ขุ่น ค่อนข้างทึบ ราคาถูกกว่า ทำให้ในตลาดอัญมณียังต้องการซื้อพลอยแซฟไฟร์สีขาวขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ เพราะน้ำสวยกว่า เหมาะสมที่ใช้ทดแทนเพชร งานวิจัยนี้ จึงเป็นการพัฒนาคุณภาพพลอยคอร์ันดัมขนาด 2 กะรัต ขึ้นไป จากกลุ่มไม่มีเชื้อสี หรือ พลอยสีจาง เนื้อขุ่น และปริมาณธาตุเจือปนน้อย ซึ่งไม่สามารถเพิ่มสีโดยขบวนการทาง ความร้อนได้ ผู้ประกอบการมักจะคัดแยกออกจำหน่ายในราคาต่อกะรัตถูกกว่าพลอยที่มีเชื้อสีมาก จากแหล่งต่างๆ เช่น ศรีลังกา พม่า ไทย โดยใช้เทคนิคลำไอออน ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ด้วยลำไอออน โดยระบบเครื่องเร่ง อนุภาคแทนเดิม ขนาด 1.7 MV เพื่อศึกษาองค์ประกอบต่างๆ ความขุ่นที่มาจากธาตุมลทินต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ พลอยมีคุณภาพต่ำ และใช้เทคนิคการยิงฝังพลอยด้วยเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ชนิดคอมแพ็ค และการอบอ่อน เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย เช่น เพิ่มความใส สะอาด และมีประกาย ด้วยการสลายสารมลทิน โดยไม่เกิด การทำลายเนื้อพลอย พลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพได้นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่ การวิเคราะห์การ ดูดกลืนแสง เทคนิครามาน จนได้ข้อสรุปทางวิทยาศาสตร์ถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระหว่างการยิงฝังด้วยไอออน

ท้ายที่สุด แผนงานวิจัยนี้ ได้แสดงแนวคิดหนึ่งในการใช้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น ผลผลิตสินค้าสำหรับนิคมาร์เก็ต เพื่อใช้เป็นของขวัญหรือของรางวัลที่มีความงดงามเชิงศิลป์ พร้อมกับดูมีราคาเพราะประดับด้วยพลอยธรรมชาติ จำนวนมาก โดยใช้พลอยธรรมชาติคุณภาพต่ำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน ไปประดับบนชิ้นงาน ประติมากรรม ด้วยเทคนิคที่คิดค้นขึ้นมาใหม่ เรียกว่า การฝังพร้อมหล่อ

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.

This research program aims to develop the ion implanter and ion implantation technique for color enhancement of corundum. The compact ion implanter of Chiang Mai University has been modified for this purpose. Especially, the heater has been installed at the target holder for elevating the temperature during ion beam treatment. Thus, the color of corundum and its transparency can be engineered. For evaluate the efficiency of the process, natural greenish blue sapphire and natural white sapphire have been selected for this investigation.

For blue sapphire, the most highly valued blue sapphires are velvety blue to violetish blue, in medium to medium dark tones. Preferred sapphires also have strong to vivid color

saturation. The saturation should be as strong as possible without darkening the color and compromising brightness. On the other hand, greenish blue color or strong greenish blue pleochroism is commercial-grade sapphires, but its color isn't very marketable. Thus, various methods have been applied for improving the color quality of the dark blue and greenish blue sapphire. The popular one is heating in beryllium atmosphere to turn them to yellow sapphire. In the present study, we have applied our ion beam technology for color enhancement of the sapphire in this group. Blue sapphire deposits from Rwanda, Australia and Thailand which are basaltic in origin and those from Sri Lanka and Madagascar which are non-basaltic or metamorphic are chosen for investigation. Each sample was cut into half and submitted to polish before any investigation. Optical analysis using microscope, chemical analysis using PIXE and EDXRF, and absorption analysis using UV-NIR spectroscopy were applied for characterization. Each half of samples was treated by 2 methods, i.e., (i) ion beam treatment and (ii) conventional heat treatment. On one hand, ion beam technology treatment was performed by nitrogen and oxygen ion implantation. No post treatment, except surface plasma cleaning, was done after the treatment. On the other hand, heat treatment was performed in both oxidation and reduction atmosphere. Results of post-treatment characterization were drawn for conclusions. Finally, ion beam technology and heat treatment are compared in term of economically evaluation.

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. Conclusions could be drawn from those measurements.

Finally, the treated blue and white 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
แบบสรุปผู้บริหาร (Executive Summary)	ง
บทคัดย่อ	ฐ
Abstract	ฒ
สารบัญรูป	ถ
สารบัญตาราง	น
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงาน	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พลอยแซปไฟร์	4
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซปไฟร์	4
2.1.2 การเกิดสีของแซปไฟร์	6
2.2 เทคโนโลยีลำไอออน	8
2.2.1 เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน	8
2.2.2 การพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ในประเทศไทย	11
2.2.3 การประยุกต์ไอออนอิมพลานเตชันสำหรับงานพลอย	13
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	16
3.1 วัสดุ	16
3.2 อุปกรณ์	16
3.2.1 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด	16
3.2.2 Optical Spectrophotometer	18
3.2.3 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปฝังพร้อมหล่อ	28
3.3 ระเบียบวิธีการวิจัย	29
3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	29
3.3.2 แผนการดำเนินงาน	31
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	32
4.1 การปรับปรุงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาดกะทัดรัดสำหรับงานพลอย	32
4.1.1 แหล่งกำเนิดไอออน	34

4.1.2	ท่อเร่งลำไอออนแบบไฟฟ้าสถิตย์	34
4.1.3	สถานีทดสอบลำไอออน	35
4.1.4	ห้องยิงฝึกลำไอออน	36
4.1.5	ระบบสุญญากาศ	37
4.1.6	ระบบไฟฟ้า	38
4.2	การปรับปรุงเครื่องทำพลาสมาสำหรับงานพลอย	44
4.2.1	เครื่อง plasma cleaning	44
4.2.2	เครื่องพลาสมาบอ่อน	45
4.3	การพัฒนาเครื่องทำความร้อนติดตั้งในห้องยิงฝึกลำไอออน	46
4.3.1	การออกแบบเครื่องทำความร้อนและระบบควบคุมการทำงาน	46
4.3.2	การทดสอบการใช้งานในระบบสุญญากาศ	48
4.3.3	การทดสอบการใช้งานขณะยิงไอออนในสภาวะความร้อนสูง	52
4.4	การตรวจสอบตัวอย่างหลังยิงไอออน	55
4.5	การออกแบบเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับ SMEs	60
4.5.1	แหล่งกำเนิดไอออน	60
4.5.2	ท่อเร่งลำไอออน	61
4.5.3	High voltage shielding	61
4.5.4	สถานีทดสอบลำไอออน	62
4.5.5	ห้องใส่ตัวอย่างสำหรับยิงฝึกลำไอออน	62
4.5.6	ระบบจ่ายไฟฟ้า	63
4.5.7	ระบบสุญญากาศ	62
4.5.8	ระบบตรวจวัด	63
4.5.9	ระบบหล่อเย็น	66
4.5.10	ระบบปั๊มลม	66
บทที่ 5	บทสรุป	69
5.1	สรุปผลการทดลอง	69
5.2	ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง		72
ภาคผนวก		74
ก.	เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ	75
ข.	เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2-1	พลอยทับทิมจากแหล่งโม่กก ประเทศพม่า พบอยู่ในหินหุ้มห่อ	4
2-2	ตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออนในโครงสร้างของคอร์ันดัม	5
2-3	แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure	5
2-4	กลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน	8
2-5	ลักษณะองค์ประกอบทั่วไปของเครื่องเร่งลำไอออน หรือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์	9
2-6	ความลึกของการฝังไอออนโบรอนในเนื้อซิลิกอนที่ไอออนพลังงานค่าต่างๆ	10
2-7	ความลึกของการฝังไอออนในแนวแกนลิ่งจะไม่แน่นอน แต่จะขึ้นกับจำนวนโดสด้วย	11
2-8	เครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าเร่ง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์	12
2-9	เครื่องเร่งอนุภาคแทนเต็มขนาดศักย์ไฟฟ้าเร่ง 1.7 เมกาอิเล็กตรอนโวลต์	12
2-10	แชปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันมีความโปร่งใสเพิ่มมากขึ้นตามค่าโดสที่เพิ่มขึ้น	13
2-11	เปรียบเทียบแชปไฟร์สีน้ำเงินเข้มก่อนและหลังทำไอออนอิมพลานเตชัน	14
2-12	เปรียบเทียบทับทิมก่อนและหลังยิงด้วยไอออน แสดงให้เห็นการลดลงของ microinclusion	14
2-13	เปรียบเทียบทับทิมธรรมชาติก่อนและหลังทำไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นว่าพลอยมีสีแดงสดขึ้น	15
2-14	เปรียบเทียบแชปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียวก่อนและหลังทำไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นว่าสีเขียวหายไป กลายเป็นสีน้ำเงินสด	15
2-15	กลุ่มพลอยสีต่าง ๆ ก่อนและหลังทำไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจน จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสีในพลอยเกือบทุกเม็ด นอกจากนั้น ยังทำให้พลอยโปร่งใสมากขึ้น	15
3-1	แบบสร้างของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดขนาดไม่เกิน 100 กิโลโวลต์	17
3-2	เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับงานพลอย	17
3-3	Optical Spectroscopy (Ocean Optics) นำมาดัดแปลงเพื่อใช้วัดสี (colorimeter) ของพลอย	18
3-4	การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)	19
3-5	ส่วนประกอบภายในของเส้นใยแก้วนำแสง	19
3-6	แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง	20
3-7	การเรืองแสงของหลอด Halogen	20
3-8	กราฟ spectrum ของแสงจาก Halogen Lamp วัดผ่านสาย Fiber optics	20
3-9	การเรืองแสงของหลอด Deuterium	21

3-10	กราฟ spectrum ของแสงจาก Deuterium Lamp วัดผ่านสาย Fiber optics	21
3-11	กราฟ spectrum ของแสงจาก Halogen Lamp + Deuterium Lamp วัดผ่านสาย Fiber optics	21
3-12	แผนผังการทำงานภายใน Spectrometer (วงกลมสีแดง)	22
3-13	Spectrometer USB2000+XR ที่ใช้ในการทดลอง	22
3-14	ส่วนประกอบภายใน Ocean Optics Spectrometer	24
3-15	ปรากฏการณ์ของแสงที่เกิดขึ้นบนวัตถุชนิด ทึบแสงผิวมัน ทึบแสงผิวขรุขระ โปร่งแสง และ โปร่งใส	24
3-16	Integrating Sphere	25
3-17	ตัวสะท้อนมาตรฐาน	26
3-18	ลักษณะลำแสงหลังจากผ่านเลนส์แบบต่างๆ	26
3-19	แท่นวิเคราะห์ที่ใช้การวัดการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสง	27
3-20	แผ่นวาง Sample บวกตำแหน่ง Scale 2 mm	27
3-21	เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปฝังพร้อมหล่อ Investment mixer, Furnace or Burnout oven, Vacuum Pressure Casting Machine	28
4-1	เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ และชั้นวาง power supply หลังปรับปรุง	33
4-2	รายละเอียดเชิงเทคนิคของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดขนาดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลโวลต์ ที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้นใช้งานเอง	33
4-3	ภาพถ่ายแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron และแผนภาพแสดงส่วนประกอบหลัก	34
4-4	ภาพถ่ายท่อเร่งอนุภาคที่ได้รับการปรับปรุง และ (ข) แผนภาพโครงสร้างท่อเร่งอนุภาค	35
4-5	แชมเบอร์ 4 ทางสำหรับตรวจสอบคุณลักษณะของลำไอออน	35
4-6	แผนภาพและภาพถ่ายแสดงองค์ประกอบและการใช้งาน Faraday cup	36
4-7	ห้องยิงลำไอออนและ gate valve	36
4-8	ระบบปั๊มสุญญากาศเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด	37
4-9	วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงและระบบ ground ของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด	39
4-10	100-kV isolation transformer ผลิตโดยบริษัท KV Electronics ประเทศไทย	40
4-11	30-kV isolation transformer ผลิตโดยบริษัท KV Electronics ประเทศไทย	40
4-12	ลักษณะลำไอออนที่ถูกโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันสำหรับยิงขึ้นตัวอย่างในแต่ละขนาด	43
4-13	Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร	44
4-14	เครื่องพลาสมาอบอ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	45

4-15	ไดอะแกรมเครื่องพลาสติกอบอ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	45
4-16	แบบสร้างเครื่องทำความร้อน ซึ่งใช้ Heater รุ่น ELW-4	46
4-17	ไดอะแกรมวงจรเครื่องทำความร้อน	47
4-18	ไดอะแกรมวงจรเครื่องทำความร้อนบนแผ่นวงจรพิมพ์	47
4-19	ระบบอุ่นพลอยขณะยิงไอออนที่ประกอบและติดตั้งในห้องยิงพลอยของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์	48
4-20	ติดตั้งเครื่องทำความร้อนในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด	48
4-21	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิ heater ที่ 80 °C	51
4-22	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา และความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดโดยตั้งอุณหภูมิ 120 °C	54
4-23	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง A7 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	56
4-24	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง A8 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	57
4-25	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง B7 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	57
4-26	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง B8 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	58
4-27	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง C7 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	58
4-28	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง C8 ก่อนและหลังยิงด้วยไนโตรเจนไอออน	59
4-29	ไดอะแกรมของแหล่งกำเนิดไอออนแบบอาร์เอฟ พัฒนาโดย Lawrence Berkeley National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา และรูปถ่ายแหล่งกำเนิดไอออนขณะใช้งานจริง	60
4-30	แบบร่างท่อเร่งลำไอออนสำหรับเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs	61
4-31	แบบร่างสถานีทดสอบลำไอออน สำหรับใช้กับเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs	62
4-32	แบบร่างห้องยิงฝึกลำไอออนของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs	63
4-33	ปั๊มสุญญากาศแบบ Rotary รุ่น RV 12 ขนาด 12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ของบริษัท Edwards	64
4-34	ปั๊มสุญญากาศแบบ Turbo-molecular รุ่น EXT 351 ขนาด 350 ลิตร ต่อ วินาที และระบบควบคุมรุ่น EXC 300 ของบริษัท Edwards	64
4-35	หัววัดความดันแบบ pirani (ซ้าย) และ แบบ penning (ขวา) ของบริษัท Edwards	65
4-35	หัววัดความดันแบบ pirani (ซ้าย) และ แบบ penning (ขวา) ของบริษัท Edwards	65
4-37	แผนภาพ และภาพถ่าย แสดงองค์ประกอบและการใช้งานของ Faraday cup	65
4-38	แบบร่างระบบหล่อเย็นสำหรับใช้กับเครื่องเร่งลำไอออนขนาดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลโวลต์	66
4-39	ปั๊มลมขนาด 1 Hp	66
4-40	ไดอะแกรมแสดงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงานพลอยในอุตสาหกรรม SMEs	68

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของคอร์นดัมกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี	7
3-1 คุณลักษณะเฉพาะของ Spectrophotometer	22
3-2 คุณลักษณะเฉพาะของ Integrating Sphere	25
4-1 คุณลักษณะของปี่มสุญญากาศ	38
4-2 ระบบควบคุมการปฏิบัติการของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด	41
4-3 ผลการบันทึก เวลา อุณหภูมิ และ ความดัน ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนที่ 80°C	49
4-4 ผลการบันทึก เวลา อุณหภูมิ และ ความดัน ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนที่ 120 °C	52
4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีและลักษณะทางกายภาพของโพลิน เมื่อ Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (N^{2+}) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พลังงาน 50 KeV ที่อุณหภูมิ 120 °C	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการผลิต การค้าอัญมณี และเครื่องประดับ ที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยเฉพาะการปรับปรุงคุณภาพพลอยธรรมชาติ ให้มีสีสวยสด และมีความใสแวววาวมากขึ้น เมื่อนำไปประกอบกับตัวเรือนเครื่องประดับ จะเพิ่มมูลค่าได้สูงยิ่งขึ้น พลอยตระกูลคอร์รันดัม (corundum) จัดเป็นอัญมณีสำคัญที่เป็นจุดแข็งของไทย และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้มากที่สุด แต่พลอยธรรมชาติที่มีความใสสะอาดและสีสดนั้นมีน้อยและหายาก ในขณะที่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบในประเทศเริ่มขาดแคลนและหายากขึ้น จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ โดยเฉพาะในตลาดการค้าพลอยสี จะมีการตั้งราคาโดยใช้คุณสมบัติที่แตกต่างกันของพลอย เช่น ลักษณะธรรมชาติการดูดกลืนของแสง (optical phenomenon) ลักษณะโครงสร้างภายใน (internal features) และคุณสมบัติความโปร่งใส (transparency) แต่สิ่งที่เป็นเกณฑ์กำหนดราคาที่สำคัญคือสีพลอย (color) การใช้สีในการประเมินเกรดสีของพลอยโดยนักอัญมณี มีองค์ประกอบ 3 ประการคือเฉดสี (Hue), โทนสี (Tone) และ ความอิ่มตัว (Saturate) ในปัจจุบันพลอยคอร์รันดัมสีต่างๆที่ซื้อขายกันในตลาดส่วนใหญ่ มักผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนหรือที่เราเรียกกันว่าการเผา ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความใสสะอาด (clarity) ทำให้มูลค่าของพลอยดิบคุณภาพต่ำสูงขึ้น เทคนิคนี้ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปในตลาดพลอย การเผาพลอยมีมาตั้งแต่ยุคโบราณจนปัจจุบัน มีการนำเทคโนโลยีและเครื่องมือ หรือแม้กระทั่งการพัฒนาเทคนิคต่างๆหลากหลายรูปแบบ เช่น การเผาอุดรอยแตก (Fracture Filling หรือ Flux Healing) และการชานสี (Diffusion Processes) เทคนิคทั้งหมดดังกล่าวนี้ก็เพื่อทำให้พลอยมีความโปร่งใสและมีสีตามที่ต้องการ โดยเฉพาะการเผา ซึ่งทำให้สีพลอยดีขึ้นและอยู่คงทนถาวร แต่อย่างไรก็ตาม การเผาพลอยยังมีข้อเสียบางครั้งจะเกิดการแตกร้าวภายในพลอยทำให้มูลค่าลดลง ซึ่งรอยร้าวที่ปรากฏบนผิวหรือในเนื้อพลอยอาจเกิดเนื่องจากพลอยได้รับความเค้น ที่มีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงเชิงผลึกของหินที่หุ้มพลอย หรือ อาจเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของขบวนการขยายตัวของผลึกพลอยเอง การแก้ไขอาจทำได้โดยนำพลอยมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเป็นเวลานานพอสมควร จนทำให้ความเครียดในเนื้อพลอยลดลง หรือเกิดการปรับกระบวนการขยายตัวของผลึกทำให้ลดรอยแตกที่ไม่พึงประสงค์ได้ แม้กระนั้นก็ตาม ยังมีข้อจำกัดอื่นๆ เช่น พลอยที่มีราคาถูก คุณภาพต่ำ ทึบแสง มีมลทินมากแต่ขนาดใหญ่ หรือพลอยที่มีสีรองทำให้สีไม่สดและไม่สม่ำเสมอ ไม่สามารถใช้กลไกทางความร้อนแก้ปัญหาได้ทั้งหมด ทั้งนี้การปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพลอย ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแร่ผลึก โครงสร้างผลึกของพลอย แหล่งกำเนิดที่มีแร่ผลึกหลัก ปริมาณธาตุเจือที่มีในโครงสร้างผลึกพลอย ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการและเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือ เพื่อลดข้อจำกัดของการปรับปรุงคุณภาพแบบเดิม

การปรับปรุงคุณภาพวัสดุด้วยเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน เป็นเทคนิคในการฝังไอออนที่มีพลังงานสูงเข้าไปในวัสดุ เพื่อก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น เช่น แลกเปลี่ยนพลังงานกับอะตอมหรือโมเลกุลของตัวอย่าง จนทำให้อะตอมเกิดการเคลื่อนที่ไปแทรกอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) เกิดเป็นช่องว่าง (vacancy) และอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงในบางตำแหน่ง แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะไปรวมตัวกับโครงสร้างเดิม เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย

โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดตำหนิภายใน เช่น ของแข็งจากธาตุชนิดอื่น ของเหลว แก๊ส ที่สร้างความขุ่นมัวภายในเนื้อพลอย

ในแผนงานวิจัยนี้ ได้มีการปรับปรุงเครื่องโอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับงานพลอย ให้มีความเหมาะสมยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการบำรุงรักษาได้ง่ายขึ้น และสามารถจัดวางชิ้นงานได้ง่าย โดยขณะนี้การสร้างและการประกอบชิ้นต้นแล้วเสร็จ และอยู่ในระหว่างการทดสอบการใช้งาน รวมทั้งจะเพิ่มขึ้นขั้นตอนการปรับปรุงส่วนต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูงขึ้น และเพิ่มการติดตั้งและพัฒนาระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ประกอบการทั่วไปสามารถใช้เครื่องได้ง่ายขึ้นด้วย ท้ายที่สุดแล้วจะได้เครื่องมือ ตลอดจนเทคนิคที่สามารถสร้างโอออน ที่ให้พลังงานที่ผลิตแล้ว ผ่านระบบการเร่งให้มีความเร็วสูง ที่มีปริมาณโอออนจำนวนมากพอที่จะวิ่งเข้าชนกับพลอย เพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงความสะอาดในเนื้อพลอย และการกำหนดสีของพลอยได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

- i) เพื่อศึกษาเรียนรู้ฟิสิกส์ของเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนขนาดเล็กที่มีกระแสลำไอออนสูง
- ii) เพื่อพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนแบบกะทัดรัดสำหรับงานพลอย
- iii) เพื่อศึกษาฟิสิกส์ของ particle-solid interaction โดยการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาค
- iv) เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ทางการวิเคราะห์ห้มลทินขนาดเล็ก (นาโน) ธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีพลอยด้วยเทคนิคลำไอออน
- v) เพื่อให้ได้เทคโนโลยีใหม่สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติเชิงแสงของพลอย สู่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศไทย
- vi) เพื่อผลิตผลงานวิจัยด้านอัญมณี ที่สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ และสามารถนำไปเผยแพร่สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องได้
- vii) เพื่อสร้างการเชื่อมโยงและความร่วมมือระหว่างนักวิจัยทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ
- viii) เพื่อนำไปผลิตผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติหรือการจดสิทธิบัตร

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- i) ได้พัฒนาเครื่องยิงลำไอออนต้นแบบสำหรับงานพลอย
- ii) ได้เทคนิคลำไอออน เพื่อเพิ่มมูลค่าพลอยคอรัันต์ธรรมชาติ ให้มีคุณสมบัติทางแสงที่ดีขึ้นตามความต้องการของตลาดพลอย เช่น มีสีเข้มขึ้น หรือ สีจางลง ลดมลทิน เพิ่มความใสสะอาด โปร่งแสง
- iii) ได้เทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ในการผลิตและการปรับปรุงคุณภาพพลอยตระกูลคอรัันต์ แข่งขันกับต่างประเทศ ที่หันมาพัฒนาเทคโนโลยีอื่นๆ มากกว่าการเผาด้วยความร้อน
- iv) เพื่อเป็นฐานข้อมูลด้านอัญมณี ซึ่งจะช่วยในการพัฒนาอุตสาหกรรมนี้ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ คาดว่าประโยชน์ที่จะได้รับจากโครงการวิจัย สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ เชิงสาธารณณะ หรือเชิงนโยบาย

- v) เป็นโครงการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาวัตถุดิบพลอยคอร์ันดัมด้วยคุณภาพ ราคาถูก ให้มีมูลค่าสูงขึ้น เพื่อช่วยขยายกำลังการผลิตให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ช่วยเพิ่มศักยภาพการแข่งขันกับต่างประเทศ
- vi) นำไปสู่การให้ประโยชน์แก่ภาคประชาชน ชุมชน ธุรกิจ ผู้ประกอบการค้าพลอย ตลอดจนผู้สนใจ ในการนำเทคโนโลยีล้ำไออนมาใช้กับการเพิ่มมูลค่าพลอยดิบในประเทศไทย
- vii) เป็นโครงการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะและการพัฒนาศักยภาพของเครื่องเร่งอนุภาคของ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อประยุกต์ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีในประเทศไทย
- viii) นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ โดยการสร้างศักยภาพการใช้ประโยชน์ทรัพยากรธรรมชาติอย่างคุ้มค่า สู่การพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศไทย
- ix) ผลิตผลงานวิจัยด้านอัญมณี ที่สามารถนำไปเผยแพร่เพื่อให้เป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมอัญมณีและยังสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับได้
- x) ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติสามารถสร้างการเชื่อมโยงและความร่วมมือระหว่างนักวิจัยทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลอยแซปไฟร์

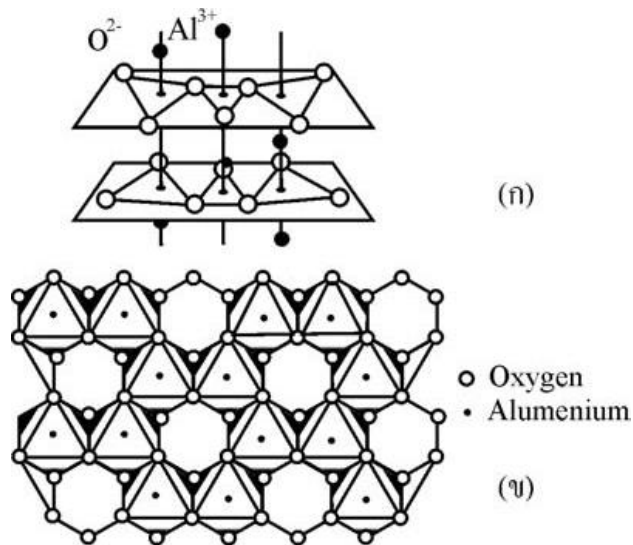
2.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของพลอยแซปไฟร์

พลอยในตระกูลคอรัันดัม (corundum) ที่เมื่อเป็นสีแดง จะมีชื่อเรียกในภาษาอังกฤษว่า “ruby” หรือ “ทับทิม” ในภาษาไทย และเมื่อเป็นสีอื่นๆ จะเรียกรวมๆ ในภาษาอังกฤษว่า “sapphire” ซึ่งในภาษาไทย จะมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามสีของแซปไฟร์ เช่น เมื่อเป็นสีน้ำเงิน (blue sapphire) จะเรียกว่า “ไพลิน” เมื่อเป็นสีเหลือง (yellow sapphire) จะเรียกว่า “บุษราคัม” เมื่อเป็นสีเขียว (green sapphire) จะเรียกว่าพลอยเขียว สำหรับพลอยสีเขียวในประเทศไทยจะมีลักษณะของสีเขียวที่มาจากทั้งสีน้ำเงินและสีเหลือง จึงเรียกว่า “เขียวส่อง” เป็นต้น พลอยในตระกูลคอรัันดัมหรือแร่คอรัันดัม มีสูตรทางเคมีคือ Al_2O_3 มีโครงสร้างผลึกแบบบรอมไบฮีดรอล (rhombohedral) ในระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) คอรัันดัมบริสุทธิ์จะไม่มีสี แต่ในธรรมชาติมีสารอื่นที่เป็นธาตุเจือปนอยู่ในปริมาณน้อย (ในหน่วย ppm) ทำให้มองเห็นเป็นสีต่างๆกัน [1] ส่วนประกอบของธาตุเจือปนน้อยแต่ละชนิดแตกต่างกันไป แล้วแต่แหล่งที่เกิดในธรรมชาติ รูปที่ 2-1 แสดงตัวอย่างพลอยทับทิมจากแหล่งโมกก ประเทศพม่า ที่พบอยู่ในหินหุ้มห่อ

คอรัันดัมเป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างผลึกแข็งแรง 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] โครงสร้างของคอรัันดัม แสดงดังในรูปที่ 2-2 [1]

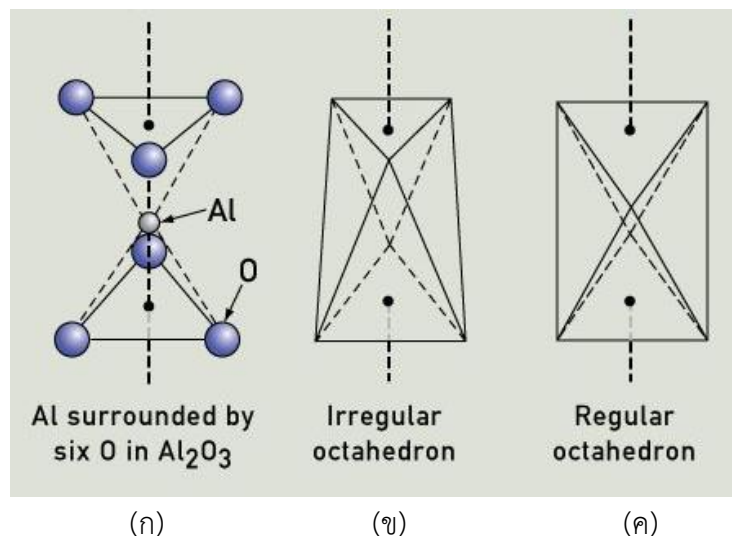


รูปที่ 2-1 พลอยทับทิมจากแหล่งโมกก ประเทศพม่า พบอยู่ในหินหุ้มห่อ (ภาพโดย เสวต อินทศิริ)



รูปที่ 2-2 ตำแหน่งของออกซิเจนและอลูมิเนียมไอออนในโครงสร้างของคอร์ันดัม (ก) มองด้านข้าง (ข) มองด้านบน [1]

เนื่องจากผลึก Al ถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออนสองลบ (O^{2-}) 6 ตำแหน่ง เมื่ออยู่ท่ามกลางไอออนลบ ประจุไฟฟ้าลบของไอออนทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นรอบ ๆ ไอออนของ Al ที่อยู่ตรงกลาง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าสนามผลึก (crystal field) และสามารถบ่งบอกลักษณะเฉพาะในรูปแบบจำนวนสมมาตร การบิดของโครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้า รวมทั้งความเข้มสนามไฟฟ้าสถิตย์ รูปที่ 2-3 (ก) แสดงถึงผลึกบริเวณที่มีอลูมิเนียมสามบวก (Al^{3+}) เพียงตำแหน่งเดียว และถูกปิดล้อมด้วยออกซิเจนไอออน 6 ตำแหน่ง รูปที่ 2-3 (ข) อลูมิเนียมสามบวกอยู่สูงหรือต่ำกว่าตำแหน่งปกติ คืออยู่ชิดด้านใดด้านหนึ่งของชั้นออกซิเจนไอออน ทำให้โครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้าบิดไป (distorted octahedron) รูปที่ 2-3 (ค) แสดงให้เห็นว่าอลูมิเนียมสามบวกอยู่ประมาณกึ่งกลาง ระหว่างชั้นออกซิเจนไอออน ทำให้เกิดโครงสร้างทรงเหลี่ยมแปดหน้าแบบสมมาตรปกติ (regular octahedron) ทั้ง 3 รูปยังคงสมมาตรแบบสามแกน (three fold symmetry)



รูปที่ 2-3 แสดงโครงสร้างของ O และ Al เมื่อฟอร์มเป็น octahedron structure [3]

คอรัลด์มได้รับการนิยามในการนำมาทำเป็นเครื่องประดับอย่างแพร่หลาย พลอยคอรัลด์ที่มีสีที่สวยงาม จะมีมูลค่าที่สูงมาก รวมถึงการที่มีความแข็งระดับ 9 ตามมาตรฐานของโมห์ ทำให้เป็นที่ต้องการของตลาดอัญมณีและเครื่องประดับอย่างมาก แต่พลอยคอรัลด์ที่พบในธรรมชาติที่มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นอัญมณีมีจำนวนไม่มาก พลอยที่ได้ส่วนใหญ่จึงต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อเพิ่มมูลค่า ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาคุณภาพของพลอยแต่ละเม็ด เพื่อที่จะทราบถึงคุณสมบัติ คุณค่า และราคา ของพลอยนั้นๆ โดยทั่วไปมีหลักเกณฑ์พื้นฐานในการพิจารณาคุณภาพของพลอย โดยใช้หลักเกณฑ์เรียกว่า 4 C ดังนี้

○ สี (Color)

เป็นองค์ประกอบสำคัญอันดับแรก ในการพิจารณาประเมินคุณภาพของพลอย ซึ่งมีรายละเอียดที่จะต้องพิจารณาหลายประการ เช่น รสนิยมแต่ละบุคคล แต่ละยุคสมัย แต่ละชนชาติ ความสามารถส่วนบุคคลในการมองสีต่างๆ เป็นต้น โดยถือเอาสีของตัวพลอย ความมืด-สว่าง และความเข้มของสีพลอย เป็นสำคัญ

○ ความใสไร้มลทิน (Clarity)

เป็นองค์ประกอบสำคัญอันดับหนึ่งในการพิจารณาประเมินคุณภาพของพลอย ซึ่งมีรายละเอียดที่จะต้องพิจารณาหลายประการ เช่น ตำแหน่งภายนอก มลทินภายใน ซึ่งมลทินภายในนั้น จะต้องพิจารณาเป็นกรณีพิเศษเกี่ยวกับจำนวน ความมากน้อย ขนาด ที่ตั้ง และชนิดของมลทินเหล่านั้น พลอยที่สะอาดใสไร้มลทิน หาได้ยาก

○ การเจียรไน (Cutting)

เป็นการพิจารณาถึง รูปร่าง แบบ สัดส่วน และฝีมือของการเจียรไน การเจียรไนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ ช่วยเพิ่มความงามของสี ความใส ประกายของพลอยให้มากยิ่งขึ้น

○ น้ำหนัก (Carat weight)

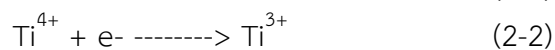
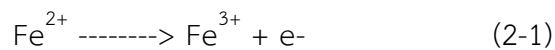
น้ำหนักมาตรฐานในการซื้อขายพลอย มีหน่วยเป็น กะรัต (Carat) 1 กะรัตมีน้ำหนักเท่ากับ 0.200 กรัม และใน 1 กะรัต ยังถูกแบ่งย่อยออกได้เป็น 100 หรือสตางค์ ดังนั้น 1 จุด หรือ 1 สตางค์ จะมีน้ำหนักเท่ากับ 0.002 กรัม โดยทั่วไปพลอยที่มีขนาดใหญ่จะหายาก ทำให้ราคาต่อกะรัตสูงขึ้น

2.1.2 การเกิดสีของแซปไฟร์

คอรัลด์ม เป็นพลอยชนิดอัลโลโครเมติก (Allochomatic) ซึ่งก็คือสีของพลอยที่เกิดขึ้น ไม่ได้เกิดมาจากธาตุหลัก แต่เกิดจากธาตุเจือ (trace element) ที่ไม่จำเป็นต่อโครงสร้างทางเคมีของพลอยนั้น [4] การเกิดสีจึงพิจารณาจากธาตุเจือ [3] เช่น ธาตุโลหะจากโครเมียมในรูป Cr^{3+} ปริมาณหนึ่งซึ่งน้อยมาก มีปนอยู่ในโครงสร้างของ Al_2O_3 เมื่อเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมในรูป Al^{3+} ในโครงสร้างผลึก ทำให้คอรัลด์มมีสีแดง ซึ่งก็คือพลอยทับทิมนั่นเอง ความเข้มของสี (intense) จึงอาจเทียบได้กับปริมาณของธาตุโครเมียมว่า สามารถเข้าไปแทนที่อลูมิเนียมได้มากน้อยเพียงไร ส่วนธาตุที่ทำให้เกิดสีน้ำเงิน ได้แก่ เหล็ก (Fe) และ ไทเทเนียม (Ti) เมื่อไทเทเนียมและเหล็กรวมกันในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ได้สีน้ำเงินเข้มที่งดงาม ธาตุอื่นนอกจากเหล็กและไทเทเนียม จะทำให้พลอยมีสีเพี้ยนออกไปจากสีน้ำเงินหรือฟ้า สีน้ำเงินจะเข้มสดนั้น ไม่ได้ขึ้นกับปริมาณของธาตุเหล็กและไทเทเนียมเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับประจุไฟฟ้า (valance state) ของธาตุทั้งสองด้วย กระบวนการที่ทำให้เกิดสีในแซปไฟร์สีน้ำเงินนั้น เกิดจากธาตุอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยธาตุเหล็กและไทเทเนียม โดยธาตุเหล็กอาจจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัส (Fe^{2+} - ferrous) หรือ เฟอร์ริก (Fe^{3+} - ferric) ส่วนธาตุไทเทเนียมอาจจะอยู่ในรูปของไทเทเนอัส (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)

ผลึกของคอร์ันดัมมีไทเทเนียมในเปอร์เซนต์ที่น้อยมากทำให้ไม่มีสี แต่เมื่อเกิดการถ่ายเทประจุ (charge transfer) กลไกลักษณะนี้ทำให้เกิดสีน้ำเงินในแซปไฟร์ นั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนชั้น 3d โดยการดูดกลืนพลังงานแสง เกิดการ displacement จากไอออนของเหล็กไปยังไทเทเนียม เกิดการถ่ายเทของประจุชั้น 3d เป็นการชั่วคราว สีเข้มหรือดำเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของเหล็กออกไซด์ เช่น แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เป็นตัวที่ทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุได้ การถ่ายเทของประจุเกิดขึ้นใน Ligand field สามารถทำให้เกิดสี หรือแม้แต่อิเล็กตรอนไร้คู่ ก็เป็นสาเหตุให้เกิดสี โดยกลไกการเปลี่ยนแปลง d-d และ f-f transition ตัวอย่างเช่น การเกิดสีน้ำเงินในพลอยแดง ซึ่งจะทำให้พลอยเป็นสีแดงอมม่วง เกิดจากเหล็กและไทเทเนียม เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของอลูมิเนียมในโครงสร้าง Al_2O_3 ทำให้ Octahedron บิดเบี้ยวไป ดังรูปที่ 3 (ข) 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 และมีการเคลื่อนที่กันระหว่าง dz^2 ออบิตอล ทำให้อิเล็กตรอนผ่านจากไอออนหนึ่งไปอีกไอออนหนึ่งได้ โดย Fe^{2+} อิเล็กตรอนหายไป 1 ตัว กลายเป็น Fe^{3+} และ Ti^{4+} ได้รับอิเล็กตรอนมากกลายเป็น Ti^{3+} ดังสมการ (2-1) ถึง (2-3) [3]



นอกจากกระบวนการดังกล่าวนี้ ยังมีกระบวนการอื่นๆที่ทำให้เกิดสีน้ำเงินของแซปไฟร์ ได้แก่ กระบวนการ $Fe^{3+} - O - Fe^{3+}$ และ Fe^{3+} pair ($Fe^{3+} - O - Fe^{3+}$) สาเหตุการเกิดสีในกรณีนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีธาตุเหล็กมาก แต่ไทเทเนียมมีน้อยมากหรือไม่มีเลย กรณีนี้สีน้ำเงินที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับจำนวนของ valance state ของธาตุเหล็ก ความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของอะตอม Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่จะเปลี่ยนพลังงานให้เป็นสี ยังมีพลังงานสูงเท่าไร สีของแซปไฟร์สีน้ำเงินก็จะเข้มขึ้นเท่านั้น และหากมีกระบวนการ $Fe^{2+} - O - Ti^{4+}$ IVCT เกิดขึ้นร่วมด้วย จะทำให้น้ำเงินเข้มขึ้นอีก ความสัมพันธ์ระหว่างสีกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสีในคอร์ันดัมแสดงดังตารางที่ 2-1 [3]

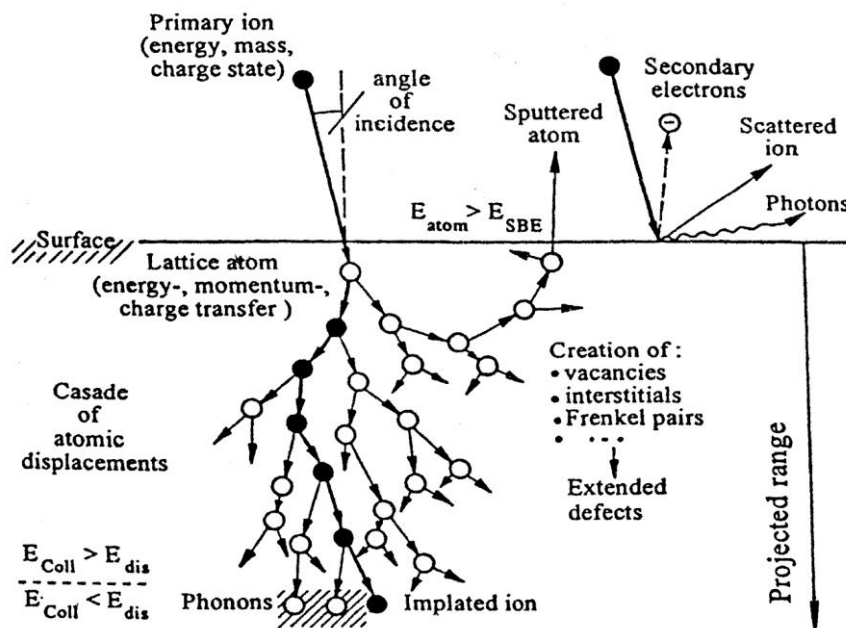
ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างสีของคอร์ันดัมกับกระบวนการที่ทำให้เกิดสี [3]

สีที่ปรากฏ	กระบวนการที่ทำให้เกิดสี
แดง	Cr^{3+} แทนที่ Al^{3+} ในคอร์ันดัม
น้ำเงิน	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $Fe^{2+} - O - Fe^{4+}$ IVCT process บางครั้งอาจเกิดประกอบกับ $Fe^{2+} - O - Fe^{3+}$ และ Cr^{3+} ก่อให้เกิดสีน้ำเงินอ่อนและน้ำเงินอมม่วง ➤ Fe^{2+} / Fe^{3+} pairs
น้ำเงิน - ม่วง	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $Fe^{2+} - O - Ti^{4+}$ IVCT process และ Cr^{3+} ➤ Fe^{2+} / Fe^{3+} pairs (หรือ Fe^{3+}) และ Cr^{3+}

2.2 เทคโนโลยีลำไอออน

2.2.1 เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน

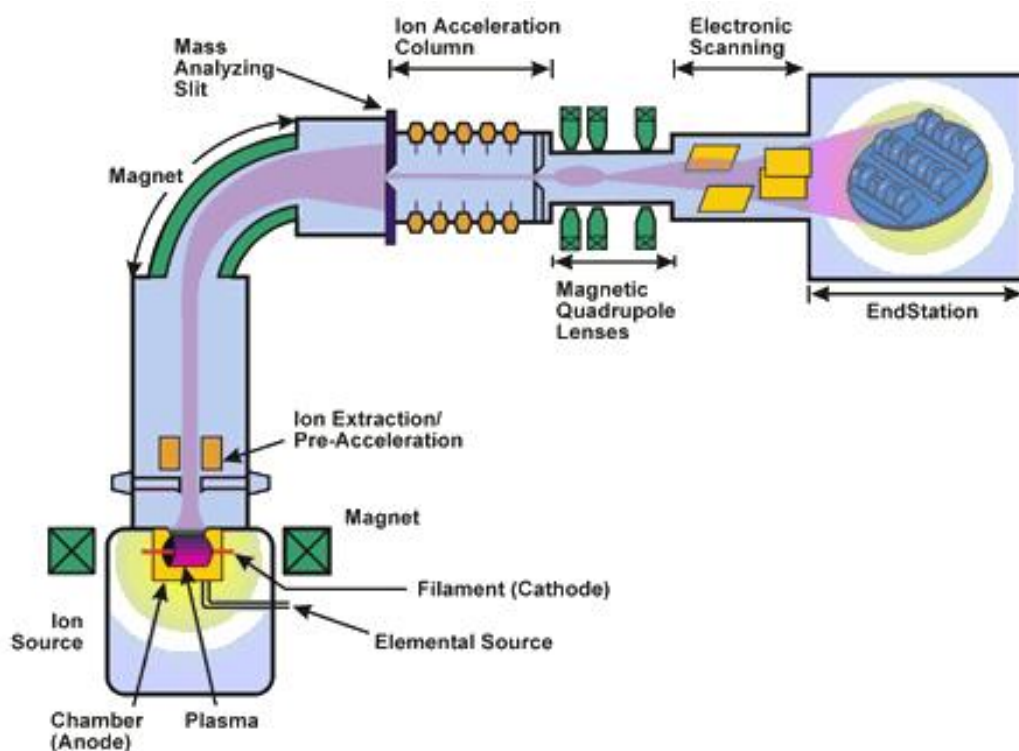
Townsend และคณะ [5] นิยามการฝังไอออน (ion implantation) ว่าเป็นการเร่งไอออนให้มีพลังงานสูงแล้วไปชนกับเป้าที่ต้องการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ โดยไอออนจะเข้าไปทำอันตรกิริยาต่างๆกับอะตอมของเป้า ทำให้คุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์เดิมของเป้าเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น ทำให้ผิวของวัสดุแข็งขึ้น ลดการกัดกร่อน ลดแรงเสียดทาน และเปลี่ยนคุณสมบัติทางแสง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากการฝังไอออนนี้ จะเป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างของวัสดุนั้น จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ไม่สามารถย้อนกลับมาสภาพเดิมได้อีก ทั้งนี้ไอออนที่มีพลังงานสูงนี้ เมื่อถูกฝังเข้าไปในวัสดุ จะถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุ ทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ตำแหน่งนั้นจึงเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมดังกล่าวอาจจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) จนเกิดเป็น defect ในบางตำแหน่ง แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะค่อยๆสูญเสียพลังงาน และจะหยุดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แล้วอาจเกิดการรวมตัวกับโครงสร้างเดิม กลายเป็นโมเลกุลใหม่ ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ ตามทฤษฎีแล้ว ไอออนสามารถสร้างได้จากแทบทุกธาตุในตารางธาตุ ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะสร้างวัสดุใหม่ๆ ที่ไม่เคยมีในธรรมชาติได้ รูปที่ 2-4 แสดงกลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน



รูปที่ 2-4 กลไกที่เกิดขึ้นภายใต้กระบวนการไอออนอิมพลานเตชัน [5]

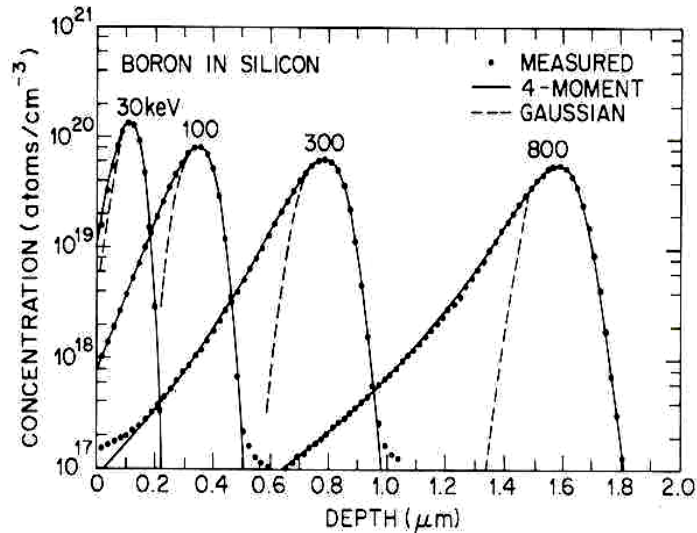
เครื่องเร่งลำไอออน หรือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออน ที่ซึ่งไอออนของธาตุที่ต้องการได้ถูกสร้างขึ้น ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำบีม โดยทั่วไปถัดจากนี้มักจะมีส่วนกรองไอออน ที่ซึ่งลำบีมจะถูกคัดเลือกด้วยสนามแม่เหล็ก ให้เหลือเฉพาะไอออนชนิดที่ต้องการผ่านต่อไปได้ หลังจากนั้นจึงถึงส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มี

พลังงานสูงขึ้น และส่วนห้องเป่า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ในกรณีที่ลำป้อมมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ที่ต้องการฝังไอออน จำเป็นต้องมีส่วนกวาดลำป้อม ที่ซึ่งลำป้อมถูกบังคับให้กระจายอย่างสม่ำเสมอไปบนเนื้อวัสดุ ท้ายที่สุด จะมีส่วนฟาราเดย์คัพ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุ เมื่อได้ปริมาณที่ ต้องการก็จะหยุดการทำงาน จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นต่อเวลา เรียกว่า “กระแสไอออน” และปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุจะเรียกว่า “โดส” ซึ่งก็คือ ผลคูณระหว่างกระแสไอออนกับเวลาต่อพื้นที่ของการฝังไอออน เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์โดยทั่วไปมักสร้างไอออนได้ในปริมาณที่น้อย (ในหน่วยไมโครแอมแปร์) ดังนั้น การฝังไอออนจึงทำได้ในปริมาณโดสต่ำๆ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ในปริมาณน้อยๆ เท่านั้น เครื่องเร่งลำไอออนโดยทั่วไปแสดงดังในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 ลักษณะองค์ประกอบทั่วไปของเครื่องเร่งลำไอออน หรือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ [6]

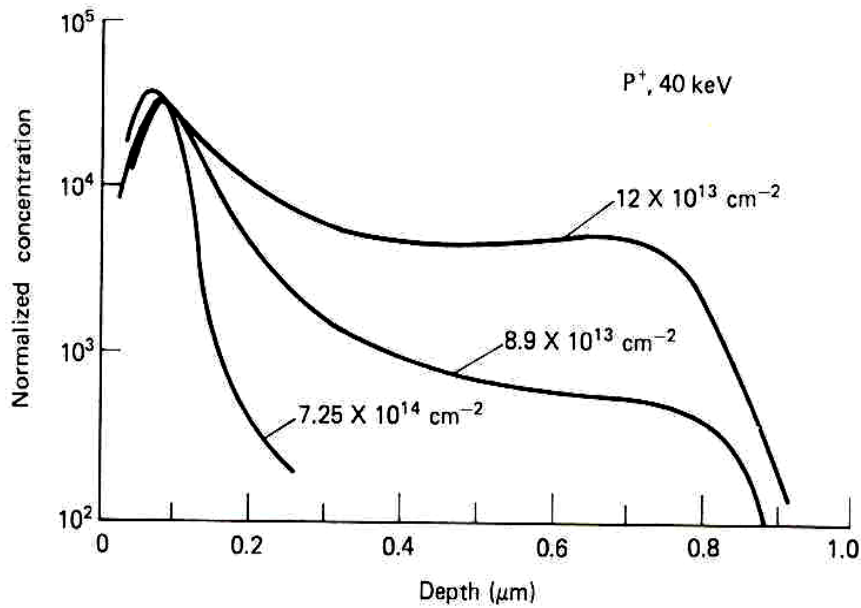
พลังงานของไอออนที่สร้างได้จากเครื่องเร่งลำไอออนทั่วไป อยู่ระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ พลังงานต่ำกว่านั้น มักไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้าง แต่จะเหมาะสำหรับการใช้สร้างฟิล์ม พลังงานที่สูงกว่านั้น มักไม่ได้รับความนิยม เนื่องจากก่อให้เกิดการชำรุดของโครงสร้างผลึกของวัสดุเฉพาะจุด แต่โครงสร้างโดยรวมไม่เปลี่ยนแปลง ไอออนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง จะกระจายเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุที่ความลึกค่าต่างๆ ความลึกเฉลี่ยจะเรียกว่า “พิสัย” โดยที่จะขึ้นกับชนิดและพลังงานของไอออน และองค์ประกอบเชิงเคมีของวัสดุเอง โดยทั่วไปแล้วไอออนที่มีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีพิสัยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการประยุกต์ในงานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงเชิงผิวของวัสดุ ตัวอย่างการคำนวณค่าพิสัยของการฝังไอออนแสดงดังในรูปที่ 2-6



รูปที่ 2-6 ความลึกของการฝังไอออนโบรอนในเนื้อซิลิกอนที่ไอออนพลังงานค่าต่างๆ [5]

เมื่อลำไอออนพุ่งเข้าชนผลึกของเป่า (crystal structure) อาจทำให้ระบบผลึกชำรุดได้ ตัวอย่างเช่น ไอออนพุ่งเข้าชนอะตอมในผลึกด้วยพลังงานที่มากพอ จะทำให้อะตอมหลุดออกจากผลึก ตำแหน่งนั้นจึงเกิดเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมที่หลุดออกมา มักมีพลังงานมากพอที่จะพุ่งเข้าชน และถ่ายเทพลังงานให้อะตอมอื่นๆ ต่อไปได้เรื่อยๆ จนกว่าพลังงานจะหมด เกิดเป็นช่องว่างเพิ่มเติมได้มากมาย อะตอมที่หลุดออกมานี้ จะไปอยู่ที่ตำแหน่งไม่ปกติ (interstitial) ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ ในบางกรณีสามารถซ่อมแซมให้กลับคืนมาได้ด้วยการอบที่อุณหภูมิต่ำ (anneal) เมื่ออะตอมที่หลุดออกจากผลึกได้รับอุณหภูมิต่ำหนึ่ง จะเกิดการเคลื่อนไหว และอาจกลับเข้าสู่ตำแหน่งปกติได้ เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันจึงมักทำควบคู่ไปกับการอบอ่อน นอกจากนั้นไอออนอิมพลานเตชัน สามารถทำให้อะตอมที่อยู่ใกล้ผิวของวัสดุหลุดออกมาได้ ซึ่งเรียกว่าการเกิดสปัตเตอร์ริง ไอออนอิมพลานเตชันที่โดสสูงๆ จึงมักทำให้ผิวหน้าของวัสดุค่อยๆ หลุดออกไป อย่างไรก็ตาม อาจจะมีวิธีที่ช่วยกำจัดคราบสกปรกออกไปจากผิววัสดุได้ด้วย ในกรณีที่วัสดุเป็นผลึกที่สมบูรณ์ ไอออนที่พุ่งเข้าไปในวัสดุในทิศทางที่แตกต่างกัน ย่อมมีโอกาสที่จะชนกับอะตอมของวัสดุแตกต่างกัน ในบางทิศทาง เช่น ขนานกับแนวแกนผลึก ไอออนสามารถวิ่งเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ลึกกว่าปกติ เรียกว่าการเกิดขานลิ่ง โดยที่ความลึกของการเดินทางของไอออนในแนวนี้ ไม่ได้เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น การควบคุมจึงทำได้ยากกว่าปกติ ดังแสดงในรูปที่ 2-7

เทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมีการใช้ในงานเชิงอุตสาหกรรมมานานแล้ว โดยเป็นเทคนิคหลักในการโด๊ปสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นการฝังไอออนในปริมาณน้อยๆ เท่านั้น ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณเฉพาะที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วย การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้าง จึงกลมกลืนกับเนื้อวัสดุเดิมมาก นอกจากนั้น เทคนิคนี้ยังไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับพอลอย โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดอินคลูชัน เช่น ของแข็งจากธาตุชนิดอื่น ของเหลว หรือ ก๊าซ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการนำเทคนิคนี้มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพคอร์รันดัม *Intarasiri และคณะ* [7] ได้รายงานเป็นครั้งแรกว่า มีความเป็นไปได้ในการนำเทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงแสงของพอลอยคอร์รันดัมได้



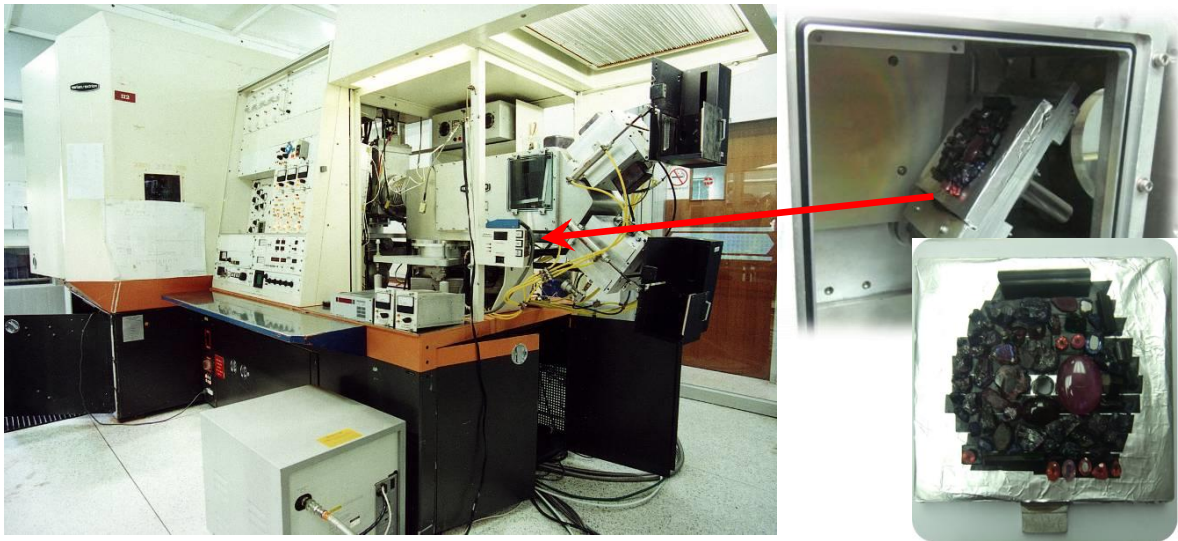
รูปที่ 2-7 ความลึกของการฝังไอออนในแนวแกนลิ่งจะไม่แน่นอน แต่จะขึ้นกับจำนวนโดสด้วย ในรูปเป็นการฝังไอออนฟอสฟอรัสพลังงาน 40 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในซิลิกอน [5]

2.2.2 การพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ในประเทศไทย

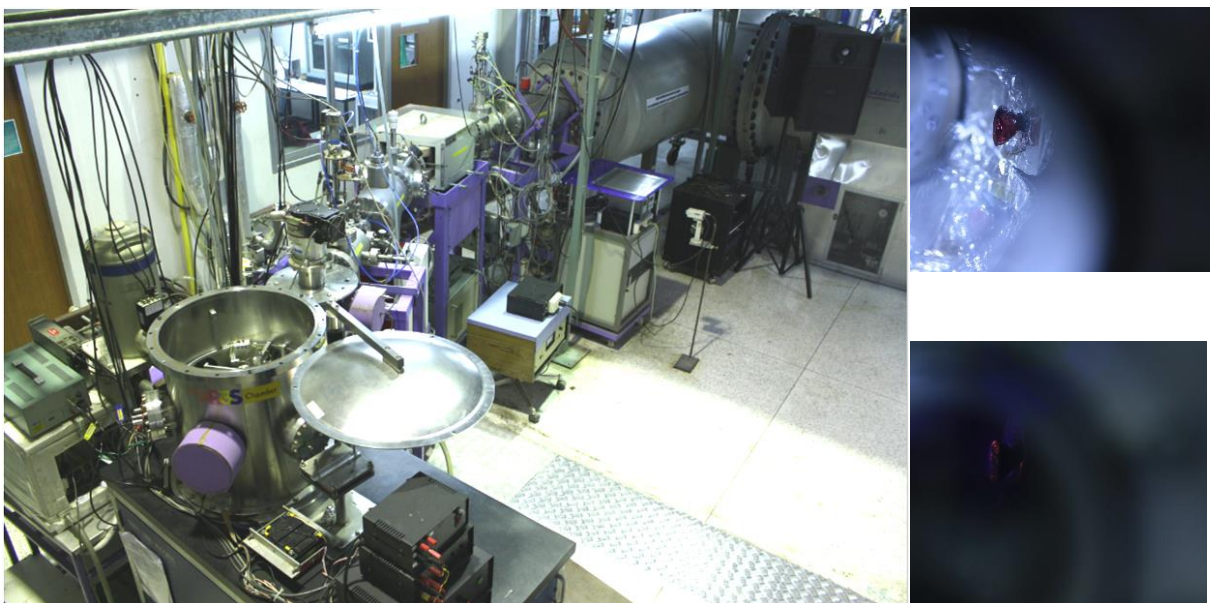
ในระยะแรกการพัฒนาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ มีจุดประสงค์เพื่อการเจือ (dope) สารกึ่งตัวนำในปริมาณเล็กน้อย โดยต้องการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงไฟฟ้า [8] เช่น สภาพการนำไฟฟ้า (conductivity) โดยพบว่าไอออนอิมพลานเตอร์สามารถควบคุมปริมาณ และการกระจายตัว (profile) ของสารเจือ (impurity) ได้ดีกว่าการทำ diffusion doping นอกจากนี้ยังสามารถฝังสารเจือต่างชนิดกันลงบน substrate เดียวกันโดยที่ไม่มีการรบกวนการกระจายตัวของกันและกันได้อีกด้วย สมบัติเชิงกลที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยกระบวนการไอออนอิมพลานเตอร์ ได้แก่ การสึกหรอ (wear) ความฝืด (friction) ความแข็ง (hardness) การสึกกร่อน (abrasion) และการเป็นสนิม (corrosion) ซึ่งมีการศึกษากันอย่างแพร่หลาย ในวัสดุที่เป็นโลหะ [9,10] โดยทั่วไปพบว่าสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ผ่านการไอออนอิมพลานเตอร์จะดีขึ้นกว่าเดิม ซึ่งต่างกับสมบัติเชิงเคมี ได้แก่ ความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) และ passivation ที่อาจจะเปลี่ยนแปลงไปในทางลบได้ ไอออนอิมพลานเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสง (optical absorption) ดัชนีหักเห (refractive index) และสีของวัสดุได้ด้วย Saito และคณะ (1991) [11] ได้อิมพลานต์ไอออน Co^+ ด้วยโดส $5 \times 10^{16} - 5 \times 10^{17}$ ไอออน/ซม² ที่พลังงาน 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ลงบนไพลีนสังเคราะห์ (synthetic sapphire) ซึ่งไม่มีสี หลังจากนั้นนำไป anneal ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ไพลีนจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว และถ้า anneal ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ไพลีนสีน้ำเงินอ่อน

สำหรับในประเทศไทย ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ชื่อเดิมศูนย์วิจัยนิวตรอนพลังงานสูง ได้สร้างเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์จากก๊าซเครื่องแรก [12] โดยความช่วยเหลือจากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) เมื่อประมาณ 20 ปีมาแล้ว ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ในงานวิจัยพื้นฐาน ทางด้านอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัสดุแข็ง และเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงานอุตสาหกรรม [13] เป็นที่ใช้ทดลองอิมพลานต์ไอออนของไนโตรเจนบนผิวของชิ้นส่วนอุตสาหกรรม

อาทิ ดอกกัทเกลียว ตัวดอก เป็นต้น ซึ่งทั้งสองเครื่องนี้ได้ถูกรื้อถอนแล้วหลังหมดอายุการใช้งาน รวมทั้งเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ของบริษัท Varian ซึ่งเคยใช้ในอุตสาหกรรมการเจาะสารกึ่งตัวนำ ที่ได้รับบริจาคจาก IAEA (รูปที่ 2-8) นอกจากนี้ ยังมีเครื่องเร่งลำอนุภาคขนาด 1.7 เมกาโวลต์ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์และปรับปรุงคุณภาพวัสดุอีกด้วย (รูปที่ 2-9) ซึ่งเครื่องมือเหล่านี้ คณาจารย์และนักวิจัยของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้นำมาดัดแปลงเพื่อใช้ในการวิจัยที่สอดคล้องกับความต้องการของประเทศอย่างต่อเนื่อง อาทิ การปรับปรุงพื้นผิวโลหะ (surface modification) โดยการเคลือบฝังไอออนลงบนโลหะเพื่อเพิ่มความแข็ง (hardness) [14, 15] การชักนำการกลายพันธุ์ของพืชด้วยลำไอออนโดยเฉพาะข้าวหอมมะลิไทย [16, 17] และงานปรับปรุงคุณภาพพลอยดังกล่าวมาแล้ว [7, 18]



รูปที่ 2-8 เครื่องแวนไอออนอิมพลานเตอร์ ศักย์ไฟฟ้าเร่ง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่รูปด้านขวาแสดงตัวยัดจับพลอย



รูปที่ 2-9 เครื่องเร่งอนุภาคแทนเต็มขนาดศักย์ไฟฟ้าเร่ง 1.7 เมกาอิเล็กตรอนโวลต์ โดยที่รูปด้านขวาแสดงการติดตั้งพลอย และการเรืองแสงของพลอยเมื่อถูกยิงด้วยไอออน

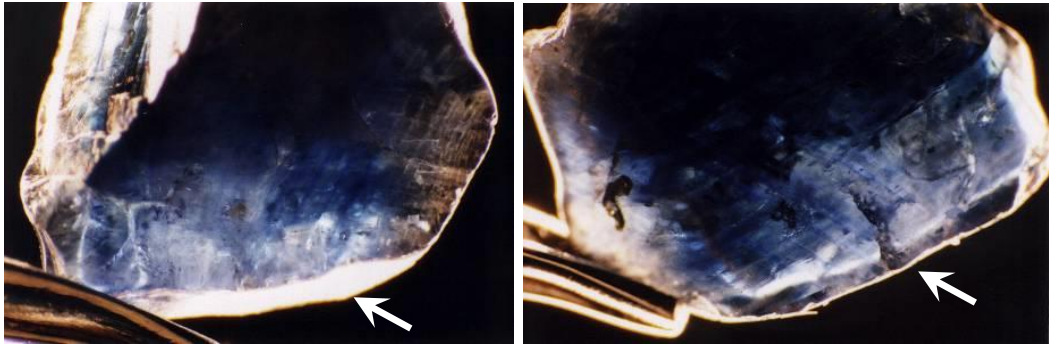
2.3 การประยุกต์ไอออนอิมพลานเตชันสำหรับงานพลอย

คณะผู้วิจัย ได้เริ่มทดลองนำเทคนิคไอออนอิมพลานเตชันมาใช้กับพลอยคอร์ันดัมหลายชนิด [7] ตัวอย่างพลอยที่นำมาศึกษามีทั้งพลอยสด และพลอยเผาที่ผ่านการเจียรระไนแล้ว ขนาดมีตั้งแต่ 0.5 – 3 เซนติเมตร ศึกษาสมบัติเบื้องต้นของพลอย โดยการตรวจสอบสีด้วยชุดเปรียบเทียบสีคอร์ันดัมมาตรฐานของ GIA (Gemological Institute of America) หลังจากนั้น จึงนำมาตรวจสอบลักษณะภายใน ด้วยกล้องไมโครสโคป เช่น มลทินจากแร่เหล็กสีดำคล้ำ เส้นไหมสีขาว เฟส แถบสี (color zoning) สารเจือ แล้วจึงศึกษาพลอยด้วยเทคนิค Particle Induce X-ray Emission (PIXE) เพื่อเก็บข้อมูลของแหล่งกำเนิด ความแตกต่างของธาตุมลทินแบบต่างๆ ที่มีผลต่อสีดำคล้ำและการขุ่นมัวในเนื้อพลอยที่มาจากออกไซด์ของโลหะต่างๆ เช่น จุดสีดำ (Fe_2O_3) สีขาว (TiO_2) และปริมาณธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเกิดสีภายในโครงสร้างผลึกพลอย คือ Fe, Cr, Ti, Al, V ต่อมาใช้เทคนิค Ionoluminescence (IL) เพื่อวิเคราะห์สมบัติการเปล่งแสงของพลอย จากนั้นจึงแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามลักษณะภายในที่พบ บันทึกภาพ และทำการไอออนอิมพลานเตชันต่อไป ในการทำไอออนอิมพลานเตชัน ได้ใช้ไอออนของอาร์กอน ออกซิเจน และไนโตรเจน โดยใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประกอบด้วยเครื่องแวเรียนไอออนอิมพลานเตอร์ และเครื่องเร่งอนุภาคแทนเด็มส่วนพลังงานต่ำ ก่อนและหลังไอออนอิมพลานเตชัน ได้บันทึกภาพไว้เปรียบเทียบ ด้วยกล้องถ่ายภาพไมโครสโคปสำหรับพลอย ของบริษัท Zeiss ประเทศเยอรมนี

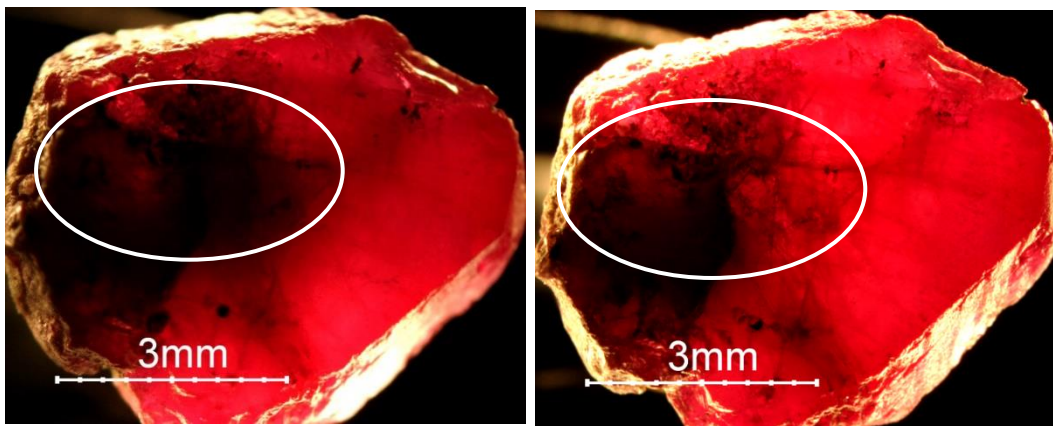
ตามที่กล่าวข้างต้น เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน มักนำมาใช้ในการฝังอนุภาคเข้าไปในเนื้อวัสดุ เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุ ให้มีสมบัติผสมระหว่างเนื้อวัสดุเดิมและไอออนที่ฝังเข้าไป อย่างไรก็ตาม พลังงานของไอออนที่สูงมากนี้ มักก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลภาค ไอออนอิมพลานเตชันยังมีส่วนช่วยในการขัดผิวให้กับชิ้นตัวอย่าง ในกรณีของพลอยก็เช่นเดียวกัน [7] ผิวของพลอยถูกขัด ทำให้พลอยสดใสและแวววาวขึ้น (รูปที่ 2-10) และเมื่อทดลองกับพลอยแอฟริกาที่เป็นแซปไฟร์สีน้ำเงินสีเข้มทึบแสง หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจน พบว่า ผลจากพลังงานของไอออนทำให้มีการสลายของมลทินที่เป็นเส้นเข็มสีขาวทั่วทั้งก้อนผลึกหายไป ได้พลอยที่มีสีขาว ใสสะอาด และโปร่งแสงขึ้น (รูปที่ 2-11) ในกรณีของทับทิมก็เช่นเดียวกัน ไอออนอิมพลานเตชัน สามารถสลายไมโครอินคลูชันในพลอยทับทิมได้ (รูปที่ 2-12)



รูปที่ 2-10 แซปไฟร์สีน้ำเงินอ่อนหลังไอออนอิมพลานเตชันที่โดสค่าต่าง ๆ มีความโปร่งใสเพิ่มมากขึ้นตามค่าโดสที่เพิ่มขึ้น (จากขวาไปซ้าย) เมื่อเปรียบเทียบกับไม่ได้ไอออนอิมพลานเตชัน (เม็ดขวาสุด)

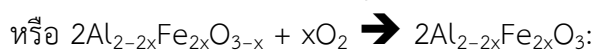
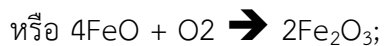
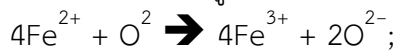


รูปที่ 2-11 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินเข้ม ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ทำไอออนอิมพลานเตชัน



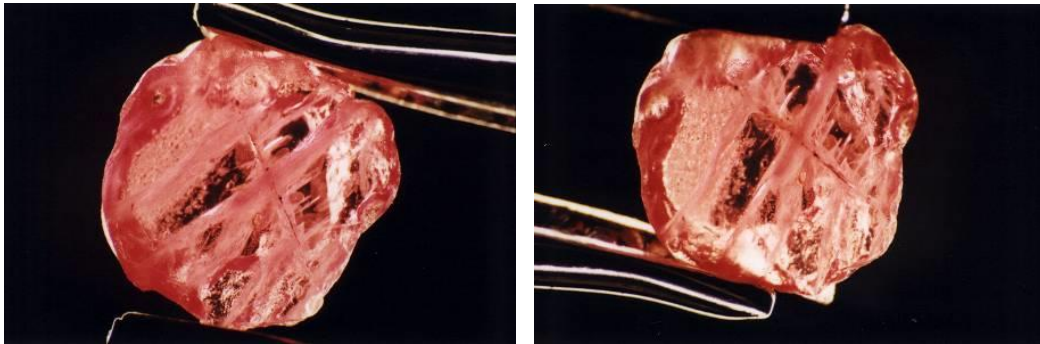
รูปที่ 2-12 เปรียบเทียบทับทิมก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) ยิงด้วยไอออน แสดงให้เห็นการลดลงของ microinclusion ในเนื้อพลอยหลังยิงด้วยไอออน

เป็นที่ทราบดีว่าคอร์รันดัม เป็นพลอยชนิดที่เรียกว่า “Allochromatic” ซึ่งการเกิดสีเนื่องมาจากธาตุเจือที่อยู่ในพลอย [19] ผลของไอออนที่มีต่อการเปลี่ยนสีของคอร์รันดัมนั้นมีหลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของมลทิน (impurity) ซึ่งเป็นกลุ่มโมเลกุลที่ให้สี การแลกเปลี่ยนประจุ (charge transfer) การเกิด color center และการเกิด defect ในเนื้อพลอย [20] ซึ่งในงานวิจัยของคณะผู้วิจัย พบว่า [7] ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงอมม่วง ที่เกิดจากโครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งให้สีแดง และเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ซึ่งให้สีน้ำเงิน หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจน พบว่า สีน้ำเงินเจือจางลง หรือหายไป ทำให้ได้ทับทิมสีแดงสด (รูปที่ 2-13) โดยคาดว่าเกิดการ oxidation ในพลอย ตัวอย่างเช่น [21]

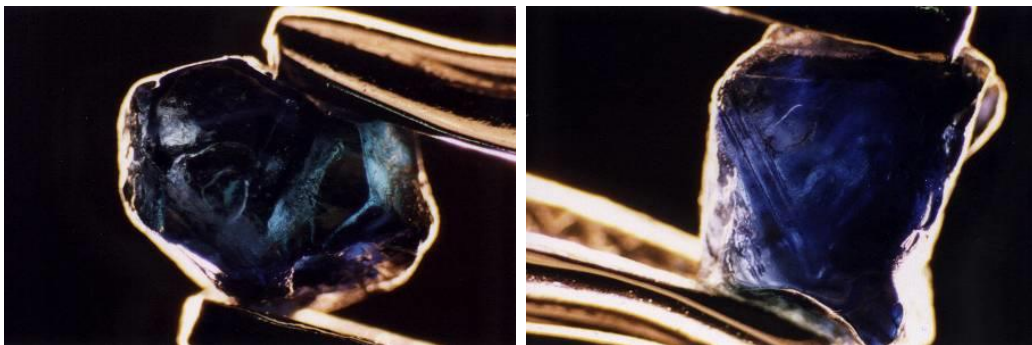


ส่วนแซปไฟร์สีน้ำเงิน (blue sapphire) ที่มีสีน้ำเงินอมเขียว จากเฟอร์ริก (Fe^{3+}) หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยไนโตรเจน พบว่า [7] ทำให้มีสีน้ำเงินเข้มขึ้น สีเขียวเจือจางลงเกือบหายไป ผลจากสารประกอบรูไทล์ (TiO_2) เมื่อได้รับการกระตุ้นจะสลายตัวเข้าไปในโครงสร้างของพลอย และทำให้ Ti^{4+} เกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับ Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ intervalence charge transfer [22] ทำให้เกิดสีน้ำเงิน (รูปที่ 2-14) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ เป็นผลมาจากการเกิด reduction ในพลอย

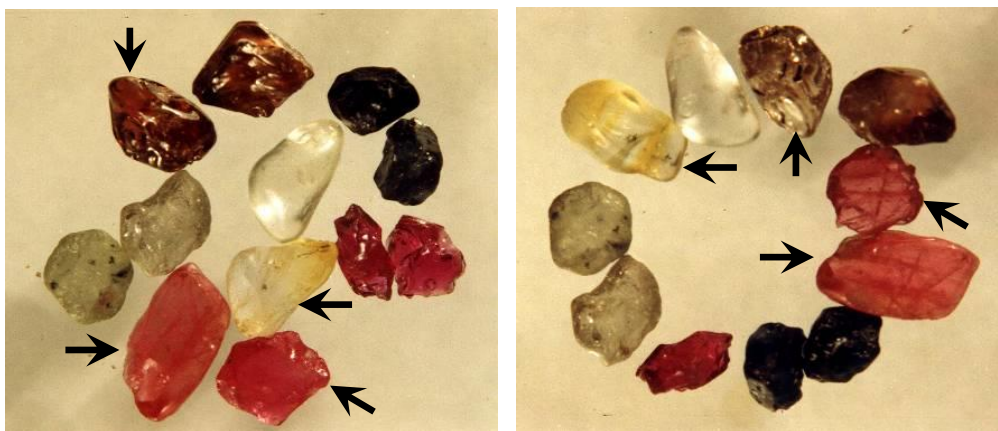
สำหรับแซปไฟร์สีเหลือง หรือ บุษราคัม (yellow sapphire) ที่สีอ่อนค่อนข้างมาก หรือที่มีสีเหลืองกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ หลังไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจน พบว่า [7] ทำให้บุษราคัมมีการโปร่งแสงขึ้น และสีเหลืองมีการไปรวมกันเข้มและสดขึ้นในบางบริเวณจนเป็นกลุ่ม (รูปที่ 2-15) ผลที่เกิดขึ้นในบุษราคัมนี้แสดงให้เห็นว่ามีการเคลื่อนที่ของกลุ่มธาตุที่ให้สีเมื่อถูกยิงด้วยไอออนพลังงานสูง นอกจากนั้น ไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจน ยังทำให้พลอยเนื้ออ่อนประเภทเซอร์คอนสีน้ำตาลมีสีอ่อนลงด้วย (รูปที่ 2-15)



รูปที่ 2-13 เปรียบเทียบทับทิมธรรมชาติ ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ทำไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นว่าพลอยมีสีแดงสดขึ้น [7]



รูปที่ 2-14 เปรียบเทียบแซปไฟร์สีน้ำเงินอมเขียว ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ทำไอออนอิมพลานเตชัน จะเห็นว่าสีเขียวหายไปกลายเป็นสีน้ำเงินสด [7]



รูปที่ 2-15 กลุ่มพลอยสีต่าง ๆ ก่อน (ซ้าย) และ หลัง (ขวา) ทำไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจน จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มของสีในพลอยเกือบทุกเม็ด นอกจากนั้น ยังทำให้พลอยโปร่งใสมากขึ้น [7]

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ

วัสดุที่นำมาใช้ในการทดลองเพื่อตรวจสอบการทำงานของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่ เป็นพลอยแซปไฟร์สีขาวขุ่นจากประเทศศรีลังกา โดยเป็นการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการยิงด้วยลำไอออนที่อุณหภูมิสูง และอุณหภูมิต่ำ และทดสอบการวัดการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงที่ติดตั้งขึ้นใหม่

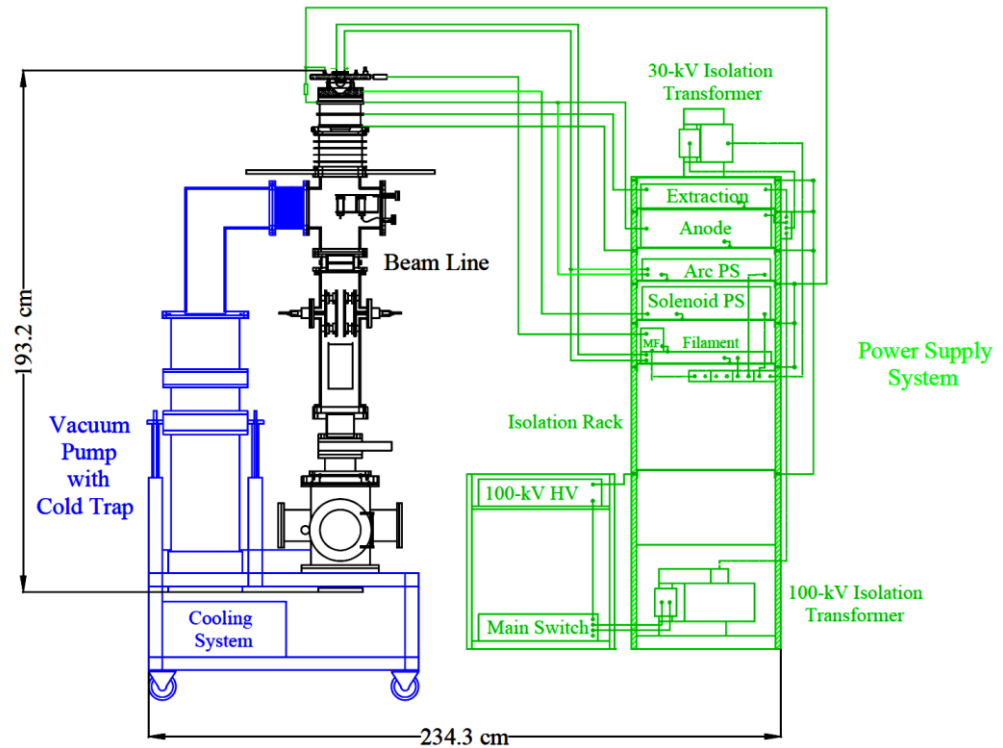
3.2 อุปกรณ์

3.2.1 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

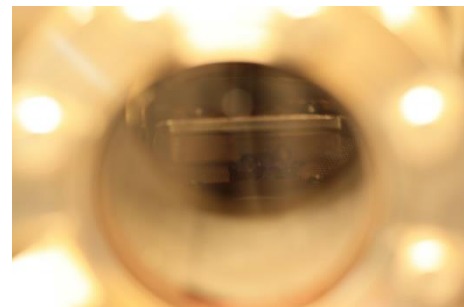
จากที่กล่าวมาแล้วว่า ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาคได้รับการสนับสนุนทางวิชาการในการติดตั้งเครื่องเร่งลำไอออน สำหรับศึกษาทางด้านอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับวัสดุแข็ง จากทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่นกัน คือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์พลังงานต่ำไม่เกิน 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังกล่าวยังมีขนาดใหญ่ประมาณ 5-15 เมตร และที่สำคัญ คือ มีราคาแพง อยู่ในเรือน 50 ล้านบาท นอกจากนี้ยังมีความซับซ้อนในการใช้งานสำหรับนักวิจัยทั่วไปที่ไม่ใช่นักฟิสิกส์ สิ่งเหล่านี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการตัดสินใจหาเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยของหน่วยงานต่างๆ ของประเทศ

ดังนั้นเมื่อ 2-3 ปีที่ผ่านมา ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ได้ออกแบบและสร้างเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด ขนาดไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ราคาไม่แพงมาก โดยการลดทอนอุปกรณ์ส่วนที่ไม่จำเป็นออก เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการของประเทศที่มีต้นทุนต่ำ ง่ายต่อการควบคุมการทำงาน และสะดวกในการซ่อมบำรุง โดยวางแผนพัฒนาเป็นเครื่องต้นแบบสำหรับจัดสร้างเครื่องอื่นๆ ให้แก่หน่วยงานที่ต้องการต่อไป ลักษณะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิต ได้ถูกออกแบบและสร้างให้มีขนาดความยาว (ในแนวตั้ง) หรือความสูงไม่เกิน 2 เมตร ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron ท่อเร่งอนุภาค สถานีทดสอบลำไอออน เครื่องกวาดลำไอออนสนามไฟฟ้า และห้องยิงลำไอออน ดังแสดงในรูปที่ 3-1 โดยจัดวางตัวในแนวตั้ง ลำไอออนจะวิ่งจากบนลงล่างเพื่อความสะดวกในการจัดวางชิ้นงานที่มีทั้งขนาดและรูปร่างแตกต่างกันหลากหลายรูปแบบ [23]

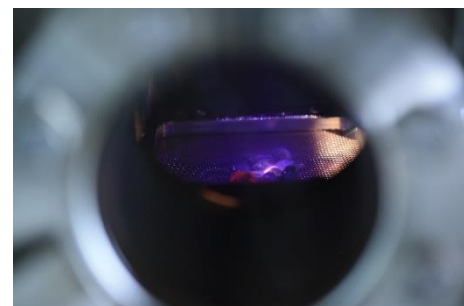
สำหรับระบบการทำงาน เมื่อลำไอออนถูกสร้างจากแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron จะวิ่งออกมาด้วยพลังงานประมาณ 15-20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แล้วถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าคงที่ของท่อเร่งพลังงานที่ปรับค่าได้สูงสุด ประมาณ 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นลำไอออนจะถูกกวาดในแนวแกน x และ y ซึ่งเป็นแกนตั้งฉากกันบนระนาบที่ตั้งฉากกับลำไอออน หรือหมุนงานใส่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เพื่อให้ลำไอออนยิงงานใส่ชิ้นงานจนเต็มพื้นที่เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรในห้องยิงไอออน เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบที่ประกอบแล้วแสดงดังในรูปที่ 3-2 โดยพบว่าให้ผลดีกับพลอยแซปไฟร์สีน้ำเงินจากแหล่งต่างๆ [23] แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องไอออนต้นแบบเครื่องนี้ยังต้องปรับปรุงเพื่อให้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ และเป็นตัวอย่างสำหรับเครื่องที่จะนำไปใช้เชิงอุตสาหกรรมต่อไป



รูปที่ 3-1 แบบสร้างของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดขนาดไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ ที่อยู่ในระหว่างการพัฒนาและทดสอบ [23]



ก่อนยิงไอออน



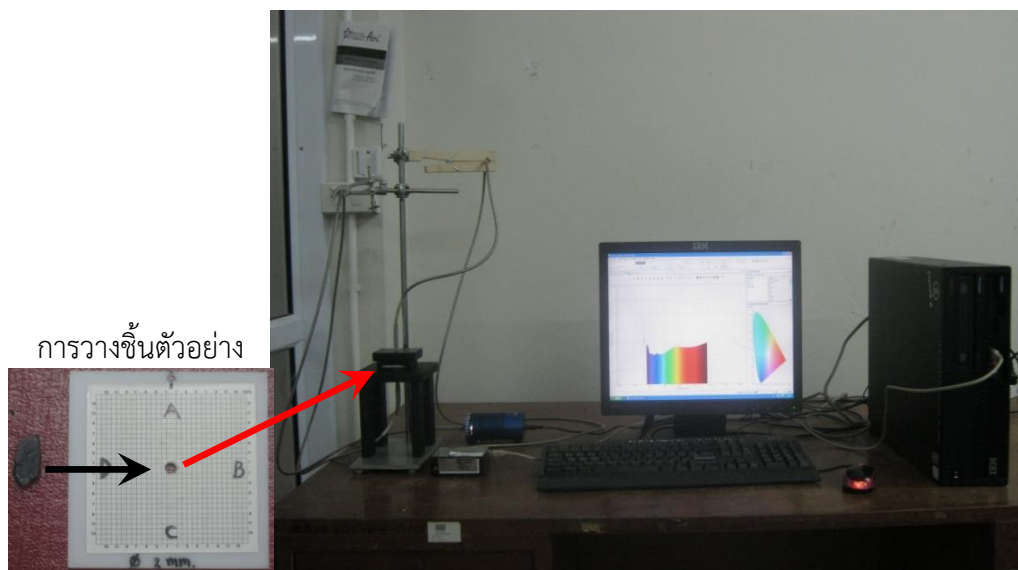
ระหว่างยิงไอออน

รูปที่ 3-2 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ต้นแบบสำหรับงานพลอย โดยที่รูปด้านขวาแสดงการติดตั้งพลอย และการเรืองแสงของพลายเมื่อถูกยิงด้วยไอออน

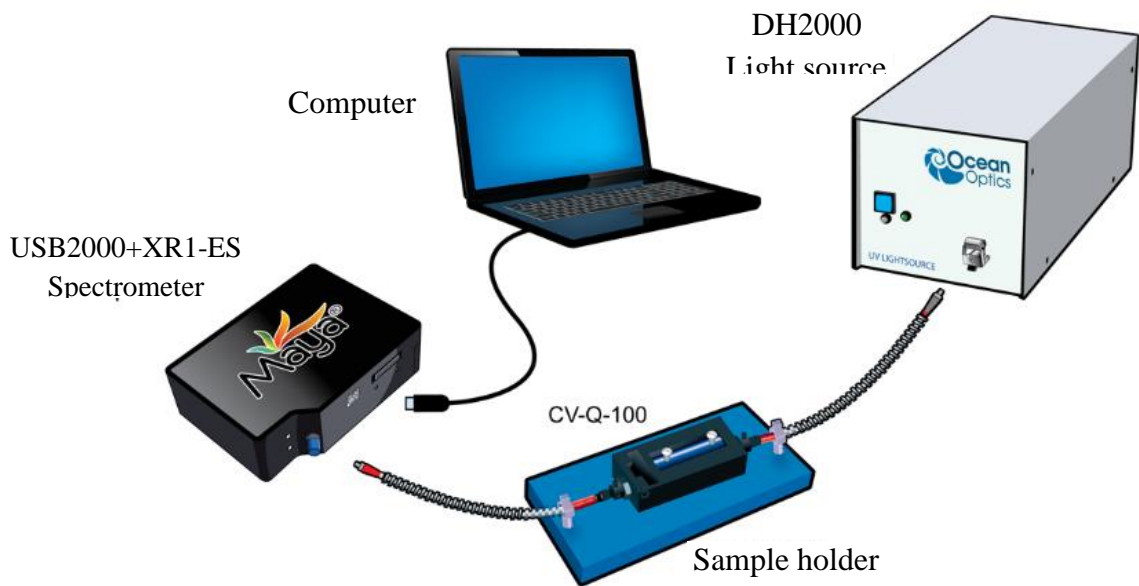
3.2.2 Optical Spectrophotometer

Optical Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่าน หรือ สะท้อน หรือ ถูกดูดกลืน โดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสง ในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้ อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสง แล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่าง เทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

คณะผู้วิจัยได้รับมอบเครื่อง Optical Spectrophotometer ของบริษัท Ocean Optics จากภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จึงนำมาติดตั้งและประยุกต์ใช้สำหรับงานพลอย ตัวอย่างการติดตั้งแสดงดังในรูปที่ 3-3 ซึ่งเป็นการติดตั้งในโหมดการดูดกลืน (absorption) ดังแสดงเป็นไดอะแกรมในรูปที่ 3-4



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

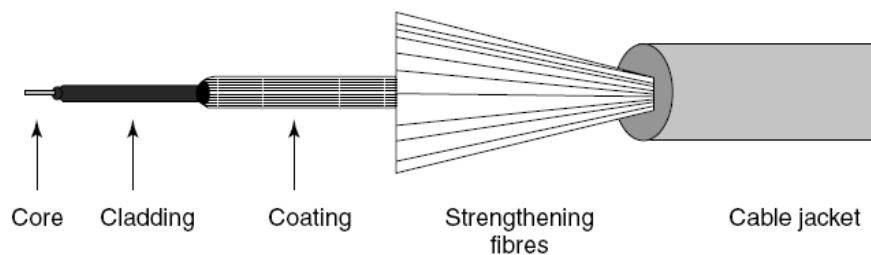


รูปที่ 3-4 การติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์ของบริษัท Ocean Optics ในโหมดการดูดกลืน (absorption)

ส่วนประกอบของ Optical Spectrophotometer มีดังนี้

(ก) Fiber optic

เส้นใยแก้วนำแสงคือ เส้นใยขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำแสง โครงสร้างของเส้นใยแสงดังรูปที่ 3-5 ประกอบด้วยส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า Core และส่วนที่หุ้ม Core อยู่เรียกว่า Clad ทั้ง Core และ Clad เป็น Dielectric ใส 2 ชนิด (Dielectric หมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) โดยการทำให้ค่าดัชนีการหักเหของ Clad มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของ Core เล็กน้อย ประมาณ 0.2 ~3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง สามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน Core เดินทางไปได้



รูปที่ 3-5 ส่วนประกอบภายในของเส้นใยแก้วนำแสง

(ข) Light sources (แหล่งกำเนิดแสง)

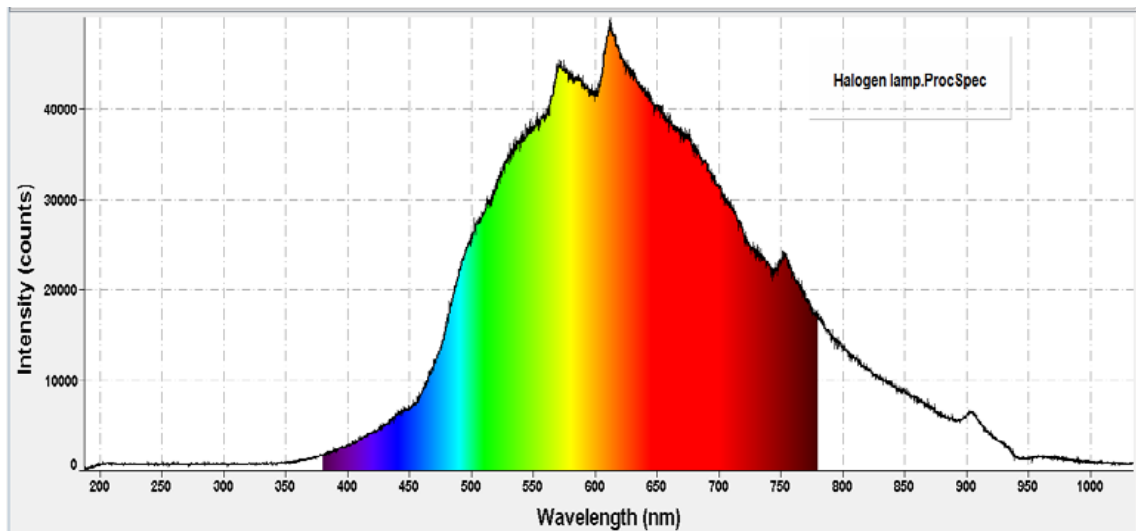
คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 รูปแบบ คือ แสงจากหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) และแสงจากหลอดดีวเทอเรียม (Deuterium Lamp) ซึ่งจะทำให้สามารถวัดสเปกตรัมได้ในย่าน UV-VIS ดังแสดงในรูปที่ 3-6 ถึง 3-11



รูปที่ 3-6 แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการทดลอง



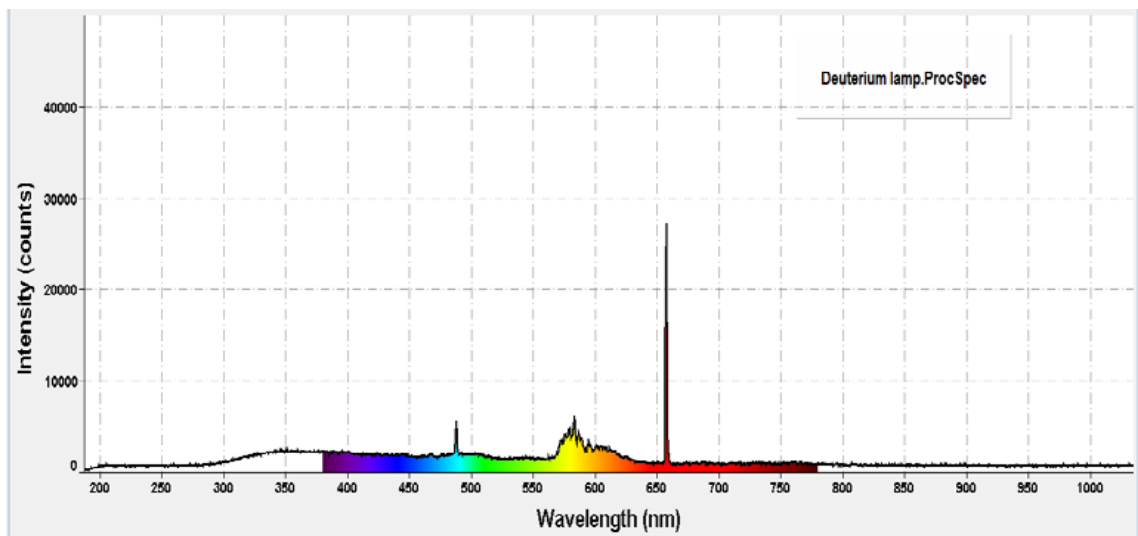
รูปที่ 3-7 การเรืองแสงของหลอด Halogen



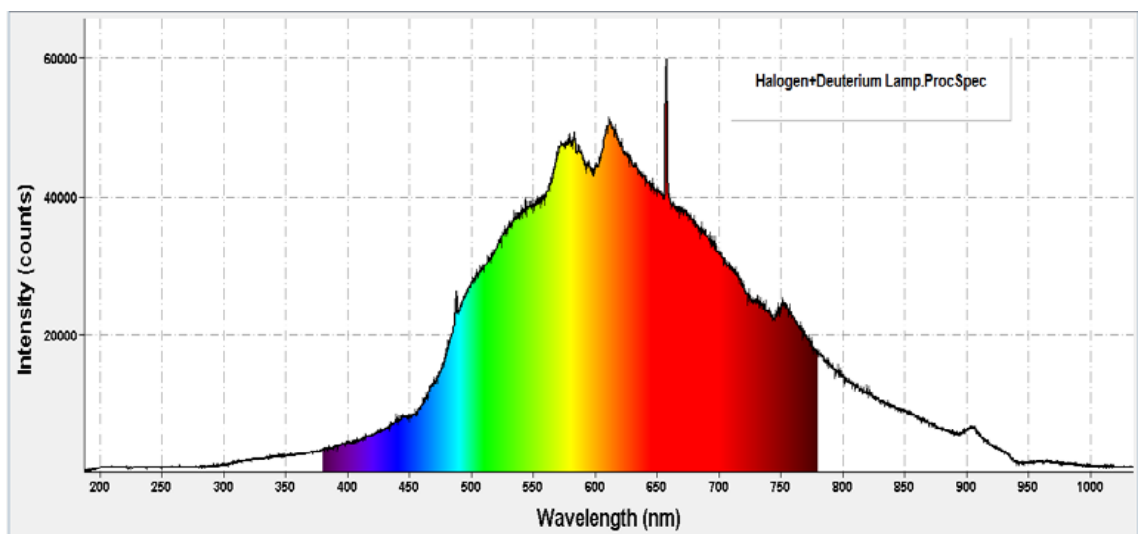
รูปที่ 3-8 กราฟ spectrum ของแสงจาก Halogen Lamp วัดผ่านสาย Fiber optics



รูปที่ 3-9 การเรืองแสงของหลอด Deuterium



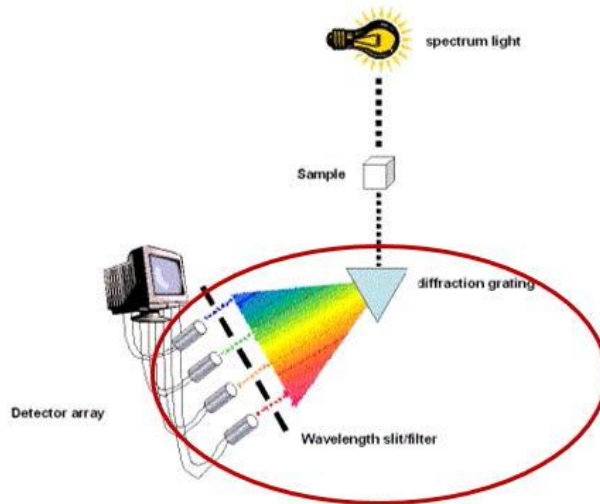
รูปที่ 3-10 กราฟ spectrum ของแสงจาก Deuterium Lamp วัดผ่านสาย Fiber optic



รูปที่ 3-11 กราฟ spectrum ของแสงจาก Halogen Lamp + Deuterium Lamp วัดผ่านสาย Fiber optic

(ค) Spectrometer

เป็นสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีไดโอดอาร์เรย์เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ (spectrophotometer แบบ diode array detector) 0 เป็นการตรวจจับสัญญาณ โดยวัดการดูดกลืนของแสง เช่นเดียวกับ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ทั่วไป เพียงแต่การเก็บข้อมูลมิใช่การเก็บเพียง 1 หรือ 2 ความยาวคลื่นเท่านั้น แต่สามารถเก็บข้อมูลได้เป็นช่วงของความยาวคลื่น ที่ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกได้ โดยใช้เวลาเพียงนิดเดียว เนื่องจากสามารถวัดทุกความยาวคลื่นได้ในเวลาเดียวกัน เหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลที่เป็นสเปกตรัม หรือต้องการติดตามการเปลี่ยนแปลงการดูดกลืนของสารที่หลายความยาวคลื่น diode array detector แสดงดังรูปที่ 3-12 และ 3-13



รูปที่ 3-12 แผนผังการทำงานภายใน Spectrometer (วงกลมสีแดง)



รูปที่ 3-13 Spectrometer USB2000+XR ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3-1 คุณลักษณะเฉพาะของ Spectrophotometer

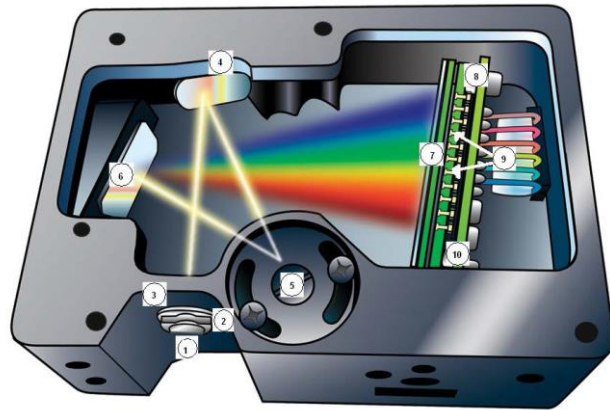
Dimensions:	89.1 mm x 63.3 mm x 34.4 mm
Weight:	190 g

Detector:	Sony ILX511B (2048-element linear silicon CCD array)
Wavelength range:	200-1025 nm
Integration time:	1 ms – 65 seconds (20 seconds typical)
Dynamic range:	8.5×10^8 (system); 1300:1 for a single acquisition
Signal-to-noise ratio:	250:1 (full signal)
Dark noise:	50 RMS counts
Grating:	#31, 500 lines/mm, (blazed at 250 nm)
Slit:	25 μm
Detector collection lens:	L2
Order-sorting:	Yes
Optical resolution:	$\sim 1.7\text{-}2.1$ nm FWHM
Stray light:	<0.05% at 600 nm; <0.10% at 435 nm; <10% at 250 nm
Fiber optic connector:	SMA 905 to 0.22 numerical aperture single-strand fiber

ส่วนประกอบภายใน Spectrometer (แสดงดังรูปที่ 3-14)

- SMA 905 Connector: เป็นช่องต่อสาย fiber optic
- Slit: รูรับแสงที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมติดตั้งอยู่ด้านหลัง SMA 905 Connector ขนาดรูรับแสงนี้ 200 ไมครอน ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของแสงที่เข้าสู่การวัด และควบคุมความละเอียดสเปกตรัม
- Filter: ตัวกรองแสง ทำหน้าที่กำหนดความยาวคลื่นของแสงไว้
- Collimating Mirror: เป็นกระจกที่เคลือบด้วยเงินไว้ด้านหน้า กระจกนี้จะทำหน้าที่บังคับทิศทางแสงหลังจากที่ผ่านตัวกรองแสงมาแล้ว ให้เข้าสู่ Grating การที่เคลือบด้วยเงินไว้ด้านหน้านั้น จะทำให้กระจกสะท้อนแสงออกมาได้เกือบร้อยเปอร์เซ็นต์
- Grating: เป็นกระจกที่ออกแบบให้มีเส้นเล็กๆ 600 เส้นต่อมิลลิเมตร และให้ความสว่างที่ 500 nm. ทำหน้าที่แยกแสงด้วยหลักการการสะท้อนแสงตามร่องนั้นๆ จะแยกแสงออกเป็นหลายๆสี และบังคับให้เข้าสู่กระจกสะท้อนที่โฟกัสไปยัง Detector
- Focusing Mirror: เป็นกระจกที่เคลือบด้วยเงินด้านหน้า ทำหน้าที่บังคับแสงลำดับที่ 1 (สว่างที่สุด) เข้าสู่ระนาบบน Detector.

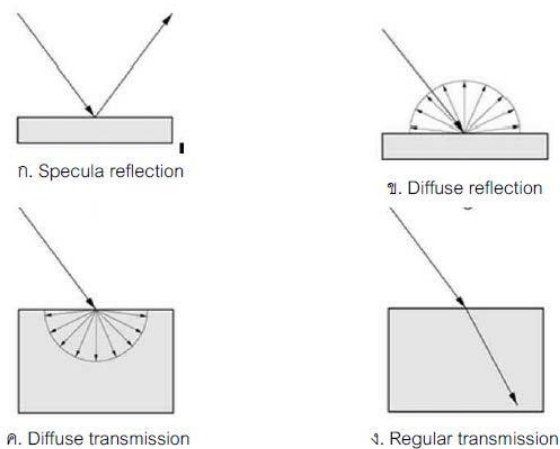
- L2 จากแสงในลำดับอื่นๆ
- Detector: แสงที่ได้จากรวมแสงของ L2 Detector Collection Lens จะถูกตรวจจับและแปลงสัญญาณแสงเป็นสัญญาณดิจิทัล แต่ละพิกเซลบนเครื่องตรวจจับ ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่นที่ถูกเขียนลงในโปรแกรมแล้ว
- LVF Filter: อุปกรณ์เสริมสำหรับการแยกแสงจากการกระตุ้น และพลังงานเรืองแสง ได้แก่ LVF-L: ฟิลเตอร์เชิงเส้นที่มีการกรองต่ำมาก แยกแยะสัญญาณที่มีการทับซ้อนได้ LVF-H: ฟิลเตอร์เชิงเส้นที่มีการกรองสูงมาก ตัวกรองนี้จะเป็นตัวเลือก



รูปที่ 3-14 ส่วนประกอบภายใน Ocean Optics Spectrometer

(ง) *ISP-R Series Integrating Spheres*

ในวัตถุที่มีสีและลักษณะพื้นผิวที่ต่างกันย่อมเกิดการสะท้อน การดูดกลืนและการส่งผ่านของแสงที่ต่างกันไป โดยวัตถุทึบแสงที่ผิวมีความเงามันจะมีการสะท้อนของแสงแบบ specular reflection ซึ่งเป็นการสะท้อนแสงที่มีมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบเมื่อเทียบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวของวัตถุ แต่ถ้าพื้นผิววัตถุไม่เรียบ ไม่มีความเงามัน เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปกระทบวัตถุนั้นจะเกิดการกระเจิงของแสง เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า diffuse reflection ส่วนวัตถุโปร่งแสงจะเกิดการกระเจิงของแสงที่ส่งผ่านเรียกว่า diffuse transmission แต่ถ้าเป็นวัตถุที่มีความโปร่งใส เช่นกระจกใส จะเกิดการส่งผ่านทะลุวัตถุโปร่งใสที่เรียกว่า regular transmission แสดงดังรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 ปรากฏการณ์ของแสงที่เกิดขึ้นบนวัตถุ (ก) วัตถุทึบแสงผิวมัน (ข) วัตถุทึบแสงผิวขรุขระ (ค) วัตถุโปร่งแสง และ (ง) วัตถุโปร่งใส

ลักษณะทางแสงดังกล่าว สามารถวัดออกมาเป็นร้อยละของการสะท้อนหรือการส่งผ่านด้วยเครื่อง UV-Vis-NIR Spectrophotometer แต่ผลของการวัดมักจะคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากตัวของวัตถุเอง จะทำให้เกิดการหักเหและเบี่ยงเบนลำแสงในระบบ ทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ใช่ค่าการสะท้อนหรือการส่งผ่านที่แท้จริงเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการใช้ Integrating sphere (รูปที่ 3-16) เป็นวิธีเดียวที่จะหลีกเลี่ยง Systematic error ที่เกิดจากการกระเจิงหรือการสะท้อนแสงที่ผ่านวัตถุ ภายใน Integrating sphere จะเคลือบสารสะท้อนแสง เกิดเป็นการสะท้อนแสงหลายๆครั้ง ใน Integrating Sphere ทำให้สามารถสเปกตรัม หรือ สีผิวของตัวอย่างได้



รูปที่ 3-16 Integrating Sphere

ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติเฉพาะของ Integrating Sphere

Engineering Specifications	ISP-30-6-R
Dimensions:	59 mm diameter x 58 mm height
Weight:	330 g
Spectral range:	200-2500 nm
Sphere diameter:	30 mm
Sample port diameter:	6 mm
Sphere coating:	PTFE
PTFE reflectivity:	>98% (400-1500 nm)>95% (250-2500 nm)
Reflectance measurements:	Specular and diffuse
Gloss trap:	No
Connector:	SMA 905

(จ) ตัวสะท้อนมาตรฐาน

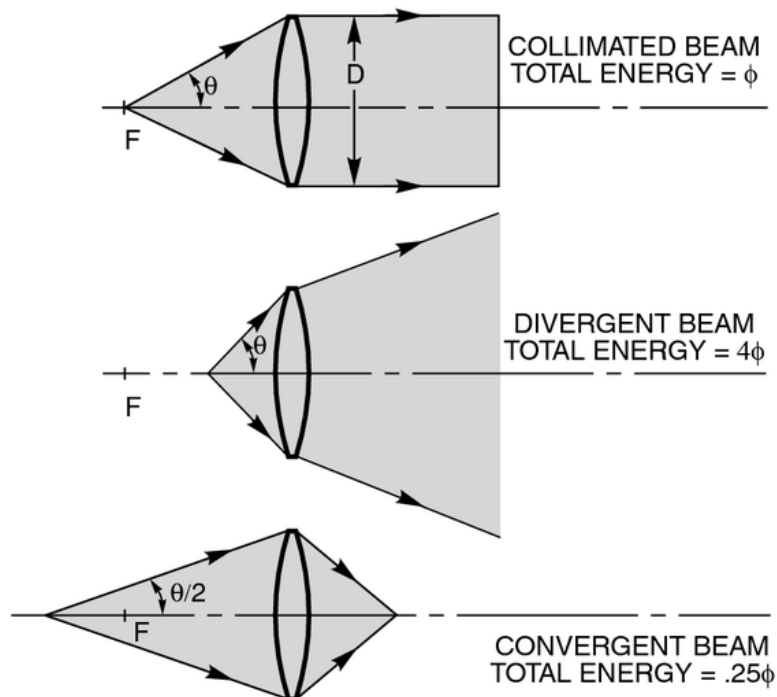
วัสดุที่นำมาสอบเทียบการสะท้อน 100 % แสดงดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 ตัวสะท้อนมาตรฐาน

(ข) Lens

เลนส์ที่ใช้ในการบังคับลำแสง เพื่อโฟกัสแสงให้ผ่านตัวอย่างเข้ารูรับแสงของแผ่นวางตัวอย่าง แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ Collimating Lens, Cosine corrector lens แสดงดังรูปที่ 3-18

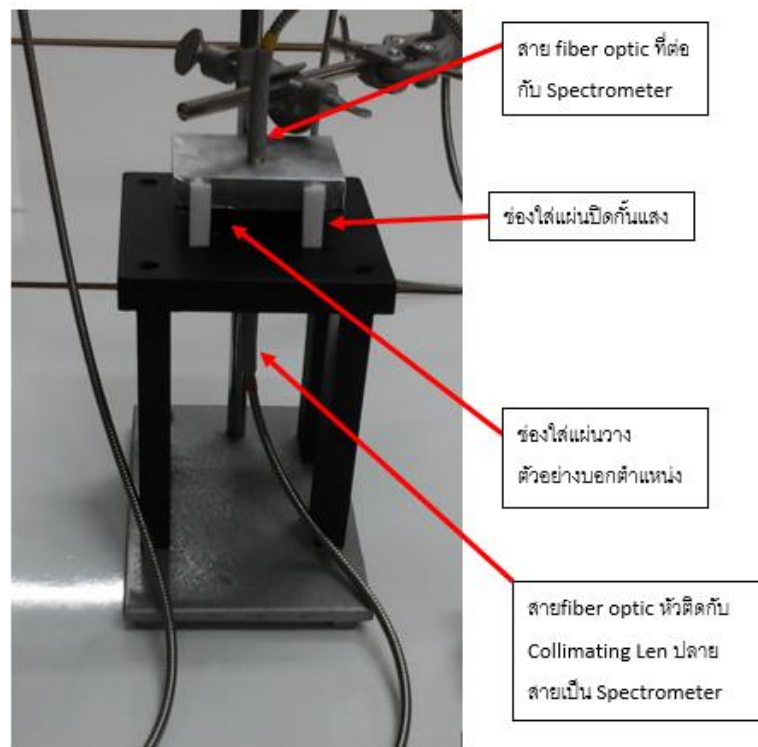


รูปที่ 3-18 ลักษณะลำแสงหลังจากผ่านเลนส์แบบต่างๆ

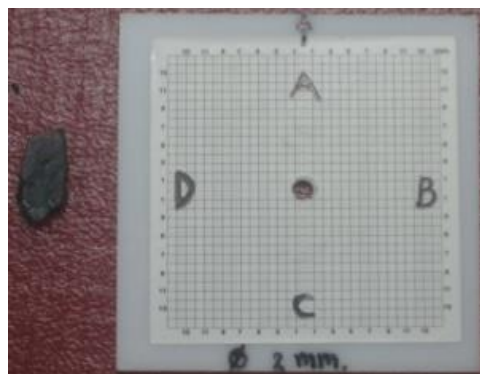
- Collimating Lens: เป็นเลนส์ที่ทำให้แสงค่อนข้างเป็นแสงที่ขนาน เพราะเกิดจากการปรับให้จุดกำเนิดอยู่ตรงจุดโฟกัสพอดี
- Cosine corrector Lens: เป็นเลนส์ที่ทำให้แสงกระจายอย่างกว้างๆ เพราะเกิดจากการปรับให้จุดกำเนิดแสงเข้ามาใกล้เลนส์ และเลยจุดโฟกัสไป

(ช) แท่นวิเคราะห์และแผ่นวางตัวอย่างบอกตำแหน่ง

แท่นวิเคราะห์ ออกแบบมาเพื่อสามารถใช้วัดการดูดกลืน และการส่องผ่านตัวอย่างสาร ที่อยู่ในรูปของแข็ง ดังรูปที่ 3-18 โดยที่สามารถบอกตำแหน่งจุดวัดได้ด้วย แผ่นวางตัวอย่างบอกตำแหน่ง ทำให้ตำแหน่งการวัดตัวอย่างเป็นไปได้ค่อนข้างใกล้เคียงกับจุดเดิม เมื่อวัดครั้งต่อไป ดังรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-19 แท่นวิเคราะห์ที่ใช้การวัดการดูดกลืนและการส่องผ่านของแสง



รูปที่ 3-20 แผ่นวาง Sample บอกตำแหน่ง Scale 2 mm

3.2.3 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปฝังพร้อมหล่อ (stone in place casting)

การฝังพร้อมหล่อ หรือ ที่เรียกว่า stone in place casting หมายถึง กระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กันระหว่างการฝังอัญมณีและการหล่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ของตัวเรือน คือ การที่มีอัญมณีในตัวเรือนพร้อมเสร็จ หลังจากการหล่อและสามารถขัดชุบได้ทันที การหล่อมี่พื้นฐานเหมือนการหล่อโดยทั่วไป แต่มีส่วนที่จะแตกต่างคือ มีการการฝังอัญมณีลงบนเทียนก่อนที่จะทำการหล่อ ดังนั้นวัสดุอุปกรณ์บางอย่างอาจแตกต่างกันบ้าง เช่น ชนิดของปูนหล่อ ลักษณะของ Wax ผู้ที่ทำการผลิตในขั้นตอนนี้จะต้องมีความละเอียดรอบคอบในการทำอย่างมาก เพราะความผิดพลาดอาจหมายถึงการสูญเสียอัญมณีในระหว่างขั้นตอนการผลิต งานวิจัยนี้ได้นำเทคนิคขึ้นรูปหล่อพร้อมฝังมาใช้ในการขึ้นรูปพลอยที่ได้จากการทดลอง เพื่อแสดงให้เห็นว่าพลอยสามารถผ่านกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงนี้ได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงสภาพ รายละเอียดงานวิจัยในส่วนนี้ได้ในโครงการย่อยที่ 2 เครื่องมือที่ใช้ในการหล่อพร้อมฝังแสดงดังในรูปที่ 3-21

ข้อได้เปรียบของการฝังพลอยบนชิ้นงานเทียน

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

ข้อควรระวังของการฝังพลอยบนชิ้นงานเทียน

- เสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย และสูญเสียพลอย
- ไม่สามารถทำได้กับพลอยทุกชนิด
- ยากในการทำความสะอาดและขัดเงา
- หลังจากหล่อแล้วพลอยอาจมีรอยแตกเนื่องจากความร้อนได้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3-21 เครื่องมือสำหรับขึ้นรูปฝังพร้อมหล่อ (ก) Investment mixer (ข) Furnace or Burnout oven (ค) Vacuum Pressure Casting Machine

3.3 ระเบียบวิธีวิจัย

แผนงานวิจัยนี้ดำเนินการวิจัยที่ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยมีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

(ก) การประกอบเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดสำหรับงานพลอย

การประกอบเครื่องเร่งลำไอออนในเบื้องต้น ได้ติดตั้งแล้วเสร็จ ขณะนี้อยู่ระหว่างทดสอบและปรับปรุงการทำงานทั้งระบบซึ่งมีแนวโน้มว่าอาจสามารถปรับปรุงให้เครื่องมีขนาดเล็กลงได้อีก การที่เครื่องมีขนาดเล็กลงมีข้อดีหลายประการ เช่น ปริมาตรอากาศที่จะถูกดูดออกจากเครื่องมีน้อยลง ทำให้ใช้เวลาปั๊มเป็นสุญญากาศสั้นลงและ / หรือสามารถใช้ปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการประหยัดทั้งเวลาและเงินตรา นอกจากนี้ยังสามารถทำห้องเครื่องเร่งที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งก็จะประหยัดงบประมาณได้อีกส่วนหนึ่ง อีกทั้งทำให้สามารถใช้เครื่องปรับอากาศที่มีขนาดเล็กลง ประหยัดไฟฟ้ามากขึ้น

(ข) การปรับปรุงให้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

โดยที่กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน โดยการทำให้เกิดการแพร่ของไนโตรเจน หรือ ออกซิเจน (diffusion of nitrogen or oxygen gas) ในโครงสร้างของพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงิน ที่อุณหภูมิสูง มีส่วนทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง Ti^{3+} , Fe^{3+} , กับ Ti^{4+} , Fe^{2+} และเข้าแทรกแทนที่ Al^{3+} ทำให้พลอยแซปไฟร์มีสีน้ำเงินสดขึ้นได้ ดังนั้น เมื่อนำพลอยแซปไฟร์ธรรมชาติสีน้ำเงินอ่อน มาทำไอออนอิมพลานเตชันด้วยออกซิเจนหรือไนโตรเจน จะทำให้ไนโตรเจน หรือ ออกซิเจน แทรกเข้าไปในเนื้อพลอย เหนียวนำไปเกิดกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันทำให้พลอยมีสีน้ำเงินสดขึ้นได้เช่นกัน กระบวนการนี้จึงต้องออกแบบเครื่องมือให้มีไอออนไนโตรเจน หรือ ออกซิเจนที่มากเพียงพอในระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยเครื่องมือที่จะออกแบบขึ้นมา นี้ ต้องใช้งานและดูแลรักษาได้ไม่ยากนัก เหมาะสำหรับผู้ประกอบด้านการปรับปรุงคุณภาพอัญมณี นำไปต่อยอดสู่การพัฒนาอุตสาหกรรม SME ต่อไป

การพัฒนาปรับปรุงระบบเครื่องเร่งฯ เพื่อเป้าหมายดังกล่าวประกอบด้วยประเด็นดังต่อไปนี้

i) การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)

- ลดเวลาการเปลี่ยน filament ของ ion source
- เพิ่มประสิทธิภาพการทำสภาพสุญญากาศภายใน ion source
- ปรับปรุงการควบคุมก๊าซ (ที่ใช้สร้างพลาสมาเพื่อผลิตลำไอออน หรือ feed gas) ให้มีความแม่นยำและสามารถทำซ้ำได้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น
- ศึกษาความเกี่ยวพันของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลำไอออน
- ทดสอบอำนาจการโฟกัสลำไอออนของ einzel lens

ii) การปรับปรุงห้องยึงพลอย

- เพิ่มขนาดของช่องทางขาเข้าของลำไอออนเช่นโดยการเพิ่มขนาดของ gate valve
- ปรับปรุงให้งานใส่พลอยหมุนได้เพื่อการยึงพลอยที่มีความสม่ำเสมอมากขึ้น
- มี heater สำหรับอุ่นชิ้นงานขณะยิงไอออน
- ปรับปรุงระบบวัดความเข้มของไอออนที่ชิ้นงานใส่พลอยให้แม่นยำและสะดวกกับการใช้งานมากขึ้น

iii) การปรับปรุงระบบป้อนไฟแรงสูง

- ปรับปรุง isolation transformer ให้สามารถทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 70 kV (จากปัจจุบันที่ทนได้ไม่เกิน 35 kV)

(ค) การศึกษาผลของลำไอออนที่มีต่อพลอยคอร์รันดัม

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองกับพลอยคอร์รันดัมจำนวน 1,000 เม็ด เพื่อดูความเป็นไปได้ในเชิงสถิติ

(ง) การพัฒนาเครื่องเร่งลำไอออนเข้าสู่ SMEs

ในขั้นตอนนี้จะมีการจัดฝึกอบรม เพื่อเผยแพร่งานวิจัย และจะหาผู้ร่วมทุนเพื่อพัฒนาเข้าสู่อุตสาหกรรม SMEs ต่อไป

(จ) สรุปและเผยแพร่งานวิจัย

สรุปผลงานวิจัย และจัดทำรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

3.3.2 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานแสดงดังในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 แสดงแผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรม	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ประกอบเครื่องเร่งลำไอออน	X											
2. การศึกษาพารามิเตอร์ควบคุมลำไอออน		X										
3. การศึกษาผลของลำไอออนที่มีต่อคอร์รันดัม			X	X	X	X	X	X				
4. การปรับปรุงเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด				X	X	X	X	X	X	X	X	
5. การพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนให้เข้าสู่ SMEs												X
6. สรุปและเผยแพร่รายงานวิจัยและจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ												X

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

4.1 การปรับปรุงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาดกะทัดรัดสำหรับงานพลอย

ศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้พัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคขนาดเล็กขึ้นมา โดยมีส่วนประกอบเฉพาะเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เพื่อให้ใช้งานได้ง่าย สำหรับผู้ใช้งานทั่วไป อย่างไรก็ตาม ภายใต้แผนงานวิจัยนี้ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เครื่องนี้ได้มีการปรับปรุง เพื่อให้สามารถทำงานได้ด้วยประสิทธิภาพสูงสุด ประกอบด้วย การปรับปรุงและพัฒนาระบบสร้างลำไอออน ระบบลำเลียงไอออน และระบบยิงลำไอออน เพื่อให้ได้ลำไอออนที่มีคุณสมบัติตรงตามการประยุกต์ใช้งานมากที่สุด คือต้องมีกระแสสูงขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางในเรือน 10 เซนติเมตร (uniform-broaded beam) มีเสถียรภาพสูงและมีต้นทุนต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ รวมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อลำไอออน เช่น ศักย์ไฟฟ้าเร่ง ศักย์ไฟฟ้าโพกัส ศักย์ไฟฟ้าดึงลำไอออน เป็นต้น ตลอดจนศึกษาผลของลำไอออนที่มีต่อพลอยคอร์นดัม นอกจากนี้ ยังได้ปรับปรุงระบบป้องกันไฟแรงสูง โดยการปรับปรุงชั้นวาง power supply ใหม่ โดยมีฐานที่กั้น (isolate) ส่วนไฟฟ้าแรงสูงจากพื้น (ground) รองรับชั้นวางดังกล่าว เป้าหมายคือ ให้สามารถเพิ่มพลังไอออนได้ถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะทำให้ความแรงของการเกิดปฏิกิริยาในพลอยเพิ่มมากขึ้น

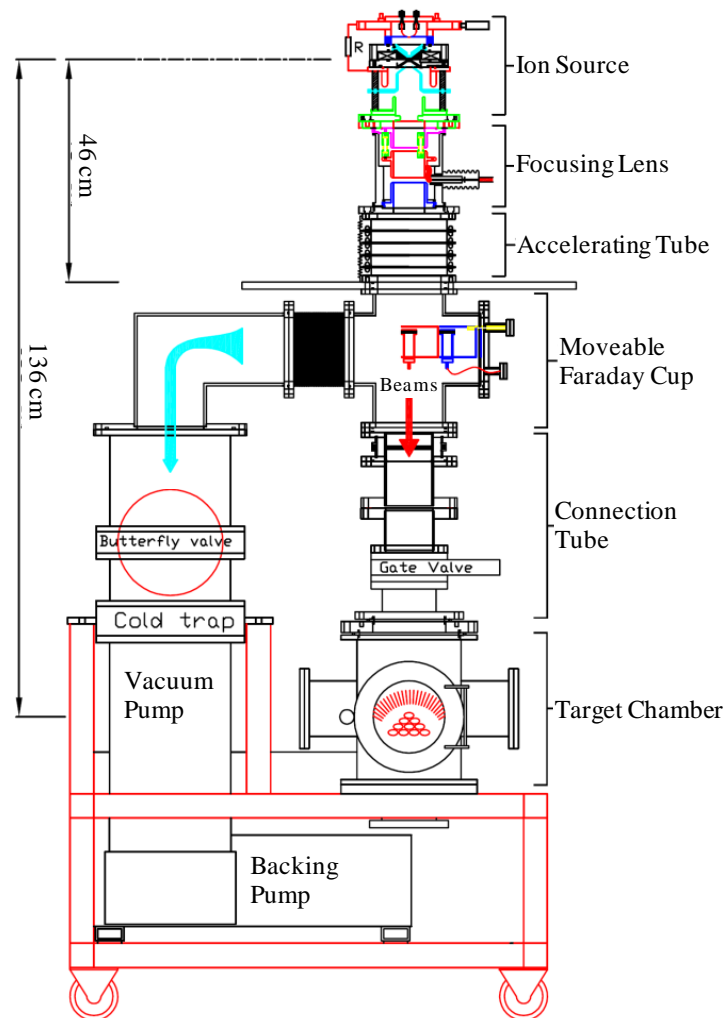
รายละเอียดของการปรับปรุงระบบเครื่องเร่งฯ สรุปได้ดังต่อไปนี้

- ปรับปรุงระบบแหล่งกำเนิด (Ion source) ได้แก่ ระบบ einzel lens, solenoid magnet ฯลฯ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำสภาพสุญญากาศภายใน ion source
- เพิ่มประสิทธิภาพของการดึงและการโพกัสลำไอออนของ einzel lens
- เพิ่มอายุการใช้งานของ filament ของ ion source เพื่อลดเวลาการเปลี่ยนลง
- ปรับปรุงการควบคุมก๊าซ (ที่ใช้สร้างพลาสมาเพื่อผลิตลำไอออน หรือ feed gas) ให้มีความแม่นยำ และสามารถทำซ้ำได้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น
- ศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลำไอออน จนได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม
- การปรับปรุงห้องยิงไอออน ให้มี heater สำหรับอุ่นชิ้นงานขณะยิงไอออน
- มีถังใส่ไนโตรเจนเหลวสำหรับนำชิ้นงานไปเก็บหลังยิงไอออน ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เพื่อรักษาโครงสร้างผลึกของชิ้นงานให้คงสภาพ
- ปรับปรุงระบบวัดความเข้มของไอออนที่ชิ้นงานใส่พลอย ให้แม่นยำและสะดวกกับการใช้งานยิ่งขึ้น
- การปรับปรุงระบบป้องกันไฟแรงสูง
- ปรับปรุง isolation transformer ให้สามารถทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 70 kV จากปัจจุบันที่ทนได้ไม่เกิน 35 kV
- การสร้างท่อเร่งใหม่สำหรับทำงานที่ศักย์ไฟฟ้าไม่ต่ำกว่า 100 kV

เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด (compact ion implanter) หลังการปรับปรุง ประกอบด้วย ส่วนที่นำลำไอออนและระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4-1 และไดอะแกรมผังรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ และชั้นวาง power supply หลังปรับปรุง



รูปที่ 4-2 รายละเอียดเชิงเทคนิคของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดขนาดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลโวลต์ ที่ได้ออกแบบ และสร้างขึ้นใช้งานเอง

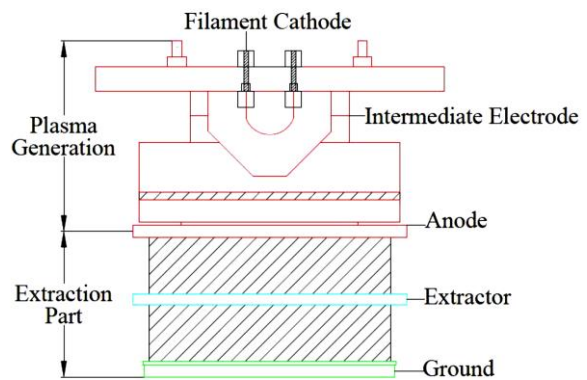
ระบบทั้งหมดมีขนาดประมาณ $2.5 \times 2.5 \times 2.5$ เมตร³ โดยความสูงในแนวตั้งฉากนับจากปลายบนสุด คือ แหล่งกำเนิดไอออน ถึงปลายล่างสุด คือ ห้องยิงลำไอออน เพียง 2 เมตร มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

4.1.1 แหล่งกำเนิดไอออน

แหล่งกำเนิดไอออนในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เครื่องนี้เป็นแบบ duoplasmatron แบ่งตามหน้าที่ได้เป็นส่วนสร้างพลาสมา (plasma generation part) และส่วนดึงลำไอออน (extraction part) ดังแสดงในรูปที่ 4-3 โดยส่วนสร้างพลาสมาประกอบด้วย filament cathode เป็นขั้วไฟฟ้าลบบสำหรับจ่ายอิเล็กตรอน intermediate electrode เป็นขั้วไฟฟ้าบวกสำหรับสร้างพลาสมาความหนาแน่นต่ำ ส่วนที่ 1 solenoid เป็นตัวสร้างสนามไฟฟ้าในแนวแกนลำไอออนระหว่าง intermediate electrode กับ anode สำหรับสร้างพลาสมาความหนาแน่นสูง ส่วนที่ 2 และ anode เป็นขั้วไฟฟ้าบวกศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า intermediate electrode และสร้างพลาสมาพร้อมกับ cathode โดยส่วนประกอบเหล่านี้ทำงานภายใต้ระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรง ส่วนดึงลำไอออนที่ประกอบด้วย anode และ extractor เป็นขั้วไฟฟ้าแรงสูงขั้วบวกและลบตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-3 (ก) ภาพถ่ายแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron และ (ข) แผนภาพแสดงส่วนประกอบหลัก

4.1.2 ท่อเร่งลำไอออนแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic acceleration tube)

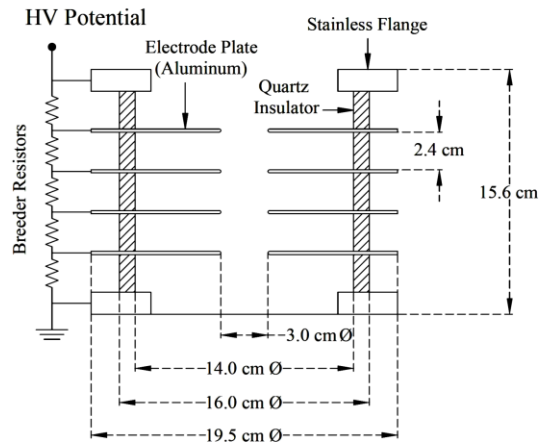
ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกสร้างโดยการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ไปยังแผ่นขั้วไฟฟ้าแรกของท่อเร่งอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4-4 โดยระหว่างขั้วไฟฟ้ามีตัวต้านทาน ทำหน้าที่แบ่งศักย์ไฟฟ้าให้ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์หรือกราวด์ ที่แผ่นขั้วไฟฟ้าสุดท้ายที่อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดไอออนมากที่สุด ขั้วไฟฟ้ามีทั้งหมด 5 ขั้ว ความยาว 15 เซนติเมตร แต่ละคู่มีระยะห่างกัน 2.4 ซม. แต่ละแผ่นหนา 2.0 มม. มีรูตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 ซม. สำหรับลำไอออนผ่าน ฉนวนกั้นกลางระหว่างคู่แผ่นขั้วไฟฟ้าเป็นแก้วทรงกระบอกแบบวงแหวน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 16.0 และ 14.0 ซม. ตามลำดับ ฉนวนระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าสามารถเลือกใช้วัสดุที่เป็นแก้ว pyrex หรือแก้ว quartz หรืออาจเป็นเซรามิก ที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) 14 MV/m และ 8 MV/m ตามลำดับ สำหรับตัวต้านทานที่ใช้เป็นตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้าบนท่อเร่งอนุภาค จำนวน 5 ตัว

เป็นแบบ high-voltage low-current มีค่าความต้านทาน 10×10^9 โอห์ม 8 วัตต์ ตามความสัมพันธ์ในสมการ (4-1) ดังนั้น กระแสไฟฟ้าที่รั่วผ่านตัวต้านทานเหล่านี้ ไม่ควรเกิน 28 ไมโครแอมแปร์

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{8}{10 \times 10^9}} = 28 \mu\text{A} \quad (4-1)$$



(ก)

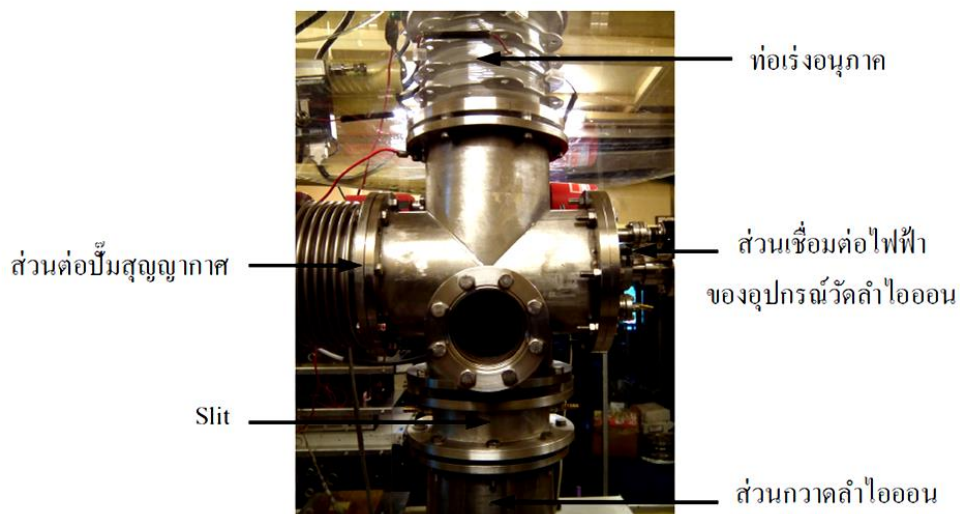


(ข)

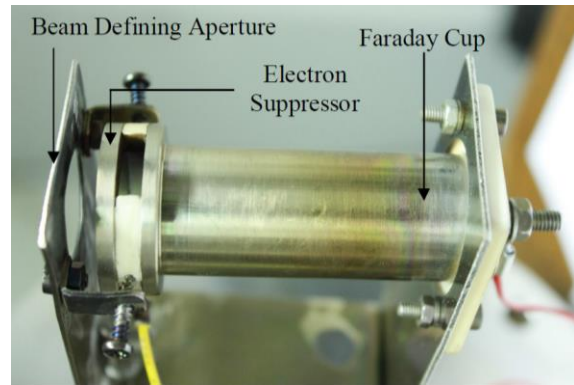
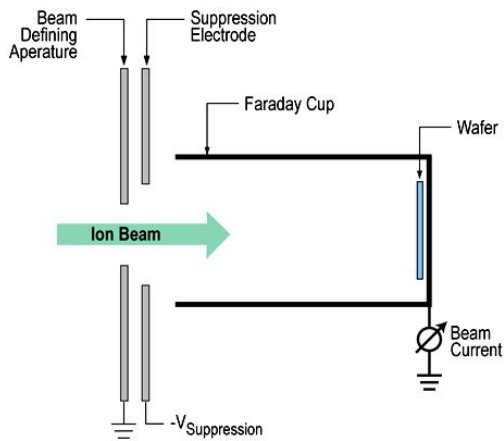
รูปที่ 4-4 (ก) ภาพถ่ายท่อเร่งอนุภาคที่ได้รับการปรับปรุง และ (ข) แผนภาพโครงสร้างท่อเร่งอนุภาค

4.1.3 สถานีทดสอบลำไอออน (Beam testing station)

สถานีทดสอบลำไอออนเป็น chamber 4 ทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ซม. ยาว 30 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4-5 โดยทางด้านบนต่อจากท่อเร่งอนุภาค และด้านล่างต่อกับส่วนกวาดลำไอออน ด้านซ้ายต่อกับปั๊มสุญญากาศแบบ diffusion และทางด้านขวาได้ติดตั้ง Faraday cup สำหรับวัดกระแสลำไอออน โดยที่ Faraday cup สามารถเลื่อนเข้าออกสำหรับวัดและหลบลำไอออนได้ ซึ่งส่วนประกอบของ Faraday cup ประกอบไปด้วย beam defining aperture, electron suppressor และ Faraday cup ดังแสดงในรูปที่ 4-6



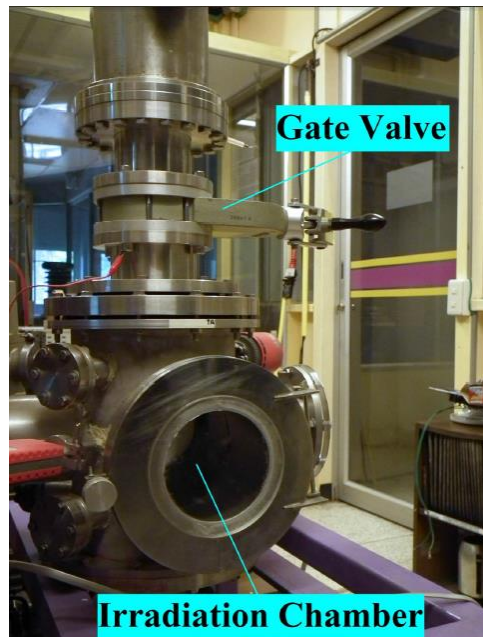
รูปที่ 4-5 챔เบอร์ 4 ทางสำหรับตรวจสอบคุณลักษณะของลำไอออน และตำแหน่งเชื่อมต่อกับระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4-6 (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่าย แสดงองค์ประกอบและการใช้งาน Faraday cup

4.1.4 ห้องยิงฝังบีมไอออน (Beams irradiation chamber)

ห้องยิงฝังบีมไอออนดังแสดงในรูปที่ 4-7 เป็นส่วนสุดท้ายของท่อนำลำไอออนสำหรับวางงานตัวอย่างในแนวระนาบ เพื่อให้สะดวกต่อการติดตั้งชิ้นงานตัวอย่างหลายประเภท โดยส่วนบนของห้องมี gate valve สำหรับปิด-เปิด เพื่อแยกส่วนห้องยิงลำไอออนออกจากเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ ในขั้นตอนการเปลี่ยนงานวางตัวอย่างโดยไม่หยุดการทำงานของระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4-7 ห้องยิงลำไอออนและ gate valve

ห้องยิงไอออนเป็นส่วนที่ไอออนจะถูกทำให้ฝังบีมลงบนชิ้นงาน ซึ่งการฝังบีมไอออนลงบนชิ้นงานก็จำเป็นต้องรู้ปริมาณไอออนที่ถูกฝังบีมลงไป ที่เรียกสั้นๆว่า โดส (dose) หน่วยที่วัดเป็นจำนวนไอออนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ions-cm²) ซึ่งหาได้จากสมการ 4-2

$$dose = \frac{I \times t}{1.6 \times 10^{-19} \times A} \quad (4-2)$$

โดย dose มีหน่วยเป็น $\text{ions}\cdot\text{cm}^{-2}$

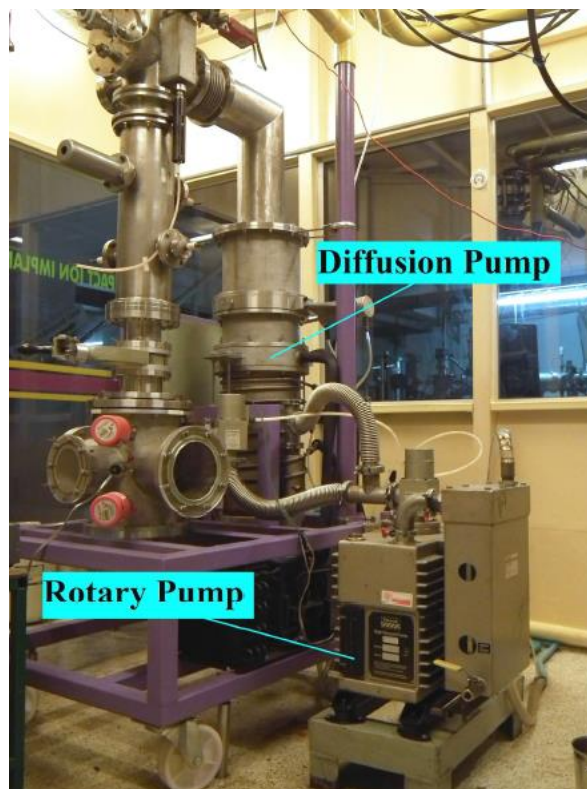
I = กระแสที่วัดได้จาก faraday cup ในหน่วย Ampere

t = เวลาที่ใช้ในการฝังไอออน ในหน่วย second

A = พื้นที่ที่ใช้ในการฝังไอออนในหน่วย cm^2

4.1.5 ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

ระบบสุญญากาศของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สุญญากาศภายในแหล่งกำเนิดไอออน และสุญญากาศภายในท่อนำลำไอออน ดังแสดงในรูปที่ 4-8 โดยมีรูเปิดขนาด 0.3 มม. ที่ anode เป็นช่องขนาดเล็ก สำหรับรักษาระดับความแตกต่างของทั้งสองระบบสุญญากาศ ให้สัมพันธ์กันเพื่อช่วยในการควบคุมการผลิตลำไอออน นอกจากนี้มี bypass สำหรับกักแก๊สเพื่อจุดพลาสมาและสำหรับระบายแก๊สในแหล่งกำเนิดไอออนไปยังท่อนำลำไอออน เพื่อปรับระดับสุญญากาศให้พร้อมสำหรับการจุดพลาสมาครั้งต่อไป เมื่อมีทำงานตามปกติหรือ หลังจากการทำความสะอาด และประกอบแหล่งกำเนิดไอออนใหม่ โดยที่ bypass เปิด เมื่อเปิดปั๊ม rotary ระดับสุญญากาศในแหล่งกำเนิดไอออนควรอยู่ที่ระดับความดันประมาณ $2-4 \times 10^{-1}$ ทอร์ โดยใช้เวลาประมาณ 15-20 นาที ขึ้นอยู่กับความสะอาดภายใน สำหรับระดับสุญญากาศในท่อนำลำไอออน ควรอยู่ที่ระดับ 10^{-6} ทอร์ ซึ่งจะใช้ปั๊มสุญญากาศสองตัวทำงานร่วมกันคือ ปั๊ม rotary จะทำงานในตอนเริ่มต้นจนถึงระดับ $2 - 3 \times 10^{-2}$ ทอร์ หลังจากนั้นปั๊ม diffusion จะทำงานร่วมกันเพื่อให้ระดับสุญญากาศภายในท่อนำลำไอออนเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ อยู่ที่ระดับ $2 - 4 \times 10^{-6}$ ทอร์ (ตารางที่ 4-1) โดยระบบและตำแหน่งการติดตั้งแสดงในรูปที่ 4-8



รูปที่ 4-8 ระบบปั๊มสุญญากาศเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

ตารางที่ 4-1 คุณลักษณะของปั๊มสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศ	ระดับสุญญากาศ (ทอร์)	รายละเอียดทางเทคนิค
Rotary	$9 - 10 \times 10^{-2}$	- เวลาในการสร้างระดับสุญญากาศ 2 ชั่วโมง - การรั่วระดับ 10^{-1} ทอร์ เกิดจากรอยต่อขนาดเล็กเปิดออกหรือไม่แน่นอน
Rotary และ Diffusion	$5 - 7 \times 10^{-6}$	- เวลาในการสร้างระดับสุญญากาศ 6 ชั่วโมง - การรั่วระดับ 10^{-2} ทอร์ เกิดจากรูรั่วขนาดเล็ก ตามรอยต่อ ตรวจสอบโดยใช้แก๊สฮีเลียมฉีดยาบริเวณรอยต่อที่สงสัย

4.1.6 ระบบไฟฟ้า (Electrical system)

เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด เป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตขนาดไม่เกิน 100 กิโลโวลต์ อาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ในการสร้างสนามไฟฟ้าคงที่บนท่อเร่งอนุภาค เพื่อใช้เร่งไอออนให้มีพลังงานสูงสุด 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตาม ท่อเร่งอนุภาคส่วนที่ต่อกับไฟฟ้าแรงดันสูงระดับ 100 กิโลโวลต์เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไอออน ซึ่งต้องอาศัยทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรงระดับ 200 โวลต์ และไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงระดับ 30 กิโลโวลต์ ในการทำงานของส่วนสร้างพลาสมาและส่วนดึงลำไอออนตามลำดับ

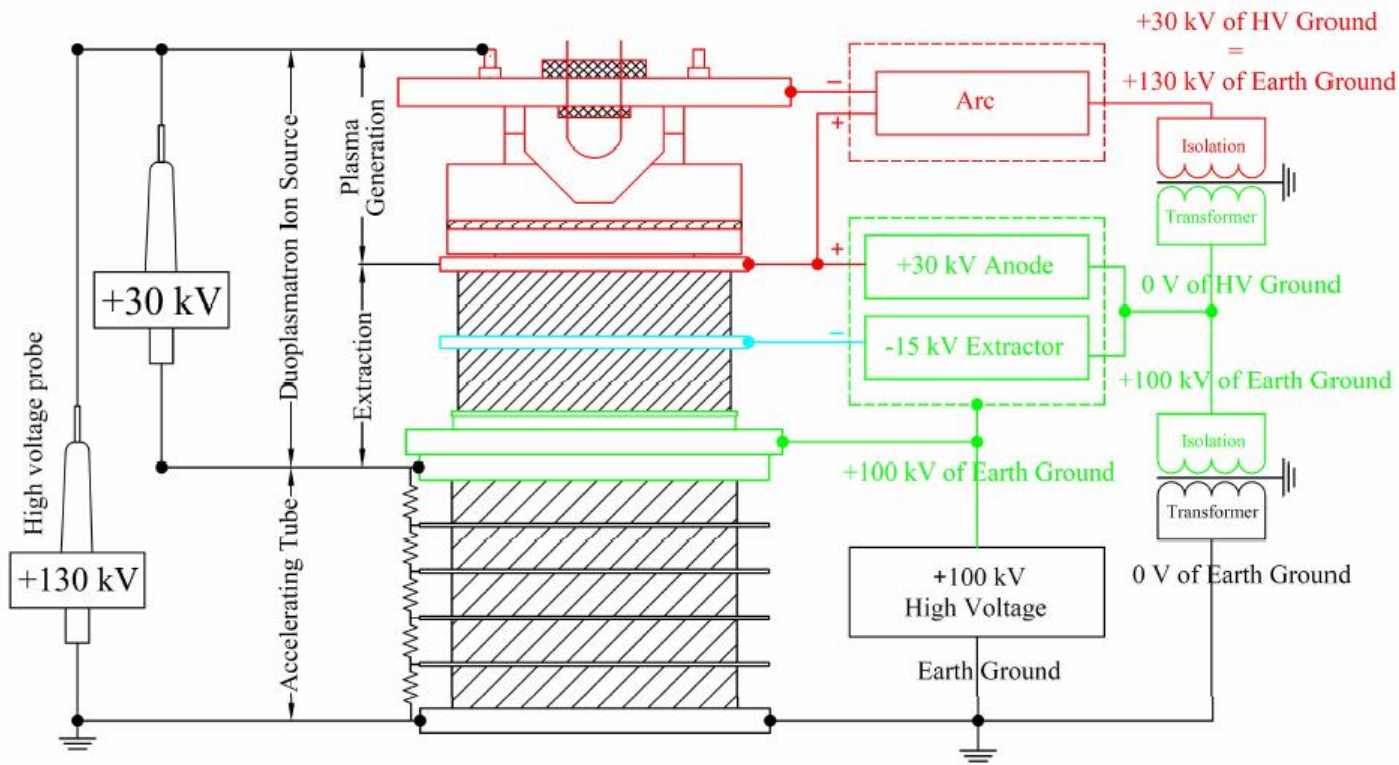
(ก) วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง

ระบบวงจรไฟฟ้าของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด แสดงดังในรูปที่ 4-9 ซึ่งตามหลักการทำงานที่ถูกต้อง เมื่อใช้ earth ground เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเทียบศักย์ไฟฟ้า และสมมติให้มีการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงค่าสูงสุดจากแหล่งจ่าย 100-kV HV anode และ extraction ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ณ ตำแหน่งต่างๆ บนโครงสร้างควรมีค่าเป็นดังนี้

- ตำแหน่งแผ่นขั้วไฟฟ้าแผ่นล่างสุดของท่อเร่งอนุภาค มีศักย์ไฟฟ้า เป็น 0 โวลต์
- ตำแหน่งแผ่นขั้วไฟฟ้าบนสุดของท่อเร่งอนุภาคและขั้วไฟฟ้าล่างสุดของแหล่งกำเนิดไอออน มีศักย์ไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์
- ตำแหน่ง extractor มีศักย์ไฟฟ้า 85 กิโลโวลต์
- ตำแหน่ง anode และส่วนสร้างพลาสมาของแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron มีศักย์ไฟฟ้า 130 กิโลโวลต์

และเมื่อใช้ศักย์ไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเทียบศักย์ไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ของโครงสร้างควรเป็นดังนี้

- ตำแหน่งแผ่นขั้วไฟฟ้าแผ่นบนสุดของท่อเร่งอนุภาค มีศักย์ไฟฟ้าเป็น 0 โวลต์
- ตำแหน่ง extractor มีศักย์ไฟฟ้า -15 กิโลโวลต์
- ตำแหน่ง anode และส่วนสร้างพลาสมาของแหล่งกำเนิดไอออนแบบ duoplasmatron มีศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์



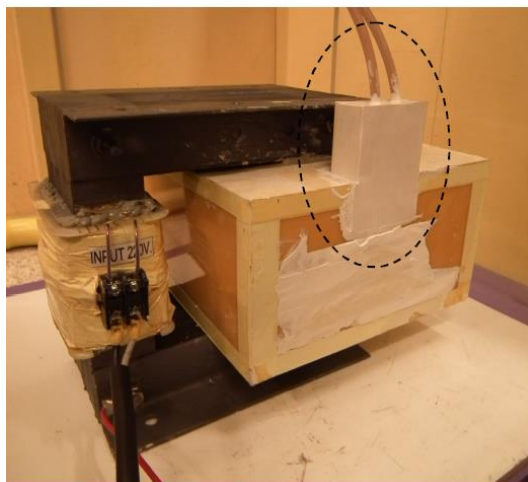
รูปที่ 4-9 วงจรไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงและระบบ ground ของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

(ข) ระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้า

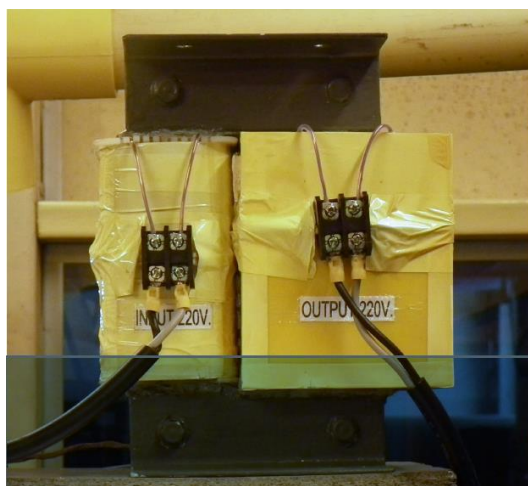
สำหรับส่วน input ของแหล่งจ่ายไฟฟ้านั้น คือ isolation transformer จากวงจรไฟฟ้าแรงดันสูง สามารถแบ่งตำแหน่งอ้างอิง หรือ ground ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็น earth ground และส่วนที่เป็น 100-kV HV ground ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ isolation transformer 2 ตัว

i) Isolation transformer ตัวที่ 1 ทำหน้าที่รับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์จากระดับ ศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์ เทียบ earth ground ที่ขดลวด primary และจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ที่อยู่บน power supply rack ทั้งหมดทำให้ขดลวด secondary มีระดับศักย์ไฟฟ้า 100 กิโลโวลต์ จึงจำเป็นต้องมี insulator ระหว่างขดลวด primary และ secondary ที่ทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ 100 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4-10

ii) Isolation transformer ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ รับไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์จากระดับ ศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์เทียบ high voltage ground ที่ ขดลวด primary และจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ให้แก่อุปกรณ์ สำหรับสร้างพลาสมาที่อยู่บน power supply rack ที่ระดับศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์เทียบ high voltage ground จึงทำให้ขดลวด secondary มีศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์เทียบกับ high voltage ground เช่นกัน ซึ่ง insulator ระหว่างขดลวด primary และ secondary จะต้องทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ 30 กิโลโวลต์ดังแสดงในรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-10 100-kV isolation transformer ผลิตโดยบริษัท KV Electronics ประเทศไทย


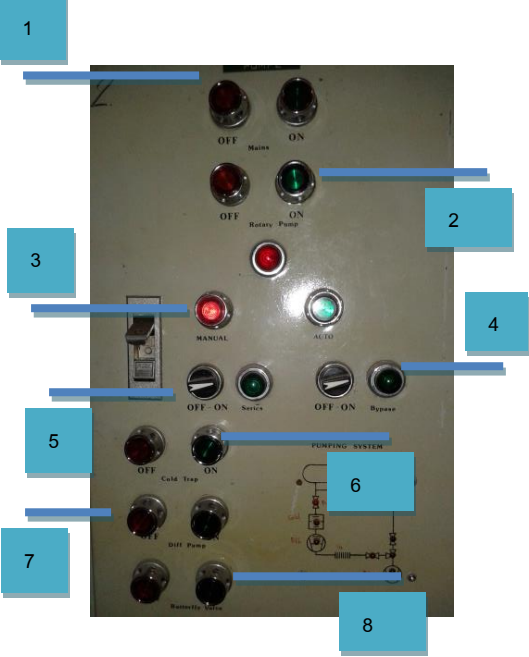



รูปที่ 4-11 30-kV isolation transformer ผลิตโดยบริษัท KV Electronics ประเทศไทย

(ค) ระบบการควบคุมการปฏิบัติการ

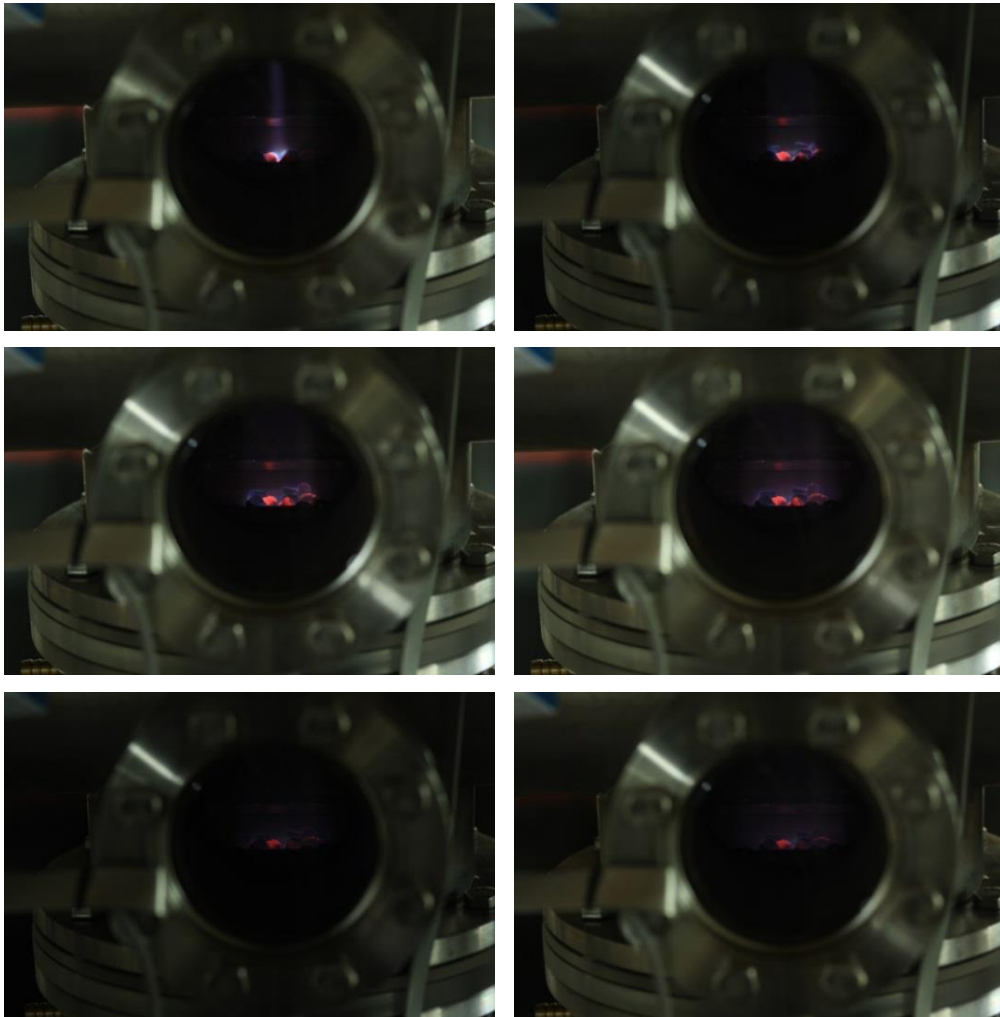
ระบบควบคุมการปฏิบัติการของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด แสดงสรุปได้ดังในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ระบบควบคุมการปฏิบัติการของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

รูปภาพ	ชื่ออุปกรณ์	ลักษณะหน้าที่
	Main Power Switch	-ควบคุมการเปิด/ปิดการจ่ายไฟฟ้าทั้งหมด -ปุ่มสีแดงคำสั่งปิด -ปุ่มสีเขียวคำสั่งเปิด
	Main Control	1.เปิด/ปิด Main Control 2.เปิด/ปิด Rotary pump 3.Manual/ Auto 4.เปิด/ปิด bypass 5. 6.เปิด/ปิด Clod trap 7.เปิด/ปิด Diffusion pump 8.Butterfly Valve เพื่อเชื่อมต่อระบบสุญญากาศ
	High current DC regulated power supply	-ควบคุมกระแสและโวลต์ของท่อเร่ง

รูปภาพ	ชื่ออุปกรณ์	ลักษณะหน้าที่
	Glassman High Voltage, INC	-ปรับไฟก๊สของลำไอออน
	1. Active Gauge Controller 2. power supply 3. power supply 4. High Current DC regulated power supply	1. มาตรการวัดความดันที่ห้องแก๊สไอออน 2. ควบคุมปริมาณกระแสและโวลต์ของ 3. ควบคุมปริมาณกระแสและโวลต์ของ ARC 4. ควบคุมปริมาณกระแสและโวลต์ของขดลวดโซลินอยด์
	Active Gauge Controller	-มาตรการวัดความดันที่ห้องยิงลำไอออน

จุดเด่นของเครื่องเร่งลำไอออนขนาดกะทัดรัดเครื่องนี้ หลังการปรับปรุง คือ สามารถปรับลำไอออนให้มีขนาดต่างๆ ได้ ทำให้ลำไอออนครอบคลุมชิ้นตัวอย่างจริงๆ เป็นการลดการสูญเสียลำไอออนโดยไม่จำเป็น การปรับขนาดลำไอออนทำได้ไม่ยาก โดยการปรับศักย์ไฟฟ้าที่จะจ่ายให้กับอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่โฟกัสลำไอออน อนึ่ง การโฟกัสลำไอออนให้มีขนาดเล็กลง เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนที่ฝังเข้าไปในชิ้นตัวอย่าง สามารถเร่งอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับชิ้นตัวอย่างได้อีกด้วย ลักษณะของลำไอออนที่ถูกปรับให้มีขนาดต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12 ลักษณะของลำไอออนที่ถูกโฟกัสให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน สำหรับยิงชิ้นตัวอย่างในแต่ละขนาด จะสังเกตเห็นพลอยมีการเรืองแสงเมื่อถูกยิงฝังด้วยลำไอออน [20]

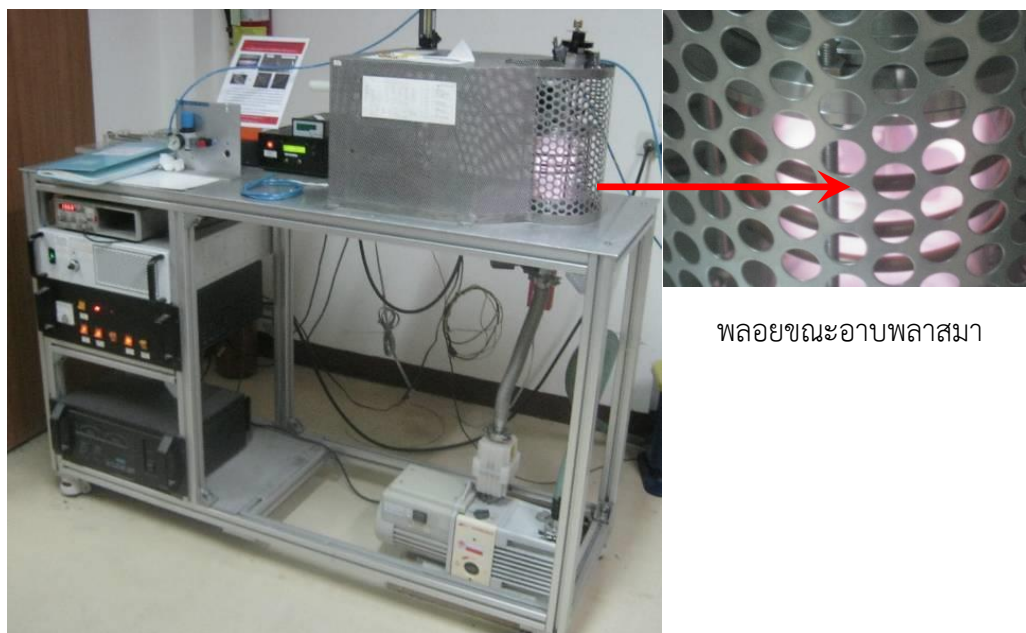
ผลการปรับปรุงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ดังกล่าว ทำให้ได้เครื่องมือ ตลอดจนเทคนิคที่สามารถสร้างไอออน ที่ให้พลังงานที่ผลิตแล้ว ผ่านระบบการเร่งให้มีความเร็วสูง ที่มีปริมาณไอออนจำนวนมากพอที่จะวิ่งเข้าชนกับพลอย เพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงความสะอาดในเนื้อพลอย และการกำหนดสีของพลอยได้อย่างเหมาะสม การปรับปรุงเหล่านี้จะทำให้ผู้ประกอบการทั่วไปสามารถใช้เครื่องได้ง่ายขึ้นด้วย และจะส่งผลให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมของตน **โดยในอนาคตอันใกล้ คณะผู้วิจัยจะเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนได้เข้ามาทดลองใช้เครื่องฯ สำหรับปรับปรุงคุณภาพพลอยของตนได้**

4.2 การปรับปรุงเครื่องทำพลาสมาสำหรับงานพลอย

4.2.1 เครื่อง plasma cleaning

การปรับปรุงเครื่อง plasma cleaning สำหรับงานพลอย โดยอาศัยเครื่องนี้เป็นเครื่องทำความสะอาดชิ้นงาน โดยใช้พลาสมาของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ขึ้นกับชนิดชิ้นงาน เมื่อก๊าซถูกทำให้เป็นพลาสมา ซึ่งจะกลายเป็นอนุภาคที่มีประจุ ประจุของพลาสมาจะมีปฏิกิริยา (interaction) กับสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานนั้น เช่น non-visible oil และ อะตอมเล็กๆ อื่นๆ ที่ยึดเหนี่ยวอย่างไม่แข็งแรง (dangling bond) บนผิวตัวอย่าง ทำให้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้หลุดออก ผลพลอยได้เพิ่มเติมคือประจุของพลาสมา อาจทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่บริเวณผิวของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามชนิดของพลาสมานั้น

คณะผู้วิจัยได้ปรับปรุงเครื่อง Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลอยได้ (รูปที่ 4-13) เครื่องที่ใช้เป็นเครื่อง ระบบผลิตพลาสมาแบบความดันต่ำ (ประมาณ 1×10^{-2} mbar) ที่มีห้องประยุกต์พลาสมาขนาด 1 ลิตร ระบบประยุกต์ขนาดเล็ก เพื่องานวิจัยและพัฒนาการประยุกต์พลาสมาแก่วัสดุทุกรูปแบบ และจากก๊าซทุกประเภท สร้างพลาสมาด้วยคลื่นวิทยุ (13.57 MHz) สามารถปรับความเข้มข้นของพลาสมาได้

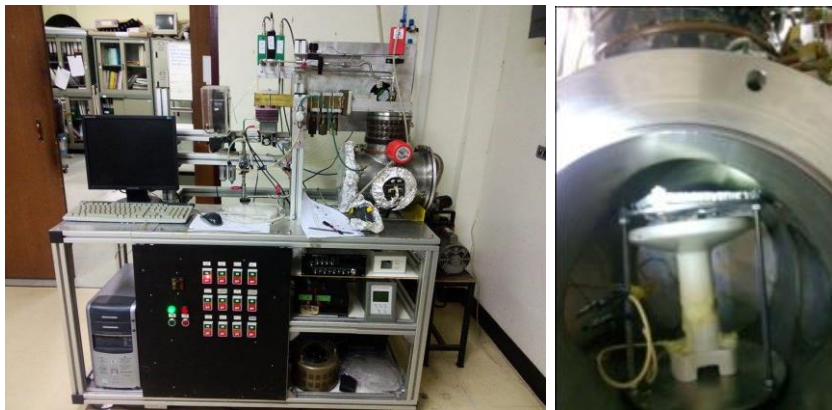


รูปที่ 4-13 Low pressure plasma cleaning (LPP) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขนาดบรรจุ 1 ลิตร

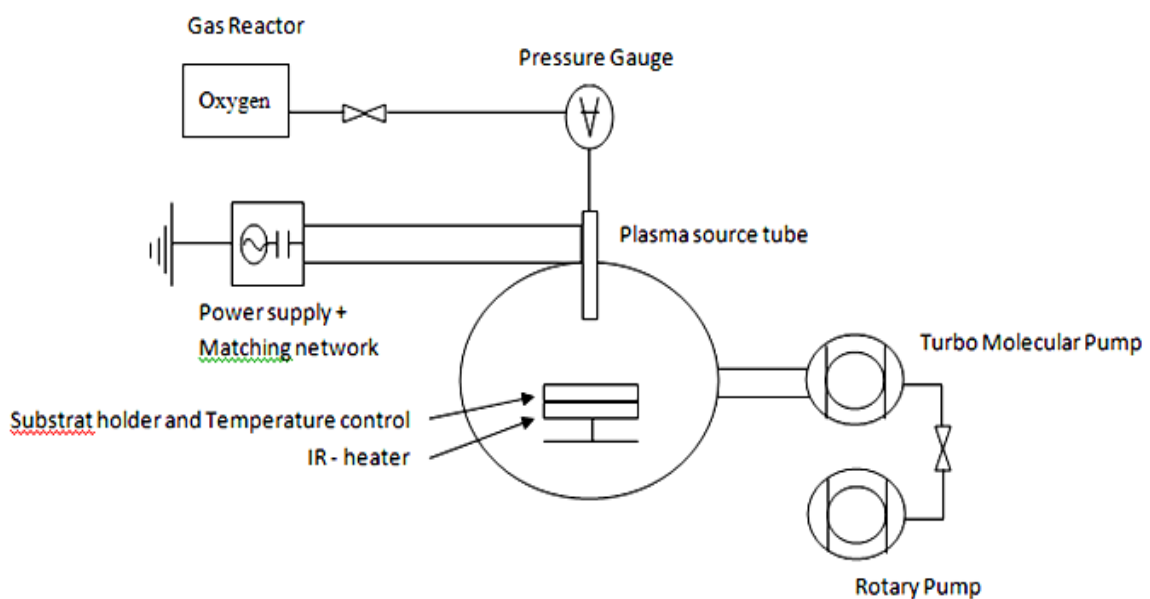
4.2.2 เครื่องพลาสมาบ่อ่อน

โดยทั่วไปหลังไอออนอิมพลาเนชัน ชิ้นตัวอย่างมักจะต้อนนำมาอบที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อเพิ่มพลังงานกระตุ้นให้กับปฏิกิริยาระหว่างไอออนและอะตอมของชิ้นตัวอย่าง ในงานวิจัยนี้ นอกจากจะใช้การอบอ่อนด้วยความร้อนจากเตาอบธรรมดาแล้ว ยังทดลองใช้เทคนิคอบอ่อนด้วยพลาสมาที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง หรือ เรียกว่าเทคนิคพลาสมาบ่อ่อนอีกด้วย โดยใช้พลาสมาของออกซิเจน ไนโตรเจน หรือ อาร์กอน ขึ้นกับชนิดชิ้นงาน โดยที่ประจุของพลาสมาจะมีปฏิกิริยากับสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานนั้น ทำให้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้หลุดออก และยังทำให้โครงสร้างของโมเลกุลที่บริเวณผิวของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงตามชนิดของพลาสมานั้น การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงกว่าอุณหภูมิห้อง ยิ่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น

คณะผู้วิจัย ได้ปรับปรุงเครื่อง Atomic layer deposition (ALD) ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับพลอยได้ (รูปที่ 4-14) ไดอะแกรมแสดงวิธีการสร้างพลาสมาแสดงดังในรูปที่ 4-15



รูปที่ 4-14 เครื่องพลาสมาบ่อ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

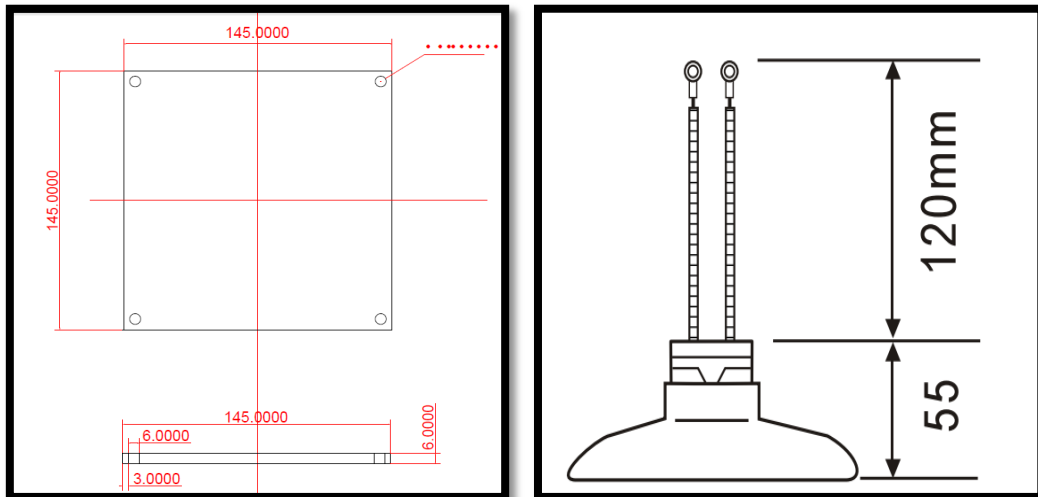


รูปที่ 4-15 ไดอะแกรมเครื่องพลาสมาบ่อ่อน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4.3 การพัฒนาเครื่องทำความร้อนติดตั้งในห้องยึงฝังบำไอออน

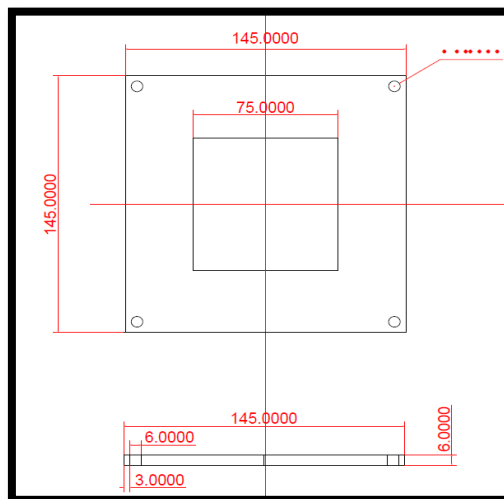
4.3.1 การออกแบบเครื่องทำความร้อนและระบบควบคุมการทำงาน

ในการพัฒนาห้องยึงฝังบำไอออน ได้เพิ่มส่วน heater สำหรับให้ความร้อนเพื่ออุ่นพลอยขณะยึงฝังบำไอออน โดยระบบนี้ได้ออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ทั้งหมดในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยส่วนให้ความร้อนแบบขดลวด ที่วางถาดยึงพลอยทำด้วยทองแดง และส่วนควบคุมการทำงาน ที่สามารถปรับการคงตัวของอุณหภูมิได้ถึงประมาณ 500 องศาเซลเซียส เครื่องทำความร้อนที่ออกแบบประกอบด้วยสามชั้น ดังรูปที่ 4-16



ก.

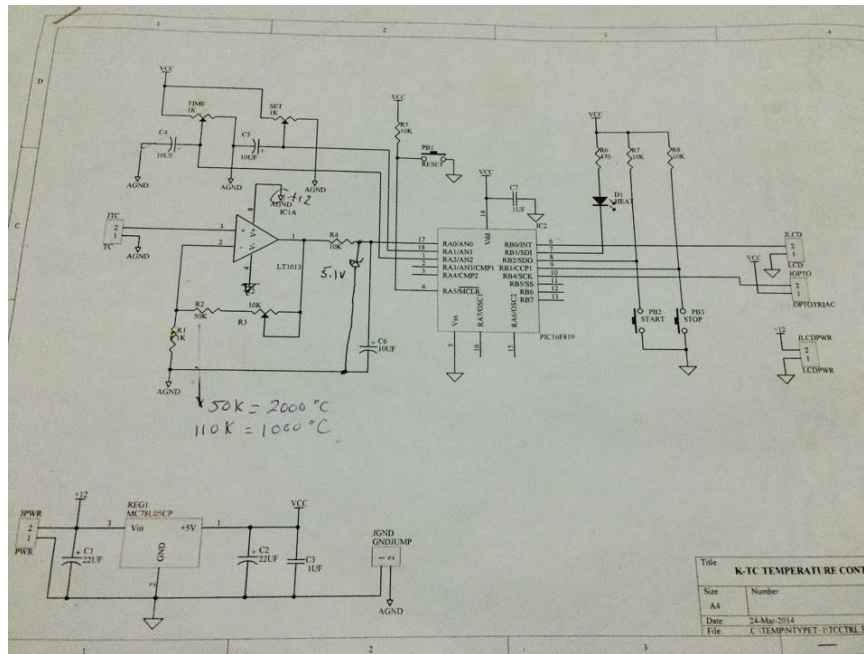
ข.



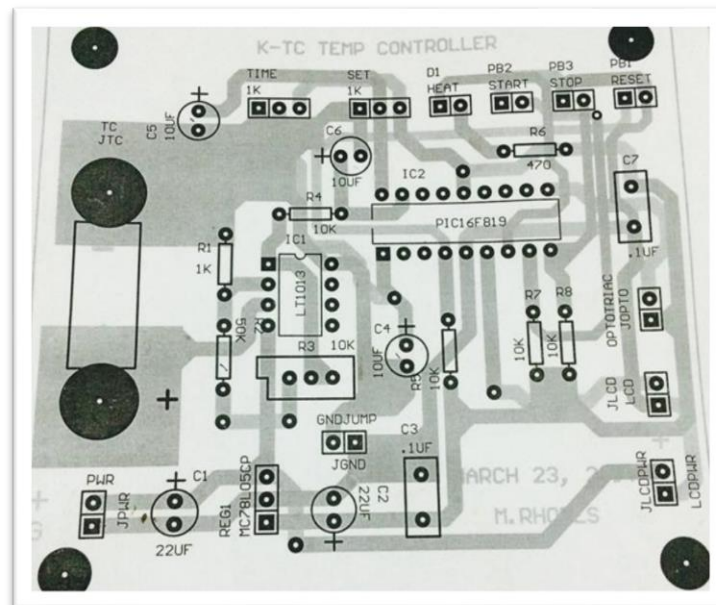
ค.

รูปที่ 4-16 แบบสร้างเครื่องทำความร้อน (ก) ชั้นที่ 1 ทำด้วยสแตนเลส, (ข) ชั้นที่ 2 Heater รุ่น ELW-4 และ (ค) ชั้นที่ 3 ทำด้วยสแตนเลส

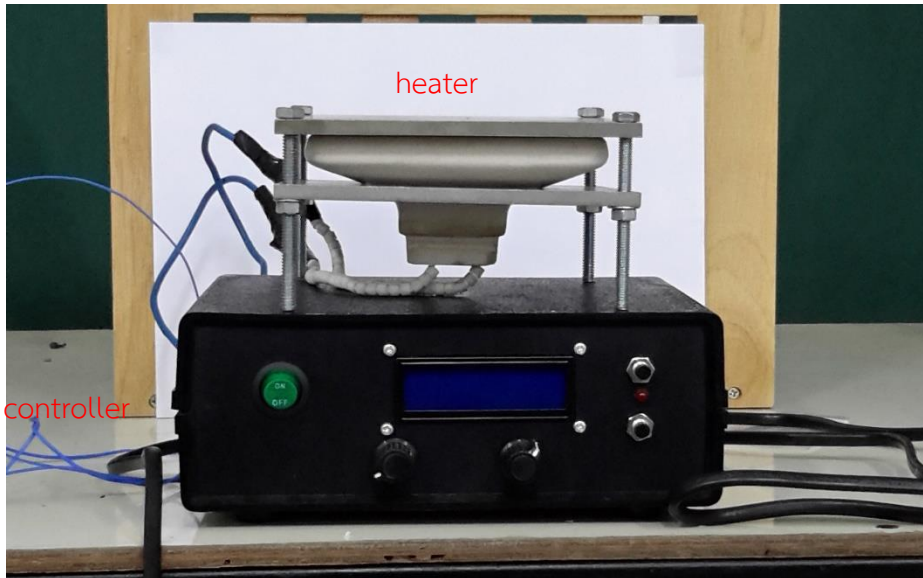
ในส่วนของระบบควบคุมการทำงาน ได้ออกแบบและจัดทำขึ้นเองเช่นกัน โดยออกแบบให้เครื่องทำความร้อนตัดไฟที่จ่ายให้ขดลวดนำความร้อน เมื่ออุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนเท่ากับหรือสูงกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ และจะเริ่มจ่ายไฟ เมื่ออุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนต่ำกว่าที่ตั้งไว้ 5 องศาเซลเซียส ระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 4-17, และ 4-18 เครื่องให้ความร้อนและระบบควบคุมที่ประกอบแล้วเสร็จพร้อมใช้งาน แสดงดังในรูปที่ 4-19



รูปที่ 4-17 ไดอะแกรมวงจรเครื่องทำความร้อน



รูปที่ 4-18 ไดอะแกรมวงจรเครื่องทำความร้อนบนแผ่นวงจรพิมพ์

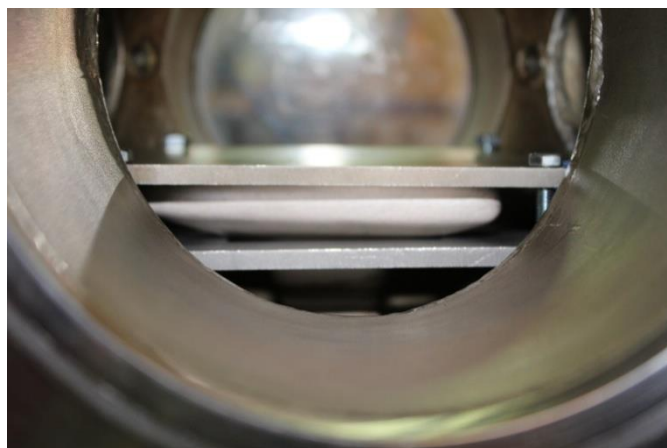


รูปที่ 4-19 ระบบอุ่นฟลอยซ์อะลูมิเนียม ซึ่งจะนำไปประกอบและติดตั้งในห้องฟลอยซ์ของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

4.3.2 การทดสอบการใช้งานในระบบสุญญากาศ

เครื่องทำความร้อนได้รับการติดตั้งภายในห้องฟลอยซ์อะลูมิเนียม ของตู้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด เพื่อทดสอบใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4-20 ชั้นแรกได้ทดสอบการใช้งานในระบบสุญญากาศ โดยทดลองตั้งอุณหภูมิที่ 80 °C ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-3 และกราฟในรูปที่ 4-21

จากรูปที่ 4-21 จะเห็นว่าอุณหภูมิสูงสุด 120 และต่ำสุด 95 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากที่ตั้งไว้ +20 องศาเซลเซียส และ -5 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการคายความร้อนของสแตนเลสทำไม่ได้



รูปที่ 4-20 ติดตั้งเครื่องทำความร้อนในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด

ตารางที่ 4-3 ผลการบันทึก เวลา อุณหภูมิ และ ความดัน ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนที่ 80 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (torr)
0	0	6.50E-05
1	2	7.50E-05
2	6	9.50E-05
3	22	2.50E-04
4	39	1.30E-04
5	50	1.20E-04
6	58	1.10E-04
7	63	1.10E-04
8	70	1.00E-04
9	72	9.50E-05
10	74	9.50E-05
11	75	9.50E-05
12	76	9.50E-05
13	77	9.00E-05
14	78	9.50E-05
15	78	9.00E-05
16	79	9.00E-05
17	79	9.00E-05
18	79	9.00E-05
19	79	9.00E-05
20	79	9.00E-05
21	79	9.00E-05
22	79	9.00E-05
23	79	8.50E-05
24	79	8.50E-05
25	78	8.50E-05
26	78	8.50E-05
27	78	8.50E-05
28	77	8.50E-05
29	77	8.50E-05
30	76	8.50E-05
31	76	8.00E-05
32	75	8.00E-05
33	75	8.00E-05
34	74	8.00E-05
35	74	8.00E-05
36	73	8.00E-05
37	73	8.00E-05

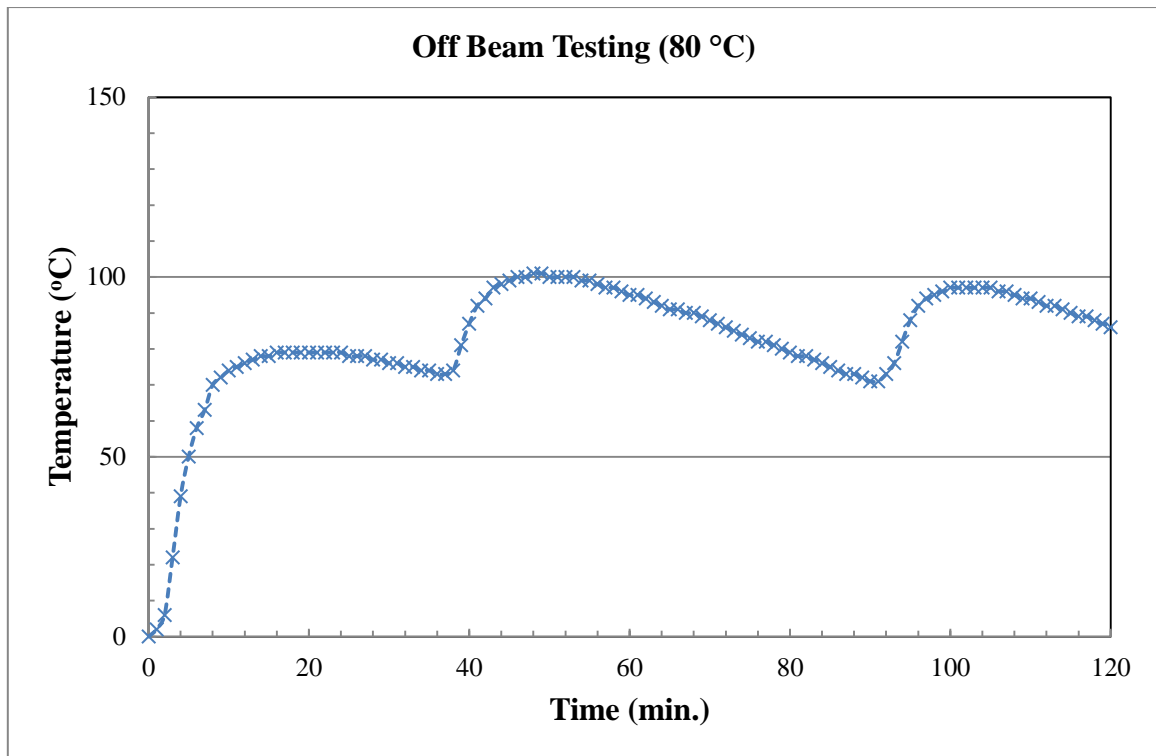
38	74	9.00E-05
39	81	9.00E-05
40	87	9.00E-05
41	92	9.00E-05
42	94	9.00E-05
43	97	9.50E-05
44	98	9.50E-05
45	99	9.50E-05
46	100	9.50E-05
47	100	1.00E-04
48	101	1.00E-04
49	101	1.00E-04
50	100	1.00E-04
51	100	1.00E-04
52	100	1.00E-04
53	100	1.00E-04
54	99	1.00E-04
55	99	1.00E-04
56	98	1.00E-04
57	97	1.00E-04
58	97	9.50E-05
59	96	9.50E-05
60	95	9.50E-05
61	95	9.50E-05
62	94	9.50E-05
63	93	9.50E-05
64	92	9.00E-05
65	91	9.00E-05
66	91	9.00E-05
67	90	9.00E-05
68	90	9.00E-05
69	89	9.00E-05
70	88	9.00E-05
71	87	9.00E-05
72	86	9.00E-05
73	85	9.00E-05
74	84	8.50E-05
75	83	8.50E-05
76	82	8.50E-05
77	82	8.50E-05

78	81	8.50E-05
79	80	8.50E-05
80	79	8.50E-05
81	78	8.50E-05
82	78	8.50E-05
83	77	8.00E-05
84	76	8.00E-05
85	75	8.00E-05
86	74	8.00E-05
87	73	8.00E-05
88	73	8.00E-05
89	72	8.00E-05
90	71	8.50E-05
91	71	8.50E-05
92	73	8.50E-05
93	76	9.00E-05
94	82	9.00E-05
95	88	9.00E-05
96	92	9.00E-05
97	94	9.00E-05
98	95	9.00E-05
99	96	9.00E-05
100	97	9.50E-05
101	97	9.50E-05
102	97	9.50E-05
103	97	9.50E-05
104	97	9.50E-05
105	97	1.00E-04
106	96	1.00E-04
107	96	1.00E-04
108	95	1.00E-04
109	94	1.00E-04
110	94	1.00E-04
111	93	9.50E-05
112	92	9.50E-05
113	92	9.50E-05
114	91	9.50E-05
115	90	9.00E-05
116	89	9.00E-05
117	89	9.00E-05

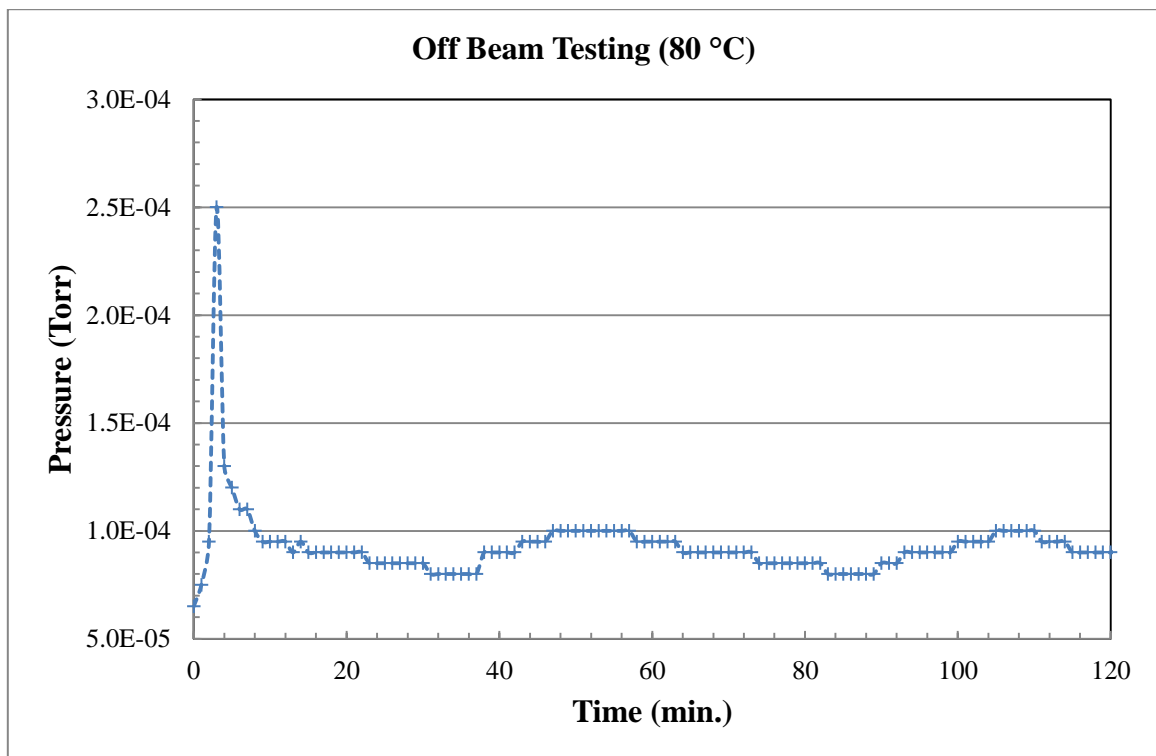
118	88	9.00E-05
119	87	9.00E-05
120	86	9.00E-05
121	85	9.00E-05
122	84	8.50E-05

123	83	8.50E-05
124	82	8.50E-05
125	82	8.50E-05
126	81	8.50E-05
127	80	8.50E-05

128	79	8.50E-05
129	78	8.50E-05
130	78	8.50E-05
131	77	8.00E-05



(ก)



(ข)

รูปที่ 4-21 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิ heater ที่ 80 °C

4.3.3 การทดสอบการใช้งานขณะยิงไอออนในสภาวะความร้อนสูง

ทดลองยิงฝึกลำไอออนที่อุณหภูมิ 120 °C ซึ่งพบว่าอุณหภูมิและความดันของห้องยิงไอออน แสดงดังในตารางที่ 4-4 และรูปที่ 4-22

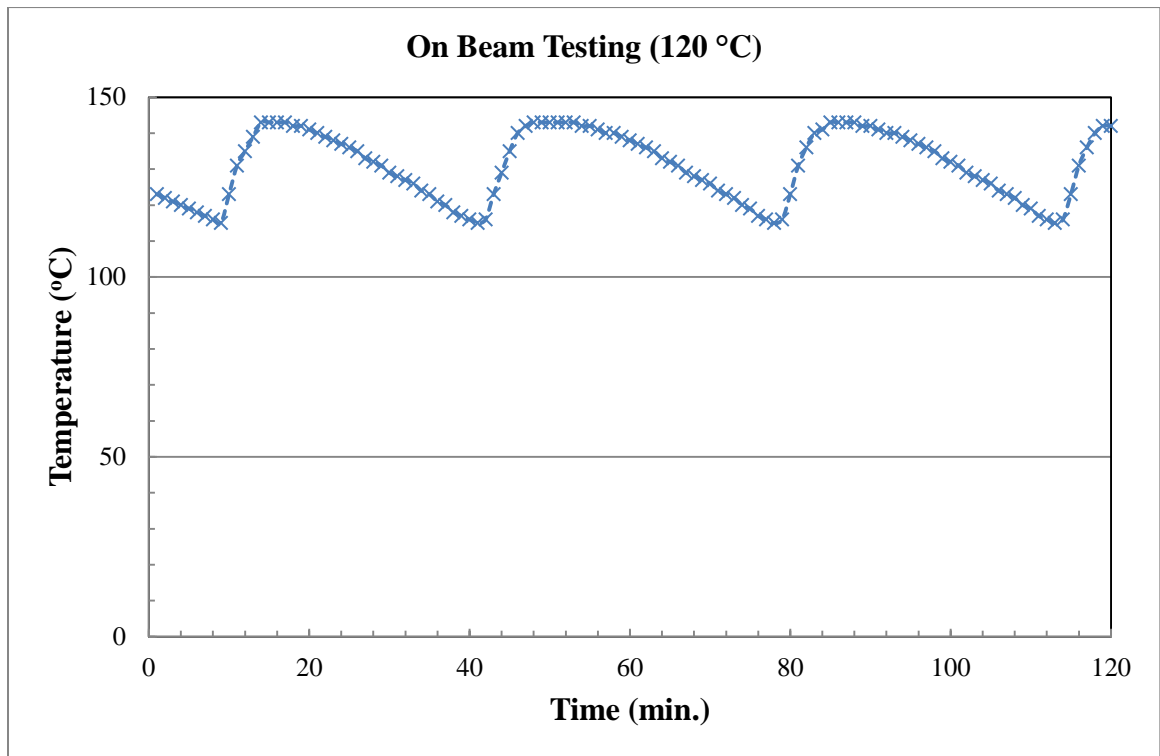
ตารางที่ 4-4 ผลการบันทึก เวลา อุณหภูมิ และ ความดัน ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัด โดยตั้งอุณหภูมิของเครื่องทำความร้อนที่ 120 °C

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (torr)						
1	123	1.90E-04	34	124	1.50E-04	69	127	1.40E-04
2	122	1.90E-04	35	123	1.50E-04	70	126	1.40E-04
3	121	1.90E-04	36	121	1.40E-04	71	124	1.30E-04
4	120	1.90E-04	37	120	1.40E-04	72	123	1.30E-04
5	119	1.80E-04	38	118	1.40E-04	73	122	1.30E-04
6	118	1.80E-04	39	117	1.40E-04	74	120	1.30E-04
7	117	1.80E-04	40	116	1.40E-04	75	119	1.30E-04
8	116	1.80E-04	41	115	1.40E-04	76	117	1.30E-04
9	115	1.90E-04	42	116	1.50E-04	77	116	1.30E-04
10	123	1.90E-04	43	123	1.60E-04	78	115	1.40E-04
11	131	2.00E-04	44	129	1.60E-04	79	116	1.40E-04
12	135	2.00E-04	45	135	1.60E-04	80	123	1.50E-04
13	139	2.00E-04	46	140	1.60E-04	81	131	1.60E-04
14	143	2.00E-04	47	142	1.70E-04	82	136	1.60E-04
15	143	2.00E-04	48	143	1.70E-04	83	140	1.60E-04
16	143	2.00E-04	49	143	1.70E-04	84	141	1.60E-04
17	143	2.00E-04	50	143	1.70E-04	85	143	1.60E-04
18	142	1.90E-04	51	143	1.70E-04	86	143	1.60E-04
19	142	1.90E-04	52	143	1.70E-04	87	143	1.60E-04
20	141	1.90E-04	53	143	1.70E-04	88	143	1.60E-04
21	140	1.90E-04	54	142	1.70E-04	89	142	1.60E-04
22	139	1.80E-04	55	142	1.60E-04	90	142	1.50E-04
23	138	1.80E-04	56	141	1.60E-04	91	141	1.50E-04
24	137	1.80E-04	57	140	1.60E-04	92	140	1.50E-04
25	136	1.80E-04	58	140	1.60E-04	93	140	1.50E-04
26	135	1.70E-04	59	139	1.60E-04	94	139	1.50E-04
27	133	1.70E-04	60	138	1.60E-04	95	138	1.50E-04
28	132	1.70E-04	61	137	1.50E-04	96	137	1.40E-04
29	131	1.70E-04	62	136	1.50E-04	97	136	1.40E-04
30	129	1.70E-04	63	135	1.50E-04	98	135	1.40E-04
31	128	1.50E-04	64	133	1.50E-04	99	133	1.40E-04
32	127	1.50E-04	65	132	1.40E-04	100	132	1.40E-04
33	126	1.50E-04	66	131	1.40E-04	101	131	1.30E-04
			67	129	1.40E-04	102	129	1.30E-04
			68	128	1.40E-04			

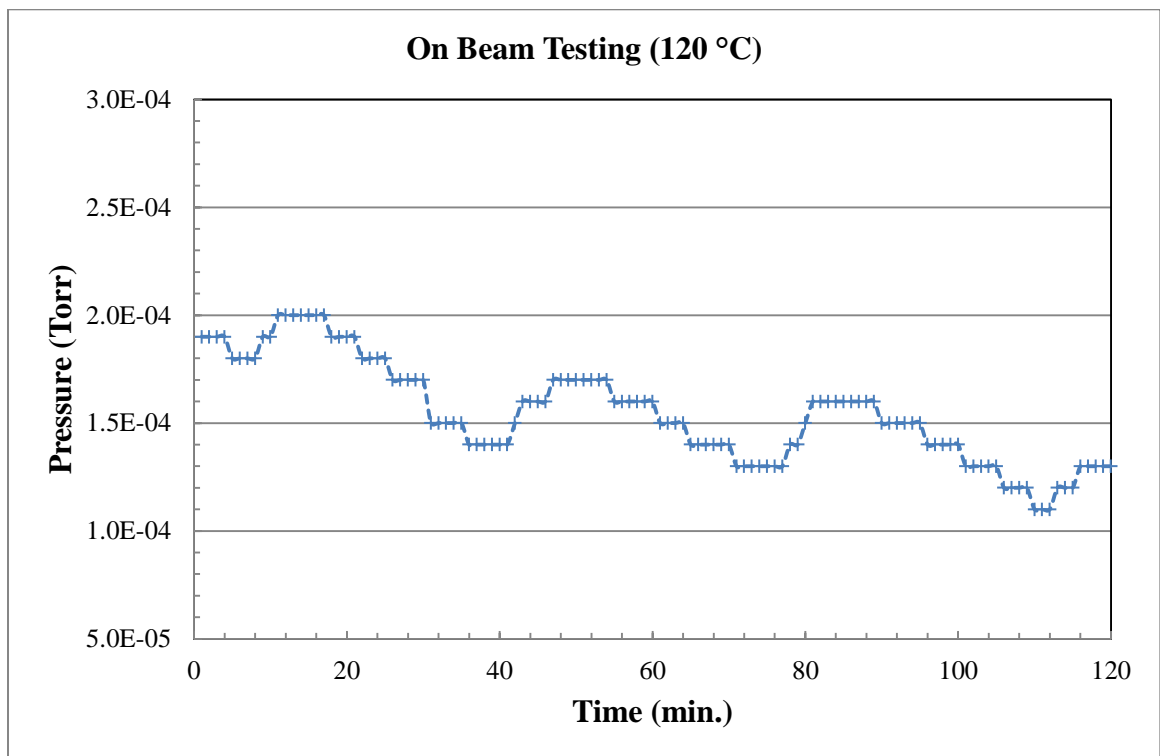
103	128	1.30E-04
104	127	1.30E-04
105	126	1.30E-04
106	124	1.20E-04
107	123	1.20E-04
108	122	1.20E-04
109	120	1.20E-04

110	119	1.10E-04
111	117	1.10E-04
112	116	1.10E-04
113	115	1.20E-04
114	116	1.20E-04
115	123	1.20E-04
116	131	1.30E-04

117	136	1.30E-04
118	140	1.30E-04
119	142	1.30E-04
120	142	1.30E-04



(ก)



(ข)




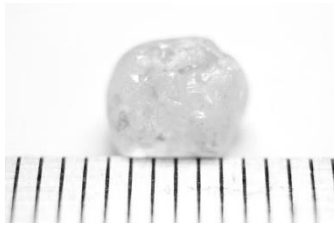


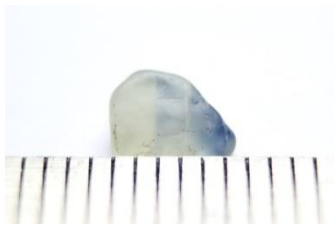





รูปที่ 4-22 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลา ในเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์แบบกะทัดรัดโดยตั้งอุณหภูมิ 120 °C

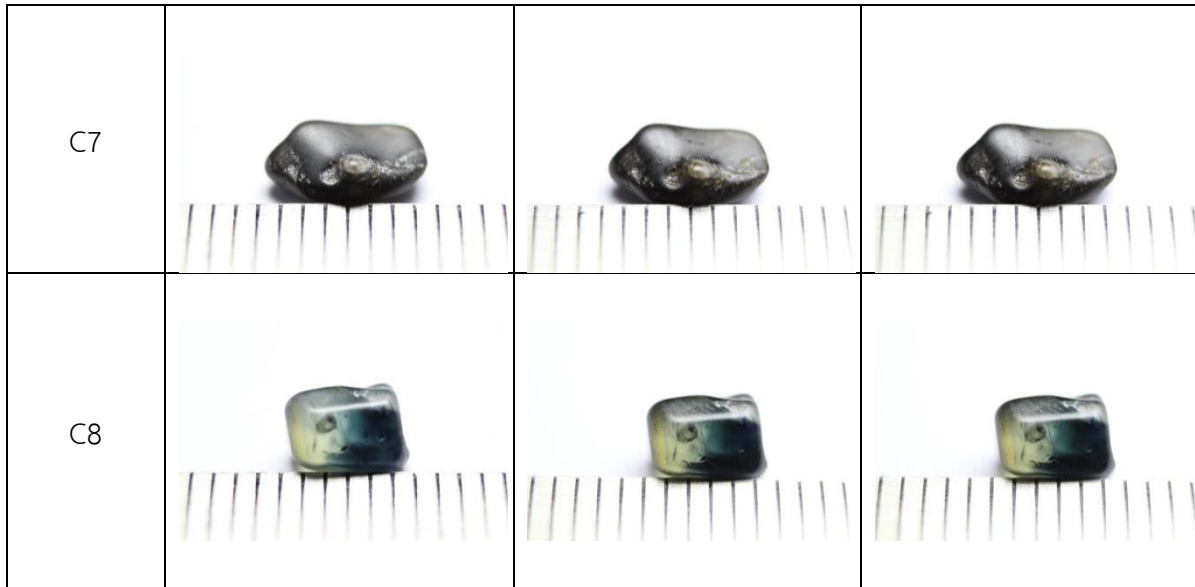
จากรูปที่ 4-22 ส่วนที่แตกต่างคืออุณหภูมิที่คลาดเคลื่อนจากที่ตั้งไว้ จากกราฟจะเห็นว่า อุณหภูมิคลาดเคลื่อน +23 องศาเซลเซียส และ -5 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิคลาดเคลื่อนมากกว่า อาจเกิดจากยิ่งไอออนมาชนแผ่นสแตนเลส (ชั้นที่ 1) ของเครื่องทำความร้อน ทำให้พลังงานจลน์ของไอออนเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ทำให้อุณหภูมิของแผ่นสแตนเลส (ชั้นที่ 1) สูงกว่าไม่ได้ยิ่งไอออน

4.4 การตรวจสอบตัวอย่างหลังยิงไอออน

ทดลองยิงพลอยตัวอย่างเพื่อเปรียบเทียบการส่องผ่านของแซปไฟร์ก่อนและหลังการยิงฝังลำไอออน ด้วยไนโตรเจนไอออน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พลังงาน 50 keV ที่อุณหภูมิ 120 °C ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4-5

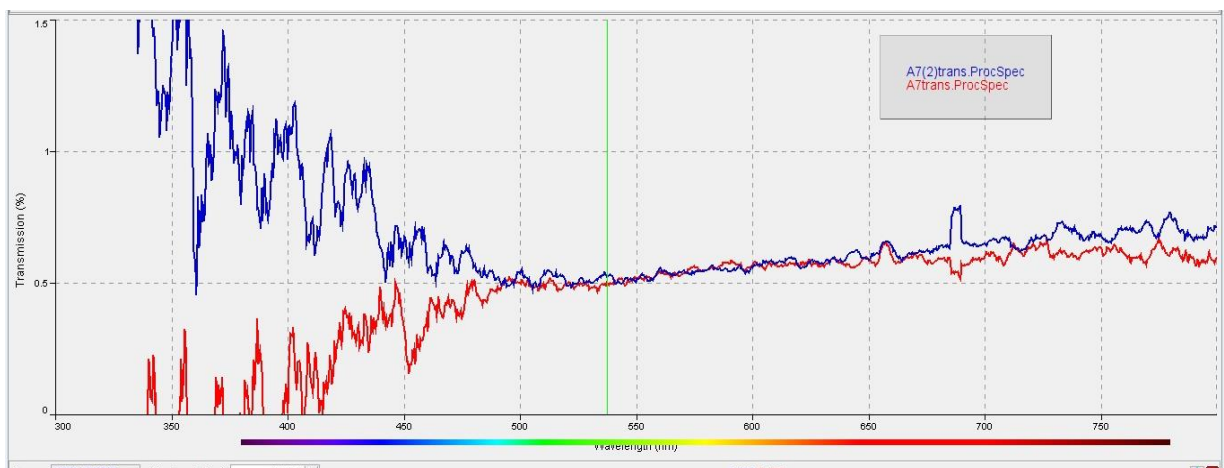
ตารางที่ 4-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงสีและลักษณะทางกายภาพของไพลิน เมื่อ Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (N_2^+) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พลังงาน 50 KeV ที่อุณหภูมิ 120 °C

ชื่อตัวอย่าง	ก่อนยิง	หลังยิง	หลังพลาสมา
A7			
A8			
B7			
B8			



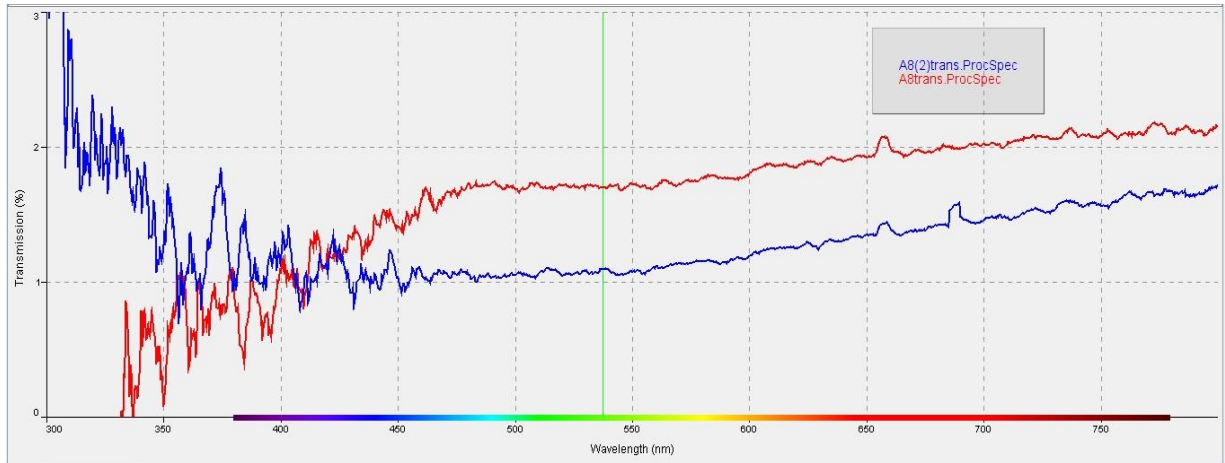
จากการตรวจสอบด้วยกล้อง optical microscope พบว่า ตัวอย่าง A7 หลังยิงไอออนมีเขม่าเกาะที่ผิว ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากสุญญากาศภายในไม่ดีนัก ทำให้พลอยมีลักษณะทึบแสงกว่าเดิม จึงได้นำไปทำพลาสมาเพื่อกำจัดเขม่า และหลังจากทำพลาสมากลับมาเหมือนก่อนยิงไอออนแต่ทึบแสงกว่า ตัวอย่าง A8 หลังยิงไอออนมีลักษณะทึบแสงกว่าเดิม มีเขม่าเกาะที่ผิว และหลังจากทำพลาสมากลับมาเหมือนก่อนยิงไอออน แต่ทึบแสงกว่า ตัวอย่าง B7 หลังยิงไอออนมีสีเข้มกว่าก่อนยิงไอออน (ทึบแสงมากขึ้น) และหลังจากทำพลาสมา โปร่งแสงขึ้น ตัวอย่าง B8 หลังยิงไอออนมีสีเข้มกว่าก่อนยิงไอออน (ทึบแสงมากขึ้น) และหลังจากทำพลาสมา โปร่งแสงขึ้น ตัวอย่าง C7 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ตัวอย่าง C8 หลังจากยิงไอออนทึบแสงกว่าเดิม และทำพลาสมาโปร่งแสงขึ้น

ตัวอย่างทั้งหมดได้นำไปวัดการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Optical Spectrophotometer ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4-23 ถึง 4-28



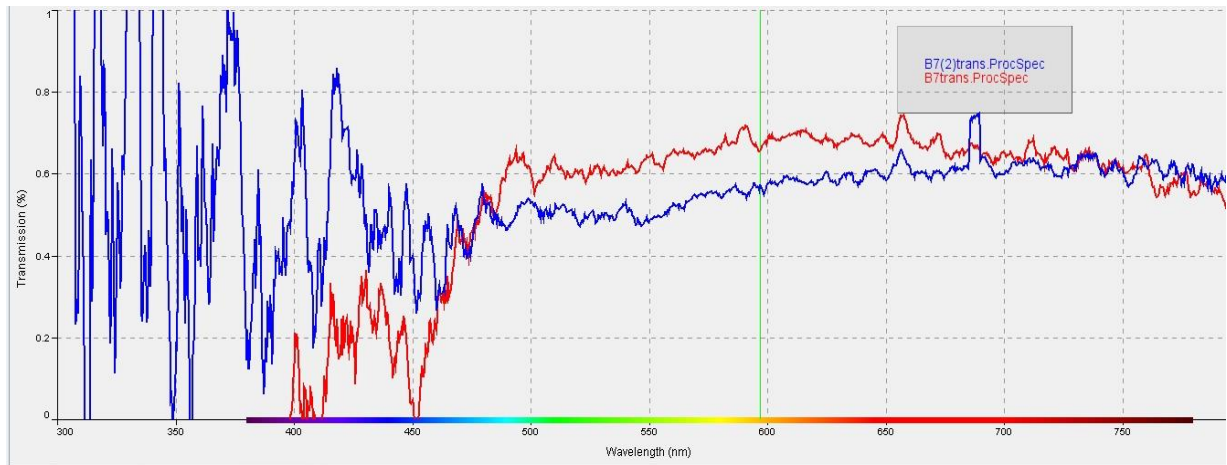
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง A7 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

- มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นช่วง 380 – 480 นาโนเมตร แสดงความเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมากขึ้น



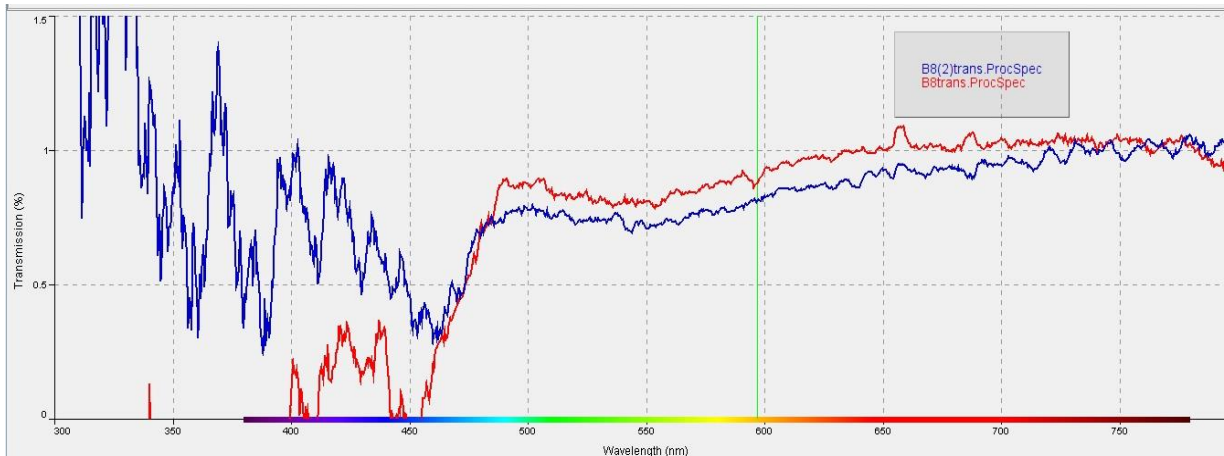
รูปที่ 4-24 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง A8 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

➤ มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านลดลงแสดงว่าทึบแสงมากขึ้น



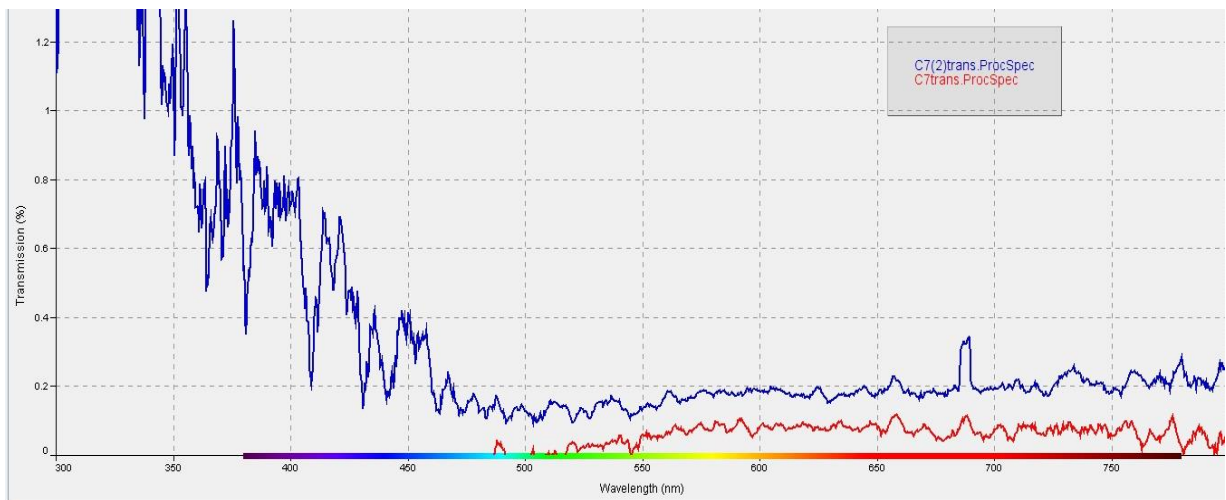
รูปที่ 4-25 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง B7 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

➤ มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นช่วง 380 – 480 นาโนเมตร แสดงความเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมากขึ้น



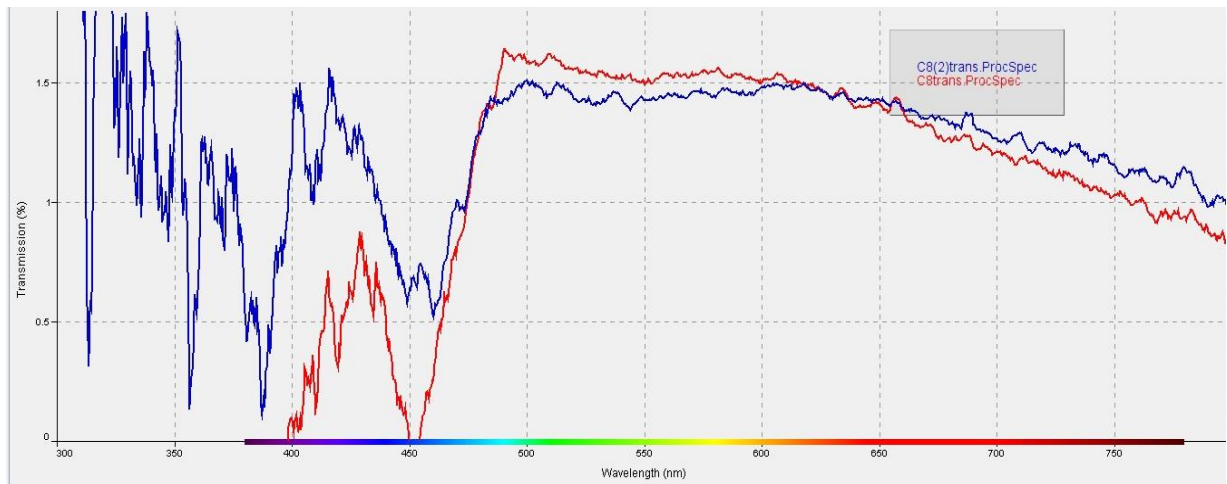
รูปที่ 4-26 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง B8 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

- มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นช่วง 380 – 480 นาโนเมตร แสดงความเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมากขึ้น



รูปที่ 4-27 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง C7 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

- เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นช่วง 380 – 480 นาโนเมตร แสดงความเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมากขึ้นและช่วงแสงอื่นที่ตามองเห็นมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแสดงว่าโปร่งแสงขึ้น



รูปที่ 4-28 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงของตัวอย่าง C8 ก่อน (สีแดง) และหลัง Implantation ด้วยไนโตรเจนไอออน (น้ำเงิน)

- เปอร์เซ็นต์การส่องผ่านเพิ่มขึ้นช่วง 380 – 480 นาโนเมตร แสดงความเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงมากขึ้น

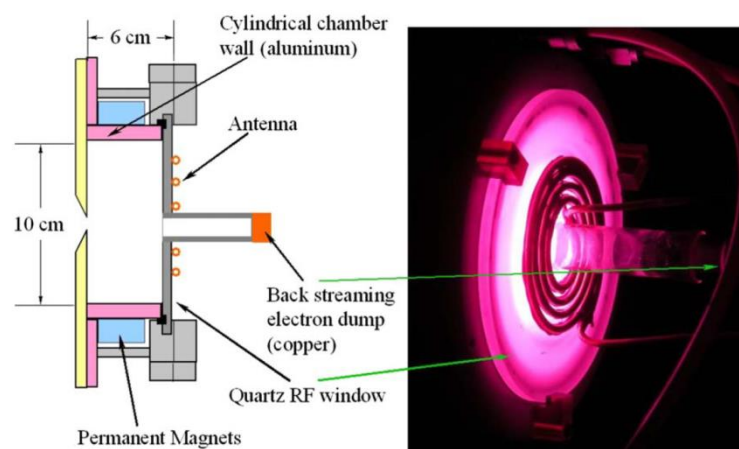
4.5 การออกแบบเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงาน SMEs

คณะผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงาน SMEs โดยการปรับปรุงจากเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ขนาดกะทัดรัด ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สามารถทำงานได้ดีในระดับหนึ่ง แต่ยังคงต้องปรับแต่งเพื่อให้งบประมาณอยู่ในกรอบของ SMEs ได้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้มีเฉพาะองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับเครื่องเร่งเท่านั้น เพื่อให้การใช้งานและการดูแลรักษาเป็นไปโดยสะดวก **และอยู่ในวงเงิน 5 ล้านบาทต่อเครื่อง** องค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

4.5.1 แหล่งกำเนิดไอออน

ในการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยเทคโนโลยีลำไอออน เพื่อสร้างสภาวะรีดักชัน และออกซิเดชัน ให้กับพลอย เฉพาะไอออนของไนโตรเจนและออกซิเจนเท่านั้นที่จำเป็นต้องใช้ แหล่งกำเนิดไอออนที่สามารถนำมาใช้กับเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับปรับปรุงคุณภาพพลอยมีได้หลายแบบ คณะผู้วิจัยเลือกใช้แหล่งกำเนิดไอออนแบบอาร์เอฟ (RF Source) เนื่องจากแหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้ใช้วิธีอาร์คดิสชาร์จด้วยคลื่น RF จึงไม่จำเป็นต้องใช้ไส้ฟิลาเมนต์ ตัดปัญหาการปนเปื้อนที่อาจจะเกิดจากวัสดุทำไส้ฟิลาเมนต์ ที่สำคัญคือการดูแลรักษาทำได้อย่างไม่ยุ่งยาก มีช่วงการ maintenance ที่ยาวนาน และเป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่สามารถสร้างไอออน จากอาร์กอน ออกซิเจน และก๊าซ reactive ชนิดอื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในงานพลอยได้อย่างมีประสิทธิภาพ แหล่งกำเนิดไอออนชนิดนี้สามารถสร้างไอออนแบบ monoenergetic ได้ทั้งในสภาวะ inert และ oxidizing ข้อดีของแหล่งกำเนิดไอออนแบบนี้คือ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนนัก อยู่ในวิสัยที่สามารถพัฒนาขึ้นมาใช้งานได้เองภายในประเทศ

แหล่งกำเนิดแบบอาร์เอฟผลิตจากหลากหลายบริษัท โดยมีรูปแบบหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันไป ที่สำคัญคือรูปแบบการจัดวาง antenna สำหรับนำสัญญาณอาร์เอฟ โดยมีทั้งแบบจัดวาง antenna ไว้ภายใน (internal antenna) จัดวาง antenna ไว้ภายนอก (external antenna) ซึ่ง antenna อาจจะเป็นแบบ helicoid หรือ planar ชนิดที่จัดวาง antenna ไว้ภายนอกจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่า แต่จะมีปัญหาเรื่องอิเล็กตรอนย้อนกลับ (back streaming electron) ทำให้แผ่นรองหลังหัวจ่ายชำรุด คณะนักวิจัยของ Lawrence Berkeley National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา [24] ได้พัฒนาแหล่งกำเนิดไอออนแบบอาร์เอฟแบบ external planar antenna โดยได้ติดตั้งท่อแก้ว quartz ที่มีแผ่นทองแดงจุกอยู่ด้านหลัง สำหรับเป็นที่ทิ้งอิเล็กตรอนย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4-29



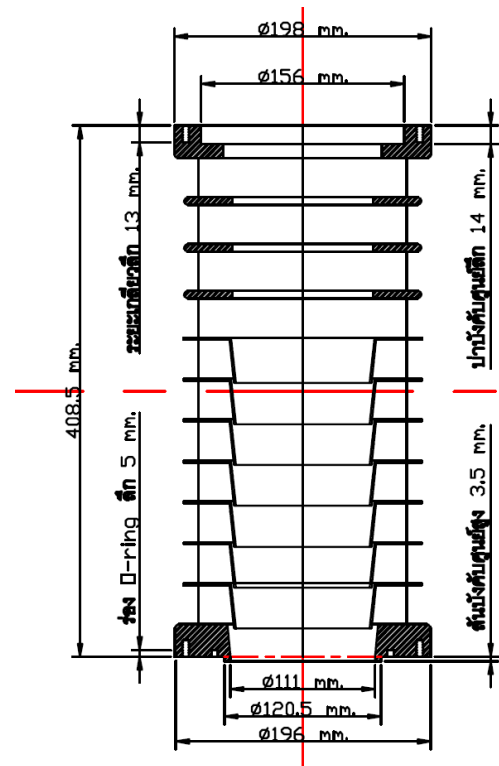
รูปที่ 4-29 (ซ้าย) โดอะแกรมของแหล่งกำเนิดไอออนแบบอาร์เอฟ พัฒนาโดย Lawrence Berkeley National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา (ขวา) รูปถ่ายแหล่งกำเนิดไอออนขณะใช้งานจริง [24]

ไอออนที่สร้างขึ้นภายในห้องดีสชาร์จจะถูกดึงและโฟกัสด้วยอิเล็กโทรดดึง (Extraction electrode) และอิเล็กโทรดโฟกัส (Focusing electrode) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งกำเนิดไอออน เพื่อให้ได้ไอออนที่มีพลังงานเฉพาะค่าหนึ่งที่ต้องการ (ปกติอยู่ที่ประมาณ 20-30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) และสามารถวิ่งผ่านช่องแคบๆ ของท่อเร่งไปสู่ห้องยิงฝังไอออนได้

4.5.2 ท่อเร่งลำไอออน (accelerating tube)

เมื่อลำไอออนออกจากแหล่งกำเนิดไอออน จะวิ่งต่อไปยังท่อเร่ง ที่ปลายข้างหนึ่งต่อกับศักย์ไฟฟ้าแรงสูง และปลายอีกข้างหนึ่งต่อกับกราวด์ ไอออนจะได้รับพลังงานเพิ่มที่นี้เป็นครั้งสุดท้าย ก่อนจะถูกนำเข้าไปสู่ห้องเป่าเพื่อให้ฝังลงบนชิ้นงานต่อไป ท่อเร่งลำไอออนเป็นแบบไฟฟ้าสถิต (electrostatic acceleration tube) ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะถูกสร้างโดยการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ไปยังแผ่นขั้วไฟฟ้าแรกของท่อเร่งอนุภาค สามารถเพิ่มพลังงานให้ไอออนได้สูงสุดถึง 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์

ท่อเร่งประกอบด้วยแผ่นฉนวนและอิเล็กโทรดสลับกัน ประมาณ 10 ชั้น การมีจำนวนขั้วที่มากขึ้น ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างขั้วจะลดลง โอกาสที่จะเกิดการอาร์คจึงลดลง อิเล็กโทรดแต่ละคู่มีระยะห่างกัน 2.4 ซม. แต่ละแผ่นหนา 2.0 มม. มีรูตรงกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.0 ซม. สำหรับลำไอออนผ่าน โดยมีฉนวนกั้นกลางระหว่างคู่แผ่นขั้วไฟฟ้าเป็นแก้วทรงกระบอกแบบวงแหวน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 16.0 และ 14.0 ซม.ตามลำดับ ฉนวนระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า สามารถเลือกใช้วัสดุที่เป็นแก้ว pyrex หรือแก้ว quartz ที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กทริก (dielectric strength) 14MV/m และ 8 MV/m ตามลำดับ หรืออาจเป็นเซรามิกที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกันได้ ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีตัวต้านทาน ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งศักย์ไฟฟ้าให้ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ หรือ ground ที่แผ่นขั้วไฟฟ้าสุดท้ายของท่อเร่งลำไอออน เป็นขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างแหล่งกำเนิดไอออนมากที่สุด สำหรับตัวต้านทานเป็นแบบ high-voltage low-current มีค่าความต้านทาน 10×10^9 โอห์ม 8 วัตต์ รวมความยาวของท่อเร่งประมาณ 40 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-30



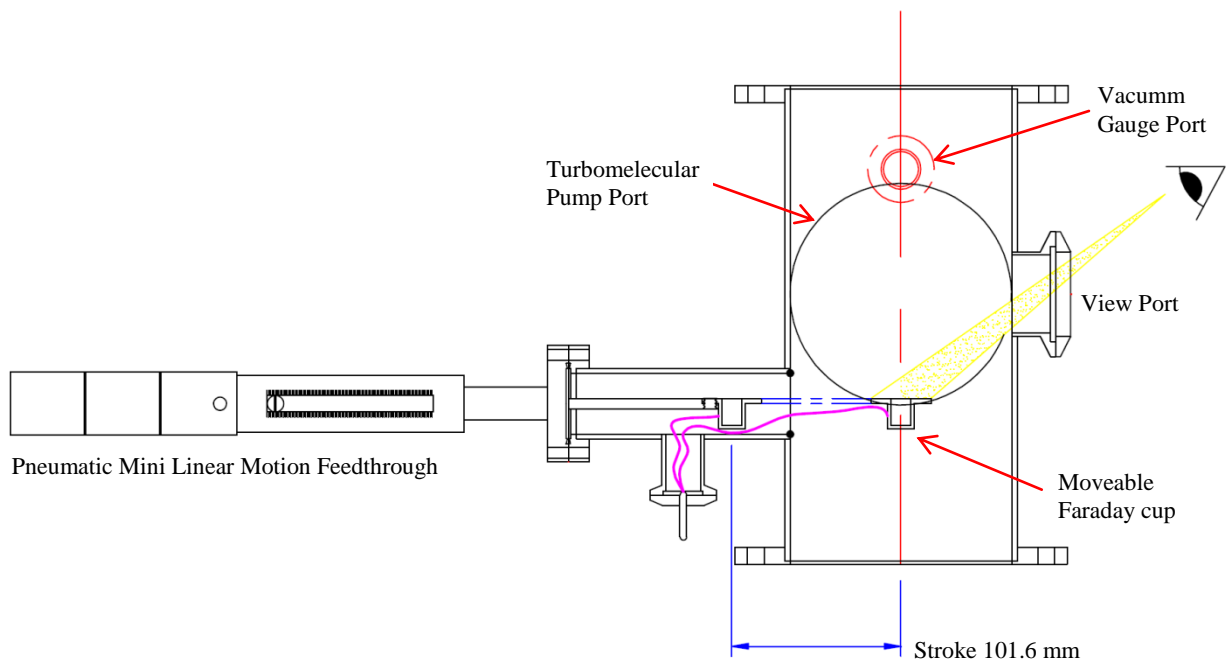
รูปที่ 4-30 แบบร่างท่อเร่งลำไอออนสำหรับเครื่องไอออนอิมпланเตอร์ SMEs

4.5.3 High voltage shielding

เป็นแผ่นพลาสติกอะคริลิกใส หนา 15 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร สำหรับแยกส่วนศักย์ไฟฟ้าแรงสูง ออกจากส่วนกราวด์ โดยติดตั้งอยู่ระหว่างท่อเร่งลำไอออนและสถานีทดสอบลำไอออน ความสำคัญของส่วนนี้ คือ การป้องกันไม่ให้เกิดการอาร์คจากส่วนศักย์ไฟฟ้าแรงสูง สู่ส่วนที่เป็นกราวด์

4.5.4 สถานีทดสอบลำไอออน (Beam testing station)

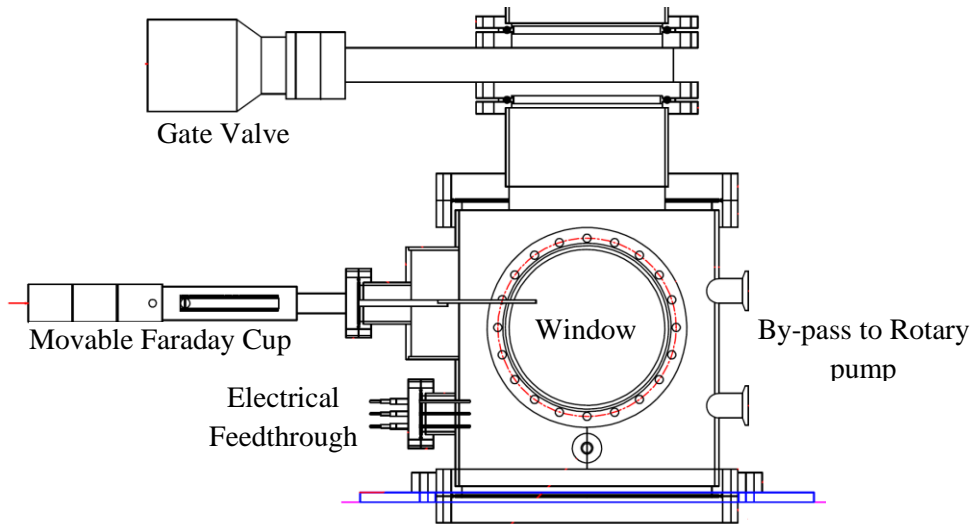
สถานีทดสอบลำไอออนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15 ซม. ยาวประมาณ 30 ซม. 2 ทางแรกเป็นส่วนที่ให้ลำไอออนวิ่งเข้า-ออก ส่วนอีก 2 ทางต่อกับปั๊มสุญญากาศแบบ turbo molecular และ Faraday cup ที่สามารถเลื่อนเข้าออกสำหรับวัดกระแสไอออนและหลบลำไอออนได้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดให้มี View Port ในสถานีทดสอบลำไอออนนี้ด้วย เพื่อให้สามารถตรวจสอบคุณลักษณะของลำไอออนด้วยเครื่องมือทาง Optic ได้นอกจากนั้น ยังมี Port พิเศษสำหรับติดตั้ง gauge วัดสุญญากาศด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4-31



รูปที่ 4-31 แบบร่างสถานีทดสอบลำไอออน สำหรับใช้กับเครื่องเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs

4.5.5 ห้องใส่ตัวอย่างสำหรับยิงฝึกลำไอออน

ห้องใส่ตัวอย่างสำหรับยิงฝึกลำไอออน เป็นส่วนสุดท้ายของท่อนำลำไอออนสำหรับวางงานใส่พลอยในแนวระนาบ โดยส่วนบนของห้องมี gate valve สำหรับปิด-เปิด เพื่อแยกส่วนห้องยิงฝึกลำไอออนออกจากเครื่องเร่งลำไอออน ในขั้นตอนการเปลี่ยนงานวางตัวอย่าง โดยไม่หยุดการทำงานของระบบสุญญากาศ ห้องยิงฝึกลำไอออนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 เซนติเมตร ความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร ในห้องใส่ตัวอย่างสำหรับยิงฝึกลำไอออนมีฟาราเดย์คัพสำหรับวัดกระแสไอออน และมีส่วนควบคุมการหมุนตัวอย่างในขณะยิงไอออน นอกจากนี้ เพื่อช่วยเร่งอันตรกิริยาระหว่างไอออนและวัสดุ ยังมี heater สำหรับอุ่นตัวอย่างขณะยิงไอออนด้วย โดยที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ควรจะอยู่ที่ประมาณ 200 – 300 องศาเซลเซียส ในห้องใส่ตัวอย่างสำหรับยิงฝึกลำไอออน ได้ออกแบบให้มี port สำหรับต่อเชื่อมจำนวนมาก สำหรับใช้ต่อเชื่อมกับระบบปั๊มสุญญากาศ หน้าต่างโปร่งใสสำหรับตรวจสอบตัวอย่างขณะยิงฝึกลำไอออนด้วยเครื่องมือทางแสง หน้าต่างสำหรับเปิดนำชิ้นตัวอย่างเข้า-ออก port ต่อเชื่อมกับหัววัดสุญญากาศ และ port ที่ใช้ต่อเชื่อมกับระบบไฟฟ้าต่างๆ ห้องยิงฝึกลำไอออนแสดงดังในรูปที่ 4-32



รูปที่ 4-32 แบบร่างห้องยึงฝังลำไอออนของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs

4.5.6 ระบบจ่ายไฟฟ้า

เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ที่ออกแบบขึ้น เป็นเครื่องเร่งอนุภาคแบบไฟฟ้าสถิตขนาดศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลโวลต์ ซึ่งต้องอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง ในการสร้างสนามไฟฟ้าคางที่บนท่อเร่งลำไอออน เพื่อใช้เร่งลำไอออนให้มีพลังงานสูงสุด 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตาม ท่อเร่งลำไอออนส่วนที่ต่อกับไฟฟ้าแรงดันสูงระดับ 100 กิโลโวลต์เชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดไอออน ซึ่งต้องอาศัยทั้งแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำกระแสตรง ระดับโวลต์ และไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงระดับกิโลโวลต์ ในการทำงานของส่วนสร้างพลาสมา ส่วนโพกัสและส่วนดึงลำไอออน ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้ระบบจ่ายไฟฟ้าประกอบด้วยชุดวงจรสำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่ำให้กับชุดอาร์เอฟ และโซลินอยส์ และชุดวงจรไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟแรงดันสูงให้กับชุดอิเล็กโทรดโพกัส อิเล็กโทรดดึงลำไอออน และท่อเร่งลำไอออน ระบบจ่ายไฟ ออกแบบให้มีระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้า และระบบป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้า (safety breaking)

4.5.7 ระบบสุญญากาศ

ระบบสุญญากาศของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สุญญากาศภายในส่วนห้องดีสชาร์จของแหล่งกำเนิดไอออน และสุญญากาศภายในท่อนำลำไอออน โดยมีรูเปิดขนาด 0.3 มม. ที่ anode เป็นช่องขนาดเล็ก สำหรับรักษาระดับความแตกต่างของทั้งสองระบบสุญญากาศ ให้สัมพันธ์กันเพื่อช่วยในการควบคุมการผลิตลำไอออน นอกจากนี้ยังมี bypass สำหรับกักแก๊สเพื่อจุดพลาสมา และสำหรับระบายแก๊สจากส่วนห้องดีสชาร์จในแหล่งกำเนิดไอออนไปยังท่อนำลำไอออน เพื่อปรับระดับสุญญากาศให้พร้อมสำหรับการจุดพลาสมาครั้งต่อไป ในการออกแบบระบบสุญญากาศสำหรับเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ SMEs กำหนดให้ใช้ปั๊มสุญญากาศแบบโรตารีและปั๊มแบบเทอร์โบทำงานร่วมกัน เหตุที่คณะผู้วิจัยเลือกใช้ปั๊มแบบเทอร์โบ แทนที่จะเป็นปั๊มแบบดิฟฟิวชัน ซึ่งมีราคาสูงกว่า เนื่องจากข้อได้เปรียบในเรื่องของความสะอาด และความรวดเร็วในการทำสุญญากาศ นอกจากนั้น การบำรุงรักษาของปั๊มเทอร์โบมีกระบวนการที่แน่นอนและไม่ซับซ้อนเท่าปั๊มดิฟฟิวชัน การติดตั้งปั๊มแบบเทอร์โบ ก็ทำได้ง่ายกว่าปั๊มแบบดิฟฟิวชัน โดยกำหนดให้ใช้ระบบปั๊มสุญญากาศเพียงชุดเดียวเท่านั้น ด้วยความเร็วการไหลของมวลอากาศ 350 ลิตร ต่อ วินาที เมื่อทำงานตามปกติ หรือหลังจากการทำความสะอาดและประกอบแหล่งกำเนิดไอออนใหม่ จะทำสุญญากาศโดยเปิด bypass ไปที่ปั๊มโรตารี ซึ่งเมื่อเปิดปั๊มระดับสุญญากาศ

ในแหล่งกำเนิดไอออนควรรออยู่ที่ประมาณ $2-4 \times 10^{-1}$ ทอร์ ภายในเวลาประมาณ 15 - 20 นาที สำหรับระดับ
สุญญากาศในท่อนำลำไอออน ปั๊มโรตารีจะทำงานในตอนเริ่มต้นจนถึงระดับ $2-3 \times 10^{-2}$ ทอร์ หลังจากนั้นปั๊มเทอร์
โบจะทำงานร่วมด้วย เพื่อให้ระดับสุญญากาศภายในท่อนำลำไอออน อยู่ที่ประมาณ $2-4 \times 10^{-6}$ ทอร์ ตัวอย่างปั๊ม
แบบโรตารี และปั๊มแบบเทอร์โบแสดงดังในรูปที่ 4-33 และ 4-34 ตามลำดับ



รูปที่ 4-33 ปั๊มสุญญากาศแบบ Rotary รุ่น RV 12 ขนาด 12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ของบริษัท Edwards



รูปที่ 4-34 ปั๊มสุญญากาศแบบ Turbo-molecular รุ่น EXT 351 ขนาด 350 ลิตร ต่อ วินาที และระบบควบคุม
รุ่น EXC 300 ของบริษัท Edwards

4.5.8 ระบบตรวจวัด

(ก) ระบบตรวจวัดแรงดันสุญญากาศ

มีระบบตรวจวัดแรงดันสุญญากาศติดตั้งที่บริเวณส่วนห้องดิสชาร์จ สถานีตรวจสอบลำไอออน และห้องยิง
ฝังลำไอออน ประกอบด้วยหัววัดแบบ pirani แบบ penning และ ระบบควบคุม (controller) หัววัดแบบ pirani
ใช้สำหรับวัดความดัน จากความดันบรรยากาศถึงประมาณ 10^{-4} ทอร์ หัววัดแบบ penning ใช้สำหรับวัดความดัน
บรรยากาศที่ต่ำกว่า 10^{-4} ทอร์ ลงไป ตัวอย่างหัววัดแบบ pirani และ penning แสดงดังรูปที่ 4-35 ส่วนระบบ
ควบคุมการวัด (controller) และวิธีการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 4-36



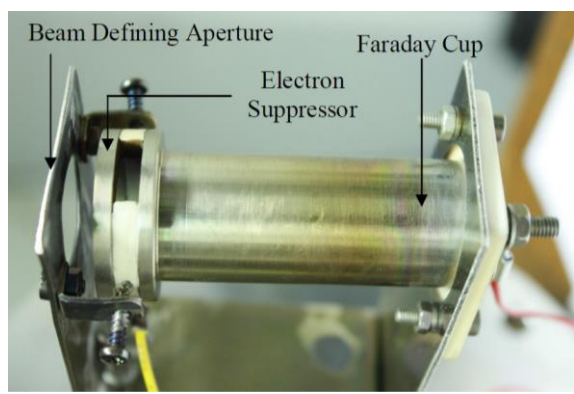
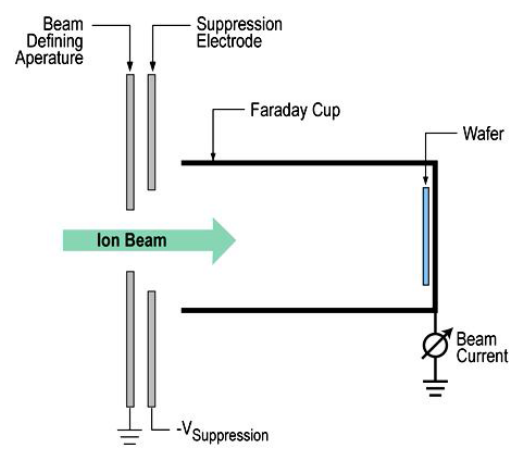
รูปที่ 4-35 หัววัดความดันแบบ pirani (ซ้าย) และ แบบ penning (ขวา) ของบริษัท Edwards



รูปที่ 4-36 การติดตั้งหัววัดและระบบควบคุมการวัดความดันบรรยากาศของบริษัท Edwards

(ข) ระบบการตรวจวัดความเข้มของไอออน

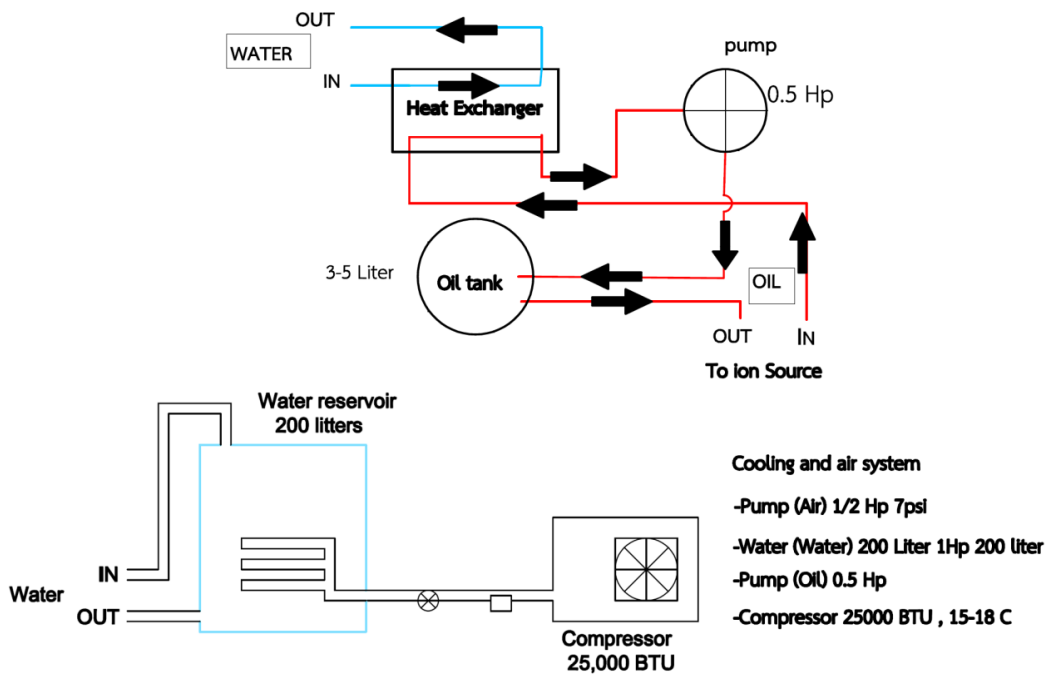
ระบบการตรวจวัดความเข้มของไอออนเป็นฟาราเดย์คัพ ติดตั้งอยู่ที่สถานีทดสอบลำไอออน และที่ห้องยิงฝิงไอออน โดยที่ฟาราเดย์คัพสามารถเลื่อนเข้าออกสำหรับวัดและหลบลำไอออนได้ ส่วนประกอบของฟาราเดย์คัพประกอบไปด้วยช่องเปิดให้ลำไอออนเข้า (beam defining aperture) อิเล็กโทรดกดอิเล็กตรอน (electron suppressor) และส่วนถ้วยฟาราเดย์ (Faraday cup) ที่มีแผ่นตัวนำต่อกับมิเตอร์วัดกระแสไอออนอยู่ใน ซึ่งแผ่นตัวนำจะต่อเชื่อมกับระบบหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4-37



รูปที่ 4-37 (ก) แผนภาพ และ (ข) ภาพถ่าย แสดงองค์ประกอบและการใช้งานของ Faraday cup

4.5.9 ระบบหล่อเย็น (Cooling system)

ประกอบด้วย 2 ส่วน คือระบบหล่อเย็นทั่วไป และระบบหล่อเย็นสำหรับอุปกรณ์ที่อยู่บนสคัยไฟฟ้าแรงสูง สำหรับระบบหล่อเย็นทั่วไป ประกอบไปด้วย ถังเก็บน้ำขนาด 200 ลิตร ปั๊มน้ำขนาด 1 Hp และ Compressor ขนาด 25,000 BTU เฉพาะส่วนอุปกรณ์ที่อยู่บนสคัยไฟฟ้าแรงสูง จะหล่อเย็นด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ (de-ionized water) หรือ น้ำมันทนสคัยไฟฟ้าสูง (H.V. oil) โดยมีปั๊มขนาด ½ Hp แยกสำหรับหล่อเย็นแต่ละอุปกรณ์ ซึ่งทั้งหมดนี้จะควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับไม่เกิน 22 °C ดังแสดงในรูปที่ 4-38



รูปที่ 4-38 แบบร่างระบบหล่อเย็นสำหรับใช้กับเครื่องเร่งลำไอออนขนาดสคัยไฟฟ้าสูงสุด 100 กิโลโวลต์

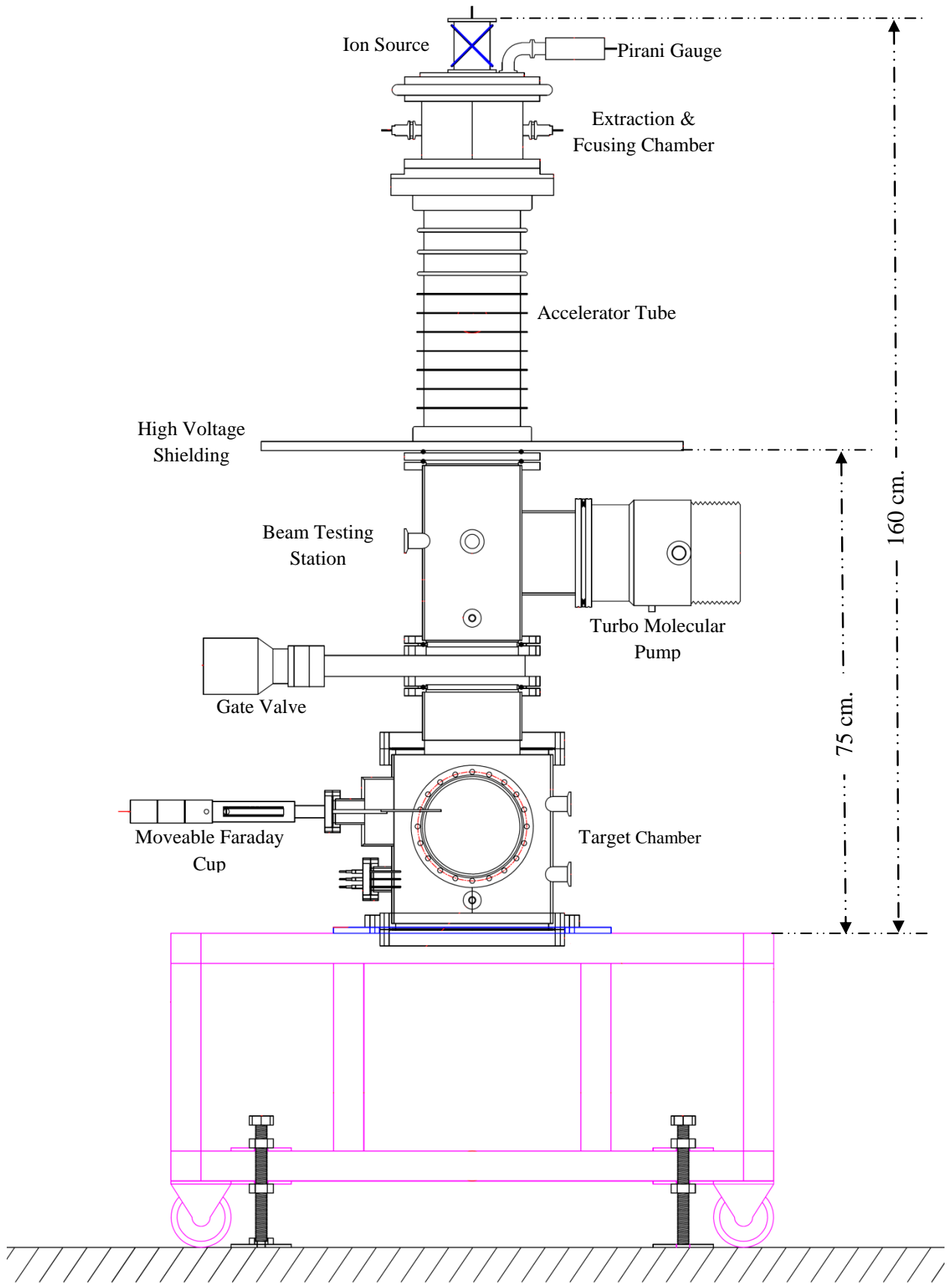
4.5.10 ระบบปั๊มลม

ทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดวาล์วภายในตัวเครื่องเร่งลำไอออน และระหว่างเครื่องเร่งลำไอออนและปั๊มสุญญากาศ ขนาดของปั๊มลมที่เหมาะสม คือ ½ Hp 7 psi ดังแสดงในรูปที่ 4-39



รูปที่ 4-39 ปั๊มลมขนาด 1 Hp

รายละเอียดแบบสร้างที่สมบูรณ์ของเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับ SMEs แสดงดังในรูปที่ 4-40 ซึ่ง จะเห็นว่ามีความสูงเพียง 160 เซนติเมตร เท่านั้น จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการสร้างจะอยู่ที่ประมาณ 5 ล้านบาทเท่านั้น



รูปที่ 4-40 ไดอะแกรมแสดงเครื่องไอออนอิมพลานเตอร์สำหรับงานพลอยในอุตสาหกรรม SMEs

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

พลอยตระกูลคอรันดัม (corundum) จัดเป็นอัญมณีสำคัญที่เป็นจุดแข็งของไทย และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้มากที่สุด แต่พลอยธรรมชาติที่มีความใสสะอาดและสีสดนั้นมีน้อยและหายาก ในขณะที่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยได้ขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้วัตถุดิบในประเทศเริ่มขาดแคลนและหายากขึ้น จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ในปัจจุบันพลอยคอรันดัมสีต่างๆที่ซื้อขายกันในตลาดส่วนใหญ่ มักผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนหรือที่เราเรียกกันว่า การเผา ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเรื่องสี (color) และความใสสะอาด (clarity) ทำให้มูลค่าของพลอยดิบคุณภาพต่ำสูงขึ้น เทคนิคนี้ได้รับการยอมรับกันโดยทั่วไปในตลาดพลอย อย่างไรก็ตาม ไม่ใช่พลอยทุกเม็ดจะสามารถเผาให้สวยได้ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของแร่มลทิน โครงสร้างผลึกของพลอย แหล่งกำเนิดที่มีแร่มลทินหลัก ปริมาณธาตุเจือที่มีในโครงสร้างผลึกพลอย ทำให้มีความจำเป็นต้องใช้กระบวนการและเทคโนโลยีขั้นสูงเข้ามาเป็นเครื่องมือ เพื่อลดข้อจำกัดของการปรับปรุงคุณภาพแบบเดิม

โดยปกติคอรันดัมซึ่งมีสูตรเคมีเป็น Al_2O_3 ในระบบผลึกไตรโกนอล (Trigonal) เป็นแร่ที่มีสีใสไม่มีสี การเกิดสีของคอรันดัมจะมีลักษณะการเกิดแบบ “Allochromatic” ซึ่งเกิดจากธาตุร่องรอยที่เจืออยู่ในเนื้อพลอยในปริมาณเล็กน้อย โดยธาตุแต่ละชนิดที่เจือจะให้สีแตกต่างกัน และธาตุบางชนิดเมื่อมีเลขออกซิเดชัน (oxidation state) ที่แตกต่างกันก็จะให้สีที่ต่างกัน ธาตุเจือเหล่านี้สามารถพบได้ในคอรันดัมหลายรูปแบบ เช่น อาจพบได้ในรูปแบบของการแทนที่ในโครงสร้างของคอรันดัม ซึ่งหากธาตุร่องรอยเหล่านั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกับอลูมิเนียม (Al^{3+}) ก็จะสามารถเข้าแทนที่ในโครงสร้างได้ ซึ่งการเจือในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างคอรันดัม ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของธาตุเจือที่อยู่ในโครงสร้าง เช่น ในกรณีของทับทิม (ruby) สีแดงเกิดจากธาตุโครเมียม (Cr^{3+}) ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้เกิดสีแดง และคู่ธาตุเฟอร์รัส (Fe^{2+}) กับไทเทเนียม (Ti^{4+}) ในโครงสร้างของคอรันดัมซึ่งให้สีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังอาจพบธาตุเจือเหล่านี้ในรูปแบบของมลทิน ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ระดับนาโนเมตรซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า จนถึงระดับมิลลิเมตรซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลกับความใสสะอาดของคอรันดัม ธาตุเจือเหล่านี้เป็นหนึ่งในสาเหตุของการเกิดสีต่างๆในแร่คอรันดัม

การยิงฝังไอออน (ion implantation) เป็นการเร่งไอออนให้มีพลังงานสูง แล้วไปชนกับเป้าที่ติดตั้งภายในเครื่องเร่งลำไอออน (ion implanter) ไอออนที่มีพลังงานสูงนี้ เมื่อถูกฝังเข้าไปในวัสดุ จะถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมหรือโมเลกุลของวัสดุ ทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิม ตำแหน่งนั้นจึงเป็นช่องว่าง (vacancy) อะตอมดังกล่าวอาจจะเคลื่อนที่ไปอยู่ในตำแหน่งไม่ปกติ (interstitials) แต่ท้ายที่สุดแล้ว ไอออนที่ถูกฝังเข้าไปจะค่อยๆสูญเสียพลังงาน และจะหยุดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง แล้วอาจเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลเดิม กลายเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีคุณสมบัติใหม่ได้ อันตรกิริยาระหว่างไอออนและอะตอมของเป้าทำให้คุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์เดิมของเป้าเกิดการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัสดุนั้น จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร ไม่สามารถย้อนกลับมาสภาพเดิมได้อีก

เครื่องเร่งลำไอออน หรือ เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์ ประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออน ที่ซึ่งไอออนของธาตุที่ต้องการได้ถูกสร้างขึ้น ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กโทรด ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำบีม โดยทั่วไปถัดจากนี้มักจะมีส่วนกรองไอออน ที่ซึ่งลำบีมจะถูกคัดเลือกด้วยสนามแม่เหล็ก ให้เหลือเฉพาะไอออน ชนิดที่ต้องการผ่านต่อไปได้ หลังจากนั้นจึงถึงส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น และส่วนห้องเป้า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ในกรณีที่ลำบีมมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ที่ต้องการฝังไอออน จำเป็นต้องมีส่วนกวาดลำบีม ที่ซึ่งลำบีมถูกบังคับให้กระจายอย่างสม่ำเสมอไปบนเนื้อวัสดุ ท้ายที่สุด จะมีส่วนฟาราเดย์คัพ ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุ เมื่อได้ปริมาณที่ต้องการก็จะหยุดการทำงาน จำนวนไอออนที่เกิดขึ้นต่อเวลา เรียกว่า “กระแสไอออน” และปริมาณไอออนที่ฝังเข้าไปในเนื้อวัสดุจะเรียกว่า “โดส” ซึ่งก็คือ ผลคูณระหว่างกระแสไอออนกับเวลาต่อพื้นที่ของการฝังไอออน ไอออนที่มีพลังงานค่าหนึ่ง จะกระจายเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุที่ความลึกค่าต่างๆ ความลึกเฉลี่ยจะเรียกว่า “พิสัย” โดยที่จะขึ้นกับชนิดและพลังงานของไอออน และองค์ประกอบเชิงเคมีของวัสดุเอง โดยทั่วไปแล้วไอออนที่มีพลังงานระหว่าง 10 ถึง 500 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จะมีพิสัยอยู่ที่ 10 นาโนเมตร ถึง 1 ไมโครเมตร

เทคนิคการฝังไอออนมีการใช้ในเชิงอุตสาหกรรมมานานแล้ว โดยเป็นเทคนิคหลักในการได้ปาสารกึ่งตัวนำ ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ สามารถควบคุมปริมาณอะตอมที่ฝังได้อย่างแม่นยำ สามารถควบคุมความลึกของไอออนที่เข้าไปฝังได้ และสามารถกำหนดบริเวณเฉพาะที่ต้องการให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ เป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้าง จึงกลมกลืนกับเนื้อวัสดุเดิมมาก นอกจากนี้ เทคนิคนี้ยังไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความร้อน เทคนิคไอออนอิมพลานเตชัน จึงเป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับพลอย

เครื่องเร่งลำไอออนโดยทั่วไปมักสร้างไอออนได้ในปริมาณที่น้อย (ในหน่วยไมโครแอมแปร์) ดังนั้น การฝังไอออนจึงทำได้ในปริมาณโดสต่ำๆ เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการให้มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีในปริมาณน้อยๆเท่านั้น ในงานพลอยต้องการสร้างสภาวะออกซิเดชันหรือรีดักชันให้กับพลอย จึงต้องการไอออนในปริมาณมากกว่าปกติ โดยเฉพาะเมื่อต้องการกำจัดอินคลูชัน เช่น ของแข็งจากธาตุชนิดอื่นของเหลว หรือ ก๊าซ ในแผนงานวิจัยนี้ จึงได้มีการปรับปรุงเครื่องเร่งลำไอออนต้นแบบสำหรับงานพลอย ให้มีประสิทธิภาพและคุณภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถยิงไอออนที่โดสสูงๆได้ โดยที่การบำรุงรักษาและการจัดวางชิ้นงานทำได้ง่าย โดยแบ่งการปรับปรุงเครื่องออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ก. การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)

- เพิ่มประสิทธิภาพของ filament ของ ion source ทำให้ลดเวลาการเปลี่ยน filament ลง
- เพิ่มประสิทธิภาพการทำสภาพสุญญากาศภายใน ion source
- ปรับปรุงการควบคุมก๊าซ (ที่ใช้สร้างพลาสมาเพื่อผลิตลำไอออน หรือ feed gas) ให้มีความแม่นยำและสามารถทำซ้ำได้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น
- ศึกษาความเกี่ยวพันของพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมลำไอออน
- เพิ่มประสิทธิภาพการดึงและการโฟกัสลำไอออนของ einzel lens

ข. การปรับปรุงห้องยิงพลอย

- เพิ่มขนาดของช่องทางขาเข้าของลำไอออน โดยการเพิ่มขนาดของ gate valve
- ปรับปรุงงานใส่พลอยให้จัดวางพลอยได้ง่าย พลอยถูกยิงด้วยไอออนอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น

- มี heater สำหรับอุ่นชิ้นงานขณะยิงไอออน
- ปรับปรุงระบบวัดความเข้มของไอออนที่ชิ้นงานใส่พลอยให้แม่นยำและสะดวกกับการใช้งานมากขึ้น

ค. การปรับปรุงระบบป้อนไฟแรงสูง

- ปรับปรุง isolation transformer ให้สามารถทนความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ไม่ต่ำกว่า 70 kV (จากปัจจุบันที่ทนได้ไม่เกิน 35 kV)

ผลการปรับปรุงเหล่านี้ ทำให้ได้เครื่องมือตลอดจนเทคนิคที่สามารถสร้างไอออน ที่ให้พลังงานที่ผลิตแล้ว ผ่านระบบการเร่งให้มีความเร็วสูง ที่มีปริมาณไอออนจำนวนมากพอที่จะวิ่งเข้าชนกับพลอย เพื่อถ่ายเทพลังงานให้กับพลอยโดยตรง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการปรับปรุงความสะอาดในเนื้อพลอย และการกำหนดสีของพลอยได้อย่างเหมาะสม ในขั้นตอนต่อไป คณะผู้วิจัยจะเปิดโอกาสให้ภาคเอกชนได้เข้ามาทดลองใช้เครื่องไอออนอิมพลานเตอร์เครื่องนี้สำหรับการปรับปรุงคุณภาพพลอยของตน ซึ่งเมื่อผู้ประกอบการทั่วไปสามารถใช้เครื่องได้ง่ายขึ้นด้วย จะส่งผลให้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมของตน

ในระหว่างการดำเนินการปรับปรุงเครื่องเร่งลำไอออนต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องเร่งลำไอออนสำหรับ SMES ในงบประมาณไม่เกิน 5 ล้านบาทขึ้น โดยประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนกำเนิดไอออน ได้เลือกเป็นแบบ RF ซึ่งสามารถสร้างไอออนไนโตรเจนและออกซิเจนที่จำเป็นสำหรับงานพลอย ในเรือนมิลลิแอมป์ได้ ถัดจากนั้นเป็นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่ดึงไอออนให้เข้าสู่ลำป้อนและโพกัสลำป้อน เครื่องเร่งลำไอออนที่ออกแบบขึ้นนี้ไม่มีส่วนกรองไอออน เนื่องจากในความเป็นจริงสามารถหาก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนที่บริสุทธิ์สูงได้ไม่ยาก ส่วนที่สำคัญคือส่วนเพิ่มพลังงานไอออน ที่ซึ่งไอออนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงขึ้น โดยตั้งเป้าหมายไว้ที่ 100 กิโลโวลต์ และส่วนห้องเป้า ที่ซึ่งไอออนจะถูกนำเข้าไปฝังในเนื้อวัสดุ ซึ่งภายในห้องเป้าได้กำหนดให้มีฮีทเตอร์สำหรับอุ่นพลอยขณะยิงไอออนด้วย

อนึ่ง ในแผนงานวิจัยนี้ ยังได้ติดตั้งและปรับปรุงเครื่องมือวิจัยอื่นๆ เพื่อช่วยให้งานในแต่ละโครงการย่อยในแผนงานวิจัย ได้ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การติดตั้งเครื่อง Optical spectrophotometer สำหรับวิเคราะห์การดูดกลืนแสงและสีของพลอย และการปรับปรุงเครื่องทำพลาสมาสำหรับงานพลอย ได้แก่ เครื่องขัดผิวพลอยด้วยพลาสมา และเครื่องพลาสมาอบอ่อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยคอร์ันดัมสำหรับพลอยจากแหล่งประเทศไทย พบว่าสามารถทำให้มีสีสวยสด และเนื้อพลอยสะอาด ลดความขุ่นมัว ทำให้พลอยหลังการเจียรระโนแล้วมีความสดใส แวววาวมากขึ้น เมื่อนำไปประกอบกับตัวเรือนเครื่องประดับ สามารถเพิ่มมูลค่าได้สูงยิ่งขึ้น คณะทำงาน คาดหวังว่าผลการศึกษานี้ จะช่วยวางรากฐานของเทคโนโลยีลำไอออนแก่ผู้สนใจที่จะนำไปศึกษาต่อไป จนสามารถนำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของไทยได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.W. Hughes, “*Corundum*”, Courier International Ltd., England, 1990.
- [2] T. Themelis, “*The Heat Treatment of Ruby and Sapphire*”, Word Graphics, Inc., USA, 1992.
- [3] K. Nassau, “*The Physics and Chemistry of Color*”, 2nd Ed., John Wiley & sons, Inc., New York, 2001.
- [4] K. Nassau, “*The origins of color in minerals*”, *American Mineralogist* 63 (1978) 219-229.
- [5] P.T. Townsend, P.J. Chandler and L. Zhang, “*Optical effects of ion implantation*”, Cambridge University Press: Cambridge, 1994.
- [6] “*Ion implantation*”, available from <http://www.n2bio.com/surface-modification-technology/ion-implantation.php>.
- [7] S. Intarasiri, D. Bootkul, L.D. Yu, T. Kamwanna, S. Singkarat, T. Vilaithong, *Surf. Coat. Tech.* 203 (2009) 2788-2792.
- [8] O.W. Holland, T.P. Sjoreen, D. Fathy, J. Narayan, *App. Phys. Lett.* 45 (1984) 1081.
- [9] G. Dearnaley, “*Adhesive and abrasive wear mechanisms in ion implanted metals*”, *Nucl. Instrum. Meth. B* 7 (1985) 158-165.
- [10] T. Hayashi, A. Matsumuro, M. Muramatsu, M. Kohzaki, K. Yamaguchi, *Thin Solid Films* 376 (2000) 152.
- [11] Y. Saito, H. Horie, S. Suganomata, *Nucl. Instr. Methods B* 59/60 (1991) 1173.
- [12] D. Suwannakachorn, D. Boonyawan, J.P. Green, S. Aumkaew, C. Thongleurm, P. Vichaisirimongkol, T. Vilaithong, *Nucl. Instr. Meth. B* 89 (1994) 354.
- [13] S. Davydov, L.D. Yu, B. Yotsombat, S. Intarasiri, C. Thongleurm, V. A-no, T. Vilaithong, M.W. Rhodes, *Surf. Coat. Tech.* 131 (2000) 558.
- [14] L.D. Yu, T. Vilaithong, D. Suwannakachorn, S. Intarasiri, S. Thongtem, *Nucl. Instr. Meth. B* 127/128 (1997) 954.
- [15] L.D. Yu, T. Vilaithong, B. Yotsombat, S. Thongtem, J. G. Han and J. S. Lee, *Surf. Coat. Tech.* 103-104 (1998) 328.
- [16] B. Phanchaisri, R. Chandet, L. D. Yu, T. Vilaithong, S. Jamjod and S. Anuntalabhochai, *Surf. & Coat. Tech.* 201 (19-20) (2007) 8024-8028.

- [17] S. Mahadthanapuk, W. Teraarusiri, B. Phanchaisri, L.D. Yu, S. Anuntalabhochai, Nucl. Instr. Meth. B 307 (2013) 229-234.
- [18] D. Bootkul, C. Chaiwai, U. Tippawan, B. Wanthanachaisaeng, S. Intarasiri, Nucl. Instr. Meth. B, Article in Press (doi:10.1016/j.nimb.2015.07.029).
- [19] R.W. Hughes, "Ruby & Sapphire", White Lotus, Bangkok, 1991, p. 136.
- [20] P.D. Townsend, P.J. Chandler, L. Zhang, "Optical Effects of Ion Implantation", Cambridge University Press, London.
- [21] K. Nassau, "Gemstone Enhancement", 2nd Edition, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1994, p. 36.
- [22] K. Nassau, "The Physics and Chemistry of Color", Wiley, New York, 1983.
- [23] S. Intarasiri, A. Wijaikhum, D. Bootkul, D. Suwannakachorn, L.D. Yu, U. Tippawan, S. Singkarat, Appl. Sur. Sci. 310 (2014) 94-99.
- [24] Q. Ji, A. Sy, J.W. Kwan, Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02B312.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

ก-1 วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาเรียนรู้ฟิสิกส์ของเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนขนาดเล็กที่มีกระแสลำไอออนสูง
- 2) เพื่อพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนแบบกะทัดรัดสำหรับงานพลอย
- 3) เพื่อศึกษาฟิสิกส์ของ particle-solid interaction โดยการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาค
- 4) เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ทางการวิเคราะห์ห้มลทินขนาดเล็ก (นาโน) ธาตุร่องรอยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีพลอยด้วยเทคนิคลำไอออน
- 5) เพื่อให้ได้เทคโนโลยีใหม่สำหรับปรับปรุงคุณสมบัติเชิงแสงของพลอย สู่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับของประเทศไทย
- 6) เพื่อผลิตผลงานวิจัยด้านอัญมณี ที่สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ และสามารถนำไปเผยแพร่สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องได้
- 7) เพื่อสร้างการเชื่อมโยงและความร่วมมือระหว่างนักวิจัยทั้งในประเทศและระดับนานาชาติ
- 8) เพื่อนำไปผลิตผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติหรือการจดสิทธิบัตร

ก-2 กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ แสดงดังในตารางที่ ก-1

ตารางที่ ก-1 กิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับ

กิจกรรม	ผลที่ได้รับ
1. การศึกษาเครื่องเร่งลำไอออนเพื่อปรับปรุงให้เครื่องมีขนาดเล็กสามารถใช้ปั๊มสุญญากาศที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นการประหยัดทั้งเวลาและไฟฟ้า	ได้ผลการศึกษาวิจัยในการปรับปรุงเครื่องเร่งลำไอออนให้เหมาะสมกับการใช้งานด้านพลอยคอร์ันดัม
2. การปรับปรุงแหล่งกำเนิดไอออน (Ion source) เพื่อปรับปรุงการควบคุมก๊าซ ที่ใช้สร้างพลาสมาเพื่อผลิตลำไอออน ให้การ feed gas มีความแม่นยำและสามารถทำซ้ำได้สะดวกและเที่ยงตรงมากขึ้น	ได้แหล่งกำเนิดไอออนที่สามารถผลิตไอออนที่ต้องการใช้ในงานด้านพลอยคอร์ันดัม
3. การศึกษาพารามิเตอร์ควบคุมลำไอออนได้ผลที่ทำให้เครื่องเร่งอนุภาคลำไอออนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด	ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมลำไอออนในงานพลอยคอร์ันดัม
4. การศึกษาผลของลำไอออนที่มีต่อพลอยคอร์ันดัม เพื่อได้ผลการปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยเทคนิคลำไอออน	ได้ผลของชนิด พลังงาน และกระแสไอออน ที่เหมาะสมกับงานพลอยคอร์ันดัม
5. การปรับปรุงห้องยิงพลอยได้ตัวจับชิ้นงานที่เหมาะสมกับงานพลอย เช่น จับยึดชิ้นงานได้ง่าย อุ่นชิ้นงานขณะยิงไอออน ฯลฯ	ได้ห้องยิงฝังไอออนที่เหมาะสมกับงานพลอยคอร์ันดัม
6. การพัฒนาเครื่องเร่งลำไอออนเข้าสู่ SMEs เพื่อเป็นข้อมูลด้านเครื่องมือสำหรับผู้ประกอบการ	ได้แบบสร้างเครื่องเร่งลำไอออนสำหรับงาน SMEs
7. เปรียบเทียบต้นทุนตามหลักเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับผู้ประกอบการ ให้สามารถนำไปต่อยอดเชิงธุรกิจได้	ได้ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบระหว่างการยิงด้วยลำไอออนและการเผา
8. ขั้นตอนการสรุปและเผยแพร่งานวิจัย เพื่อเป็นข้อมูลสรุปผลงานวิจัยของแผนงานและโครงการย่อยทั้งหมด	ได้ผลสรุปที่สามารถนำไปต่อยอดการวิจัยได้
9. สังเคราะห์โดยภาพรวมของแผนงานวิจัย เพื่อให้ได้ข้อสรุปการนำนวัตกรรมใหม่ใช้ในงานพลอย	ได้ผลสรุปที่สามารถนำไปต่อยอดทางธุรกิจได้

ภาคผนวก ข.

การจัดนิทรรศการแสดงผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการนานาชาติ “The 19th Surface and Modifications of Materials by Ion Beams (SMMIB 2015)” ระหว่างวันที่ 22 – 27 พฤศจิกายน 2558 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

1. ความเป็นมา

การประชุมวิชาการ “The Surface Modifications of Materials by Ion Beams” เป็นการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ทางด้านการดัดแปรผิววัสดุด้วยลำไอออน ซึ่งจัดเวียนไปตามประเทศต่างๆ ทั่วโลก ทุกๆ 2 ปี โดยที่ ในปี ค.ศ. 2015 ซึ่งถือเป็นครั้งที่ 19 ของการประชุมนี้ ทางบอร์ดวิชาการของการประชุมวิชาการนานาชาติดังกล่าว ได้คัดเลือกให้ประเทศไทย โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เป็นเจ้าภาพจัดประชุม ในระหว่างวันที่ 22-27 พฤศจิกายน 2558 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งถือเป็นครั้งแรกที่จัดในประเทศไทย และเป็นประเทศที่ 3 ในเอเชีย ต่อจากประเทศญี่ปุ่น และประเทศจีน ในการประชุมครั้งนี้ มีผู้ส่งบทความเพื่อเข้าร่วมประชุมจำนวนประมาณ 200 บทความ จากคณะนักวิจัยจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก

2. ความสำคัญของโครงการต่อการประชุม

จากการที่ประเทศไทยมีชื่อเสียงมานานเรื่องการเป็นแหล่งพลอยคอร์ันดัมคุณภาพดี อันได้แก่ ทับทิม ไพลิน บุคราคัม เขียวส่อง ฯลฯ แม้ว่าปัจจุบัน พลอยเหล่านี้จะหาได้ยากขึ้น แต่อุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ มีความสำคัญเสมอมา สามารถนำเงินตราเข้าประเทศอยู่ในลำดับต้นๆ โดยมีมูลค่าการส่งออกสูงอยู่ใน 5 อันดับแรก และยังคงมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ในอุตสาหกรรมนี้พลอยที่มีความสวยงามตามธรรมชาติ โดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพใดๆ จะเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคสูงสุด แต่ปัจจุบันพลอยนี้หาได้ยาก และมีราคาแพง ทำให้ผู้บริโภคยอมรับพลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาแล้ว วิธีที่ใช้กันส่วนใหญ่ ก็คือการเผาหรือหุง ซึ่งเป็นวิทยาการที่เรียกได้ว่าเป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของไทย สามารถทำให้พลอยธรรมชาติที่เป็นเพียงแค่พลอยราคาถูกๆ ที่ก่อนหน้านี้ยังไม่รู้ว่าจะเอาไปทำอะไรดี กลับมีราคาแพงขึ้นมาได้

อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณภาพพลอยด้วยการเผา นี้ ไม่ใช่พลอยทุกเม็ดที่เผาแล้วจะสวยขึ้น พลอยแต่ละชนิด และจากแต่ละแหล่ง จะใช้กรรมวิธีแตกต่างกัน ผู้เผาพลอยจึงต้องมีความชำนาญในการดูชนิดของมลทินหรือ หมา ว่าควรเผาแบบใดจึงจะเหมาะสม ในบางกรณีมีผู้เติมสารเคมีบางตัว เช่น เบริลเลียม ตะกั่ว โคบอลต์ เข้าไปในระหว่างเผาเพื่อเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารเคมีเหล่านี้บางชนิดเป็นอันตรายต่อทั้งผู้ประกอบการและผู้บริโภค นอกจากนั้น การเผายังทำให้พลอยเปลี่ยนสภาพสามารถตรวจพบในห้องปฏิบัติการ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพใหม่ๆ ที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค มีความซับซ้อนน้อยกว่า สามารถดำเนินการซ้ำๆ กันได้อย่างเป็นระบบ และไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน จึงยังคงเป็นที่ต้องการของอุตสาหกรรมพลอย

คณะผู้วิจัย ได้ดำเนินการใช้ลำไอออน ปรับปรุงคุณภาพพลอยตระกูลคอร์ันดัม เพื่อเพิ่มความใสสะอาด ขจัดมลทิน เพิ่ม-ลดสีตามที่ตลาดต้องการ โดยอาศัยพลังงานจากกลไกการพุ่งชนของไอออนที่กำหนดเข้าไปกระตุ้น โดยปราศจากความร้อนสูง จึงไม่มีการทำลายโครงสร้างหรือผิวพลอย [1] การดำเนินงานได้ใช้ลำไอออน จากทั้งเครื่องเร่งลำไอออนแวเรียน ซึ่งเดิมใช้ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ และเครื่องเร่งลำไอออนที่คณะผู้วิจัยออกแบบและสร้างขึ้นใหม่ ให้มีขนาดเล็ก ราคาไม่แพง เหมาะสำหรับการสร้างใช้งานเองในประเทศ [2] ซึ่งได้ผลงานวิจัยที่น่าสนใจในหลายกรณี ตัวอย่างเช่น พลอยทับทิม พบว่า ไอออนไนโตรเจน ทำให้พลอยทับทิมใสขึ้น ลดอินคลูชันที่อยู่ภายใน และได้พลอยทับทิมที่มีสีออกม่วงสวยงาม ซึ่งเกิดจากไอออนเหนียวทำให้เกิดการ reduction ของธาตุ

โลหะทรานซิชัน ส่วนออกซิเจนจะทำให้พลอยทับทิมดูใสขึ้น ลดอินคลูชันที่อยู่ภายใน และทำให้พลอยมีสีแดงเข้มมากขึ้น ซึ่งเกิดจากไอออนเหนียวทำให้เกิดการ oxidation ของธาตุโลหะทรานซิชัน ในกรณีของพลอยคอร์ันดัมสีน้ำเงิน สามารถยิงไอออนเพื่อเพิ่มหรือลดสีน้ำเงินได้ โดยการยิงด้วยไอออนไนโตรเจน หรือ ออกซิเจน [3] นอกจากนี้ พลอยคอร์ันดัมสีน้ำเงินปนเขียวที่ตลาดไม่นิยม สามารถเปลี่ยนให้เป็นน้ำเงินเข้มสด โดยการใช้ไอออนกระตุ้นให้คู่ธาตุเหล็กและไทเทเนียมที่ใสเหลือ (Fe³⁺+Ti³⁺) เปลี่ยนเป็นให้สีน้ำเงิน (Fe²⁺+Ti⁴⁺) นอกจากนี้ พลอยคอร์ันดัมสีขาวขุน สามารถทำให้ใสขึ้นได้ โดยการสลายมลทินขนาดเล็กด้วยลำไอออน ซึ่งเมื่อนำมาเจียรระโนแล้ว นำไปใช้เป็นเครื่องประดับทดแทนเพชรได้ มูลค่าจึงสูงขึ้น

งานวิจัยนั้นนอกจากจะเป็นการศึกษาในแง่วิชาการที่เกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างไอออนที่มีพลังงานจลน์กับระบบผลึกที่มีความซับซ้อนสูงแล้ว ยังมุ่งหวังเพื่อประโยชน์เชิงพาณิชย์ด้วย ซึ่งถือว่าเป็นแห่งแรกของโลก จนได้รับการกล่าวถึงในรายงานของสถาบัน GIA ประเทศสหรัฐอเมริกา ว่าเป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจ [4]

เพื่อแสดงศักยภาพของนักวิจัยไทย คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการนานาชาติของท้องถิ่น (local committee) ได้มอบหมายให้แผนงานวิจัย “การประยุกต์เครื่องเร่งลำอนุภาคสำหรับเพิ่มมูลค่าพลอยธรรมชาติ” ซึ่งได้รับการสนับสนุนให้ทำวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้ไปจัดนิทรรศการเพื่อแสดงผลงานวิจัยของโครงการ

3. รูปแบบการจัดนิทรรศการ

คณะกรรมการจัดการประชุม ได้มอบพื้นที่จัดแสดงนิทรรศการขนาด 2 x 4 ตารางเมตร ให้กับโครงการสำหรับงานที่นำไปแสดงประกอบด้วยพลอยคอร์ันดัมชนิดต่าง ๆ ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน และเครื่องประดับต้นแบบที่ขึ้นรูปด้วยเทคโนโลยีใหม่ เรียกว่า “การฝังพร้อมหล่อ” ตกแต่งด้วยพลอยคอร์ันดัมที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน ทั้งนี้กระบวนการ “ฝังพร้อมหล่อ” เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดขั้นตอนการ “ฝังพลอย” ให้มีความง่ายและรวดเร็วขึ้น เนื่องจากกระบวนการฝังพร้อมหล่อนั้นเป็นกระบวนการฝังพลอยลงในเทียนซึ่งมีความสะดวกและง่ายกว่าการฝังพลอยลงในโลหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากเทียนมีความยืดหยุ่นและความอ่อนนิ่มสูงกว่าโลหะมาก ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ช่างฝีมือระดับสูงในขั้นตอนนี้ และสามารถฝังพลอยได้เร็วขึ้นกว่าการฝังพลอยในโลหะเป็นอย่างมาก อีกทั้งลดต้นทุนเมื่อเทียบกับการหล่อโลหะแล้วจึงฝังพลอยในการขึ้นรูปปัจจุบัน

ในท้ายที่สุด คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการนานาชาติของท้องถิ่น ได้นำผู้เข้าร่วมประชุมจากนานาชาติ เข้าเยี่ยมชมที่ทำการของแผนงานวิจัย ณ อาคารเทคโนโลยีไอออน빔 ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อเป็นการกระตุ้นให้งานวิจัยทางด้านนี้ ได้พัฒนาเข้าสู่ระดับนานาชาติต่อไป

4. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Intarasiri, D. Bootkul, L.D. Yu, T. Kamwanna, S. Singkarat, T. Vilaithong, Surface and Coatings Technology 203 (2009) 2788-2792.
- [2] S. Intarasiri, A. Wijaikhum, D. Bootkul, D. Suwannakachorn, L.D. Yu, U. Tippawan, S. Singkarat, Applied Surface Science 310 (2014) 94-99.
- [3] D. Bootkul, C. Chaiwai, U. Tippawan, B. Wanthanachaisaeng, S. Intarasiri, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B 365 (2015) 288-293.
- [4] C. M. Breeding, A. H. Shen, S. Eaton-Magaña, G. R. Rossman, J. E. Shigley, A. Gilbertson, Gems & Gemology, Fall, 2010, pp. 241-257.



รูปที่ 1 แสดงบริเวณบูทจัดงานของโครงการ ขนาด 4 x 2 ตารางเมตร ประกอบด้วยโปสเตอร์เกี่ยวกับผลงานวิจัย และส่วน display



รูปที่ 2 คณะผู้จัดนิทรรศการ และผลงานที่นำไปแสดง



รูปที่ 3 ประติมากรรมชื่อ พญาอินทรี มีความสูงจากพื้นถึงปลายปีก 33 ซม. ระยะจากปลายปีกถึงปลายปีก 28 ซม. ประดับด้วยพลอยแซฟไฟร์สีน้ำเงิน-น้ำเงินอมเขียว และพลอยสีชาวดักลาสเพอร์ จำนวน 866 เม็ด น้ำหนักพลอยกว่าพันกะรัต ซึ่งทุกเม็ดผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยลำไอออน



รูปที่ 4 บรรยากาศขณะคณะผู้วิจัยบรรยายถึงรายละเอียดของผลงานวิจัยให้ผู้เข้าชมนิทรรศการ ในระหว่างการประชุมวิชาการนานาชาติ SMMIB 2015



รูปที่ 5 บรรยากาศขณะคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการนานาชาติ SMMIB 2015 นำผู้เข้าร่วมประชุมวิชาการจากนานาชาติเข้าเยี่ยมชมแผนงานวิจัย “การประยุกต์เครื่องเร่งลำอนุภาคสำหรับเพิ่มมูลค่าพลอยธรรมชาติ” ณ อาคารเทคโนโลยีไอออน빔 ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่