



สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
Synchrotron Light Research Institute (Public Organization)
เอกสารความรู้ (knowledge documents)

ประเภทเอกสาร

- ☐ TR: รายงานเชิงเทคนิค (TECHNICAL REPORT)
☐ TN: รายงานเชิงเทคนิค (ฉบับย่อ) (TECHNICAL NOTE)
☒ MN: คู่มือการดำเนินงาน (Operation Manual) / คู่มือการใช้งาน (Instruction Manual) /
แผนปฏิบัติการ (Operation Plan)

หมายเลขเอกสาร(For QDS) KM Document No.	SLRI-MN-2026-071
ชื่อเรื่อง Title	คู่มือการซ่อมบำรุงเชิงเทคนิคของ Sample Cartridge สำหรับ BL3.2b: PEEM
ชื่อฝ่าย Department	ฝ่ายระบบลำแสงแสง
วันที่เผยแพร่ Release date	22 มิถุนายน 2569
ระดับการเปิดเผยข้อมูล Level of Disclosure	☐ ข้อมูลในรายงานเป็นความลับ (Undisclosed)
	☐ เปิดเผยข้อมูลเฉพาะภายในฝ่ายหรือส่วนงาน (Information can be disclosed within department/section)
	☐ เปิดเผยข้อมูลได้สำหรับพนักงานของสถาบันฯ และอนุญาตให้บันทึกข้อมูลเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบ Knowledge Management ภายในสถาบันฯ (Information can be disclosed for SLRI staffs and can be part of SLRI's Knowledge Management System)
	☒ เปิดเผยข้อมูลได้เพื่อเป็นองค์ความรู้สาธารณะ เช่น เว็บไซต์ของสถาบันฯ (Information is available for public)
คำสำคัญ Keyword	Double Multilayer Monochromator ,Thermal Deformation, Thermal Stress

รายชื่อผู้จัดทำรายงานหรือผู้ดำเนินโครงการ (Name)	ส่วนร่วมในการปฏิบัติงานในโครงการ Responsible tasks in the project
นางสาวทิพย์อุษา วงศ์พินิจ	ทำการทดลอง และเขียนรายงาน
ดร. ชนรรค์ เอื้อรักสกุล	ปรึกษา และตรวจทานรายงาน
ดร. พัฒน์ โพธิ์ทองคำ	ปรึกษา และตรวจทานรายงาน

ประวัติการแก้ไข/ปรับปรุง

แก้ไขครั้งที่	วันที่เผยแพร่	รายละเอียดการปรับปรุง
0	22 มิถุนายน 2569	จัดทำครั้งแรก

สารบัญ

เนื้อหา	หน้า
1. บทนำ (Introduction)	4
2. วัตถุประสงค์ (Objectives)	4
3. นิยามศัพท์และคำย่อ (Definitions and Abbreviations)	5
4. รายละเอียดขั้นตอนการปฏิบัติงาน/การดำเนินงาน (Procedure)	7
4.1 รายละเอียดคุณลักษณะของอุปกรณ์และวัสดุ (Specifications & Components)	8
- ชิ้นส่วนโครงสร้างเชิงกลและอุปกรณ์ยึดจับ	8
- ระบบให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (Heating Systems)	9
- ระบบวัดและติดตามผลอุณหภูมิ (Temperature Sensing System)	11
- วัสดุฉนวนและวัสดุสิ้นเปลืองสำหรับซ่อมบำรุง	13
4.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงและการประกอบชิ้นส่วน (Maintenance & Assembly Procedures)	13
- การเตรียมและการทำความสะอาดชิ้นส่วน	13
- การเปลี่ยนและเชื่อมฟิลาเมนต์ (Filament Replacement & Spot Welding)	14
- ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ	17
- การเชื่อมต่อและจัดตำแหน่งวงแหวนโมลิบดีนัม (Moly ring)	18
- การตรวจสอบความถูกต้องทางไฟฟ้า (Electrical Verification)	20
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและการอภิปรายหลังการซ่อมบำรุง	22
5. สรุปผลการซ่อมบำรุง (Conclusion)	23
6. ข้อเสนอแนะ/ ปัญหาอุปสรรค แนวทางในการแก้ไขและพัฒนางาน	23
เอกสารอ้างอิง (References)	25

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1: ชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge)	7
รูปที่ 2: คราปนเปื้อน (Contaminant) บนพื้นผิวชิ้นส่วนเซรามิกฉนวน	13
รูปที่ 3: การทำลวด Filament	14
รูปที่ 4: การนำ sample holder มาทำการทดสอบกับเครื่อง PEEM	21
รูปที่ 5: แสดงอุณหภูมิและความดันระหว่างการทดสอบหลังการซ่อมบำรุง	22

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1: ชิ้นส่วนโครงสร้างเชิงกลและอุปกรณ์ยึดจับ	8
ตารางที่ 2: ชิ้นส่วนระบบให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (Heating Systems)	9
ตารางที่ 3: ชิ้นส่วนเซรามิกทนความร้อนสูง	12
ตารางที่ 4: การเชื่อมจุด (Spot Welding) บนแผ่น Tantalum	14
ตารางที่ 5: ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ	16
ตารางที่ 6: ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ	17
ตารางที่ 7: การตรวจสอบความถูกต้องทางไฟฟ้า	19
ตารางที่ 8: ผลการสอบเทียบอุณหภูมิเทียบกับกระแสไฟฟ้าฟิลาเมนต์	22

1. บทนำ

เทคนิค Photoemission Electron Microscopy (PEEM) และ Low Energy Electron Microscopy (LEEM) เป็นเครื่องมือขั้นสูงที่ใช้ในการตรวจสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นผิวของวัสดุ โดยหัวใจสำคัญของระบบนี้คือ ชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge) ซึ่งถูกออกแบบมาให้ผลิตจากวัสดุที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (non-magnetic materials) เพื่อไม่ให้รบกวนลำอิเล็กตรอน พร้อมคุณสมบัติที่รองรับการวัดอุณหภูมิที่แม่นยำและการเปลี่ยนตัวอย่างที่รวดเร็ว

ตัวยึดตัวอย่างนี้มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิที่หลากหลาย โดยมีระบบทำความร้อนในตัวที่รองรับทั้งการแผ่รังสีความร้อน (Radiative heating) ซึ่งทำอุณหภูมิได้ถึง 400 องศาเซลเซียส และการยิงลำอิเล็กตรอน (E-beam bombardment) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้สูงถึง 1000–1200 องศาเซลเซียส หรือ สำหรับการเผาผิวในระยะสั้น (short flashes) ในด้านการวัดอุณหภูมิ มีการติดตั้งเทอร์โมคอปเปอร์ชนิด Type-C (W5%Re/W26%Re) ไว้ที่วงแหวนโมลิบดีนัม (Mo ring) ใต้ตัวอย่าง และสามารถใช้ไพโรมิเตอร์แบบอินฟราเรดเพื่อการวัดที่แม่นยำยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้งานตัวยึดตัวอย่างภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่อง มักส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลงและเกิดปัญหาทางเทคนิค ปัญหาที่พบบ่อย ได้แก่ เซรามิกฉนวนปนเปื้อน (สารปนเปื้อนจากตัวอย่างระเหยมาเคลือบผิวเซรามิกจนกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า) ระบบทำความร้อนเสียหาย (ลวดฟิลาเมนต์ (Filament) หลุดหรือขาด) ระบบวัดอุณหภูมิขัดข้อง (สายเทอร์โมคอปเปอร์หลุดจากจุดเชื่อมบนวงแหวนโมลิบดีนัม)

เพื่อให้การทดลองมีประสิทธิภาพและได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง กระบวนการซ่อมบำรุงและการทดสอบประสิทธิภาพ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การซ่อมบำรุงที่ถูกต้อง เช่น การทำความสะอาดเซรามิก หรือการเปลี่ยนลวดฟิลาเมนต์ที่สั่นใหม่ จะช่วยให้ตัวยึดตัวอย่างกลับมาใช้งานได้ตามปกติ นอกจากนี้ การทดสอบและการทำ degas อุปกรณ์ก่อนการใช้งานจริงยังช่วยลดปัญหาการปล่อยก๊าซจากตัวอุปกรณ์ ทำให้สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้เร็วขึ้นและลดสิ่งรบกวนในระหว่างกระบวนการวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ

2. วัตถุประสงค์

1. กำหนดแนวทางปฏิบัติที่เป็นมาตรฐาน (Standard Operating Procedure) ในการซ่อมบำรุง และการประกอบชิ้นส่วนอุปกรณ์ของชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge) อย่างถูกต้อง
2. สร้างมาตรฐานในการตรวจสอบและทดสอบประสิทธิภาพ (Performance Validation & Degassing) เพื่อให้มั่นใจว่าชุดยึดตัวอย่างทุกตัวอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ พร้อมใช้งาน และมีเสถียรภาพ
3. ป้องกันปัญหาทางเทคนิคและรักษามาตรฐานการให้บริการ แสงซินโครตรอนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อรองรับการให้บริการวิจัยขั้นสูงในแต่ละรอบการปฏิบัติการได้อย่างต่อเนื่องและปลอดภัย

3. นิยามศัพท์และคำย่อ (Definitions and Abbreviations)

เพื่อให้ผู้อ่านและผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจที่ตรงกันเกี่ยวกับคำศัพท์เฉพาะทาง ศัพท์เชิงเทคนิค และคำย่อที่ปรากฏในคู่มือฉบับนี้ จึงกำหนดนิยามและความหมายไว้ดังต่อไปนี้

คำศัพท์เชิงเทคนิค (Technical Terms)

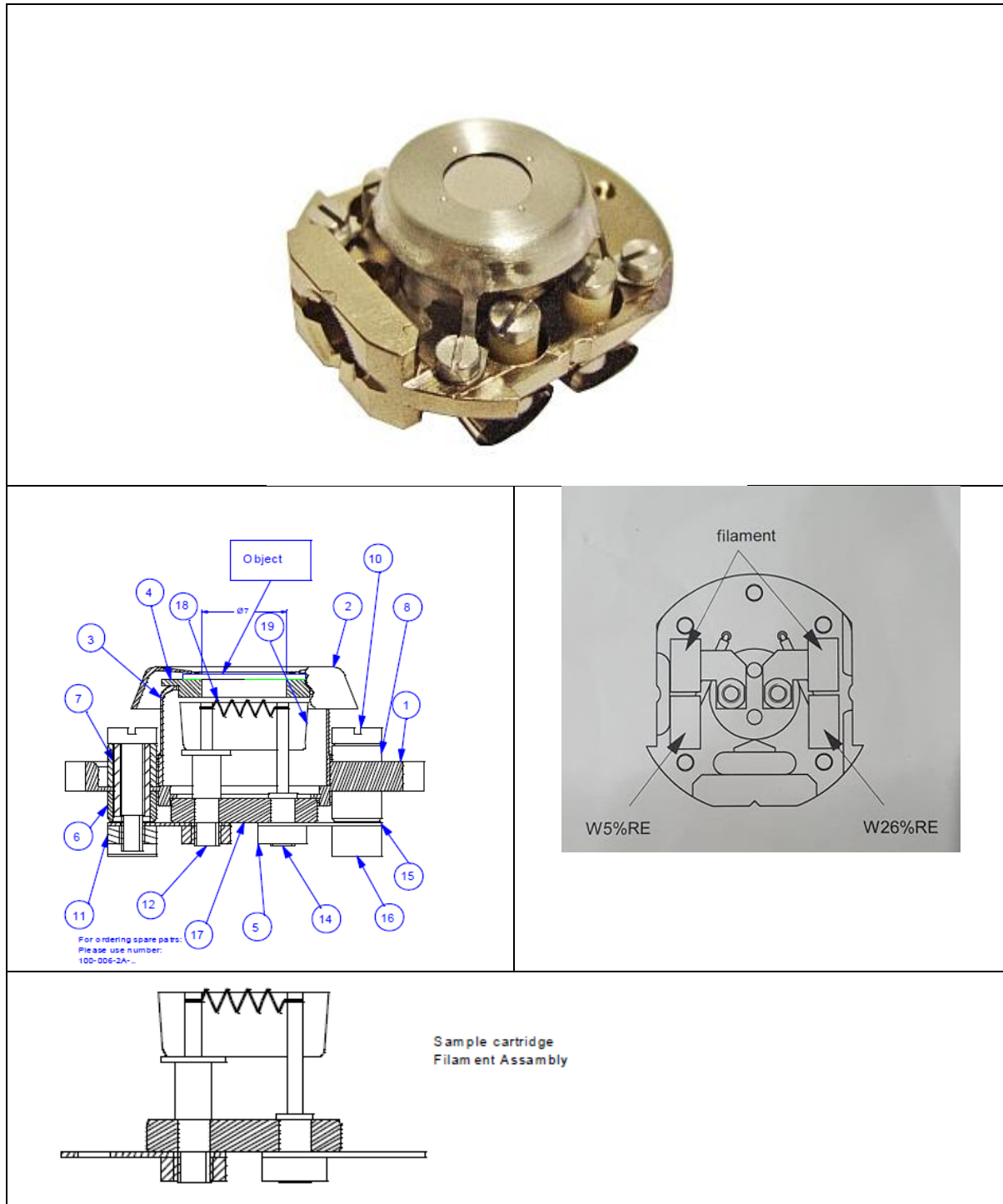
ศัพท์เชิงเทคนิค	นิยามและความหมาย
Sample Cartridge (ชุดยึดตัวอย่าง)	อุปกรณ์ฐานรองสำหรับยึดติดตั้งตัวอย่างทดลอง (Sample holder) ออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายผ่านระบบสุญญากาศ และรองรับการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้า/ระบบวัดอุณหภูมิภายในสถานีทดลองได้อย่างแม่นยำ
Moly ring (วงแหวนโมลิบดีนัม)	ชิ้นส่วนทรงกลมที่ทำจากโลหะโมลิบดีนัม (Molybdenum) มีคุณสมบัติทนความร้อนสูงและนำความร้อนได้ดี ใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญในโครงสร้างรองรับตัวอย่างและการวัดอุณหภูมิ
Contact Spring (ขั้วสัมผัสสปริง)	ชิ้นส่วนโลหะที่มีความยืดหยุ่น ทำหน้าที่เป็นจุดสัมผัสทางไฟฟ้าเพื่อส่งผ่านสัญญาณหรือกระแสไฟฟ้าระหว่างตัว Sample Cartridge กับระบบภายนอก
Thermocouple Type-C (เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C)	Thermocouple Type-C (เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำจากลวดโลหะผสมพิเศษทั้งสแตนเลสและเรเนียม (W5%Re/W26%Re) สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงมากในสภาวะสุญญากาศโดยไม่หลอมละลาย
Thermocouple Junction (จุดเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิล)	จุดที่ลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นเชื่อมต่อกัน เพื่อเกิดปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่แปรผันตามอุณหภูมิ (มักอยู่บริเวณใต้หรือใกล้เคียงกับตัวอย่างทดลองเพื่อวัดอุณหภูมิสะสม)
Isolation Ceramic (เซรามิกฉนวน)	Isolation Ceramic (เซรามิกฉนวน) ชิ้นส่วนเซรามิกทนความร้อนสูง ทำหน้าที่เป็นฉนวนไฟฟ้าเพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างส่วนที่มีกระแสไฟฟ้ากับโครงสร้างโลหะของอุปกรณ์
Molybdenum (Mo) / Moly	Molybdenum (Mo) / Moly โลหะโมลิบดีนัม ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงและไม่ปล่อยก๊าซในสภาวะสุญญากาศยิ่งยวด ใช้เป็นโครงสร้างหลักของชุดยึดตัวอย่าง
Continuity Check (การตรวจสอบความต่อเนื่องทางไฟฟ้า)	การทดสอบโดยใช้มัลติมิเตอร์เพื่อเช็คว่าวงจรไฟฟ้าเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ไม่มีจุดขาดตอนหรือจุดหลุดหลวม
Grounding Check (การเช็กการลงกราวด์)	การตรวจสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าระหว่างขั้วสัญญาณเป้าหมายเทียบกับโครงสร้างโลหะหลัก เพื่อให้แน่ใจว่าระบบมีการอ้างอิงแรงดันไฟฟ้าที่ถูกต้องตามเงื่อนไขทางเทคนิค

Filament (ฟิลาเมนต์)	Filament (ฟิลาเมนต์) ลวดทั้งสแตนที่ขดเป็นรูปทรงสปริง ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้า
Tantalum (Ta) โลหะแทนทาลัม	Tantalum (Ta) โลหะแทนทาลัม ทนความร้อนสูงและมีความทนทานต่อการกัดกร่อน ใช้เป็นจุดเชื่อมประสานทางไฟฟ้าในชุดอุปกรณ์
Radiative Heating	Radiative Heating: ระบบทำความร้อนโดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากฟิลาเมนต์ไปยังตัวอย่างโดยตรง เหมาะสำหรับอุณหภูมิไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส
E-beam Bombardment (Electron Bombardment)	E-beam Bombardment (Electron Bombardment): เทคนิคการทำอุณหภูมิสูงมาก (1,300–1,500 องศาเซลเซียส) โดยใช้แรงดันไฟฟ้าศักย์สูงเร่งอิเล็กตรอนให้พุ่งชนด้านหลังตัวอย่าง
Degas / Degassing	Degas / Degassing: กระบวนการกำจัดหรือลดก๊าซที่ตกค้างในวัสดุอุปกรณ์ก่อนการใช้งานจริง เพื่อรักษาความสะอาดของระบบสุญญากาศ
EMF (Electromotive Force)	EMF (Electromotive Force): แรงดันไฟฟ้าที่แปรผันตามอุณหภูมิซึ่งส่งมาจากเทอร์โมคัปเปิล เพื่อใช้ในการประมวลผลและควบคุมอุณหภูมิ
HCl (Hydrochloric Acid)	HCl (Hydrochloric Acid): กรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 5-10%) ใช้สำหรับแช่ทำความสะอาดคราบปนเปื้อนโลหะบนชิ้นส่วนเซรามิก

อักษรย่อและคำย่อ (Abbreviations & Symbols)

อักษรย่อ	นิยามและความหมาย
PEEM	PEEM: Photoemission Electron Microscopy (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบปลดปล่อยด้วยแสง) เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวโดยการวัดอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยแสง (รวมถึงแสงซินโครตรอน)
LEEM	LEEM: Low Energy Electron Microscopy (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ) เทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและสัณฐานวิทยาของพื้นผิวโดยใช้การสะท้อนของอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ
UHV	UHV (Ultra-High Vacuum): สุญญากาศระดับยอดเยี่ยม สภาวะที่มีความดันต่ำกว่า 10^{-9} mbar ซึ่งเป็นสภาวะจำเป็นสำหรับสถานีทดลอง PEEM/LEEM เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของพื้นผิวตัวอย่าง
TC	TC (Thermocouple): เทอร์โมคัปเปิล อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำจากลวดโลหะต่างชนิดกัน
W5%Re / W26%Re	W5%Re / W26%Re: สัญลักษณ์แทนชนิดของลวดเทอร์โมคัปเปิลประเภท Type C
W5%Re	W5%Re คือ โลหะผสมทั้งสแตนผสมรีเนียม 5% (Tungsten-5% Rhenium)
W26%Re	W26%Re คือ โลหะผสมทั้งสแตนผสมรีเนียม 26% (Tungsten-26% Rhenium)

4. รายละเอียดขั้นตอนการปฏิบัติงาน/การดำเนินงาน (Procedure):



รูปที่ 1 ชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge)

4.1 รายละเอียดคุณลักษณะของอุปกรณ์และวัสดุ (Specifications & Components)

ในระบบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนขั้นสูง PEEM/LEEM ชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge) ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงแคื่อยึดจับชิ้นงานทดลองเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นสถานีรับส่งสัญญาณไฟฟ้า ขั้วแรงดันสูง และระบบควบคุมอุณหภูมิในสภาวะสุญญากาศระดับสูงมาก (UHV) อีกด้วย เพื่อให้การปฏิบัติงานและการซ่อมบำรุงเป็นไปอย่างถูกต้อง จึงสามารถจำแนกรายละเอียดและคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 1, 2 และ 3 และวัสดุออกเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

1. ชิ้นส่วนโครงสร้างเชิงกลและอุปกรณ์ยึดจับ (Mechanical Components & Sample Fixtures)

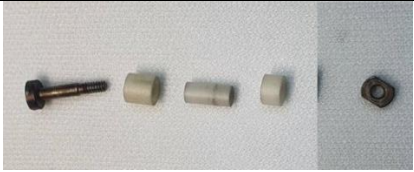
โครงสร้างหลัก (Sample Cartridge Body): ตัวฐานและโครงสร้างหลัก ทำจากโมลิบดีนัม (Molybdenum) เนื่องจากเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูงมากในอุณหภูมิสูง และไม่ปล่อยแก๊สในสภาวะสุญญากาศยิ่งยวด (Ultra-High Vacuum) ผลิตขึ้นจากโลหะพิเศษประเภทที่ไม่เป็นแม่เหล็ก (Non-magnetic materials) เพื่อป้องกันการเกิดสนามแม่เหล็กรบกวนทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนพลังงานต่ำในขณะทำการวิเคราะห์ โครงสร้างนี้ต้องมีความเสถียรเชิงมิติสูงแม้ได้รับความร้อนสะสม

ฝาครอบโมลิบดีนัม (Mo cap): ฝาครอบที่ทำจากโลหะโมลิบดีนัม (Molybdenum) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงมากและทนความร้อนได้ดีเยี่ยม ทำหน้าที่ครอบล็อกและกดทับตัวอย่างหน้าเรียบให้ยึดติดกับตัวยึดตัวอย่างอย่างแน่นหนา เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวอย่างขยับเขยื้อนขณะขยับแท่นวัด และช่วยให้ผิวหน้าของตัวอย่างอยู่ในระนาบและระดับความสูงที่ถูกต้องตามโฟกัสของเลนส์อิเล็กตรอน

ถ้วยครอบโมลิบดีนัม (Molybdenum cup): ทำหน้าที่เป็นถ้วยครอบหรือฝาครอบป้องกันโครงสร้างภายใน (Shielding & Protection) Moly cup ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเป็นทรงถ้วยเพื่อครอบปิดและปกป้องชุดให้ความร้อนภายใน (ชุด Filament Assembly ที่อยู่ด้านใต้) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายเชิงกลหรือเกิดการปนเปื้อนโดยตรง เป็นฐานติดตั้งสำหรับวงแหวนวัดอุณหภูมิ (Base for Moly Ring)

ตารางที่ 1 ชิ้นส่วนโครงสร้างเชิงกลและอุปกรณ์ยึดจับ

Part number		รายละเอียดอุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
1	100-006-2A- 1	Basis plate	
2	100-006-2A- 3	Molybdenum cup	

3	100-006-2A- 10+11	Molybdenum screw and nut M1.7	
4	100-006-2A- 6+7+8	isolation ceramic (1set per cartridge)	
5	100-006-2A- 2	Molybdenum-hat with hole	
	100-006-2A- 13	Moly screw M2	

2. ระบบให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (Heating Systems)

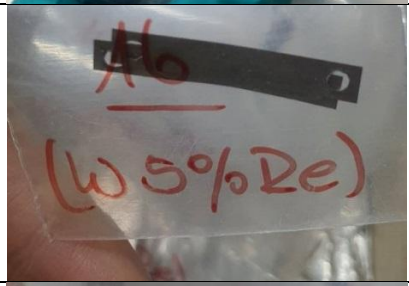
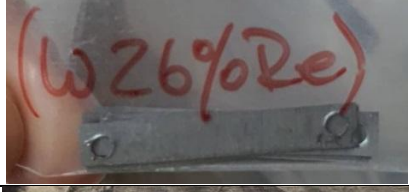
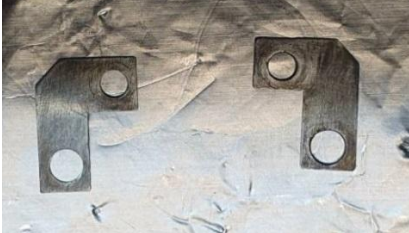
ระบบทำความร้อนภายใน Sample Cartridge ถูกออกแบบมาให้รองรับการทำงาน 2 รูปแบบ เพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการทดลองและระดับอุณหภูมิที่ต้องการ

ระบบแผ่รังสีความร้อน (Radiative Heating): อาศัยกระบวนการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านลวดฟิลาเมนต์ทังสเตน (Tungsten Filament) ที่ติดตั้งอยู่ภายใน เพื่อให้ลวดเกิดความร้อนจนเปล่งแสงและแผ่รังสีความร้อนไปยังด้านหลังของตัวอย่างโดยตรง ระบบนี้เหมาะสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิในระดับต่ำถึงปานกลาง (อุณหภูมิใช้งานทั่วไปไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส) มีข้อดีคือควบคุมการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิได้ง่ายและมีความเสถียรสูง

ระบบยิงลำอิเล็กตรอน (Electron Bombardment หรือ E-beam): เป็นเทคนิคขั้นสูงสำหรับการทำอุณหภูมิสูง Extreme High Temperature) ในช่วง 1,000 ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งมักใช้ในกระบวนการเตรียมผิวตัวอย่างให้สะอาดบริสุทธิ์ (Sample Cleaning) กลไกการทำงานจะเริ่มจากการจ่ายกระแสไฟให้ฟิลาเมนต์ปล่อยอิเล็กตรอนออกมา จากนั้นจะมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงศักย์สูง (High Voltage) เพื่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนเหล่านั้นให้พุ่งเข้าชนกระแทกที่ด้านหลังของตัวอย่างด้วยความเร็วสูง พลังงานจลน์จากอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนในทันที ทำให้สามารถทำอุณหภูมิสูงได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 2 ชิ้นส่วนระบบให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง (Heating Systems)

Part number		รายละเอียดอุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
1	100-006-2A- 4	Molybdenum ring	
2	100-006-2A- 5+14	Filament pin and nut M2	

3	100-006-2A- 5+12	Filament pin and nut M2	
4	720265 (Nilaco) D: 0.20mm L: 1m	W5%Re Wire	
5	730265 (Nilaco) D: 0.20mm L: 1m	W26%Re Wire	
6	461227 (Nilaco) D: 0.15mm L: 10m	Tungsten Wire for Filament	
7	100-006-2A- 16	Contact spring for TC-W5%Re	
8	100-006-2A- 16a	Contact spring for TC-W26%Re	
9	100-006-2A-15	L-sheet	

10	100-006-2A- 19	Reflector cap	
11	413242 (Nilaco) (0.03x200x200 mm)	แผ่น Tantalum	

3. ระบบวัดและติดตามอุณหภูมิ (Temperature Sensing System)

เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C (Thermocouple Type-C): เนื่องจากชุดยึดตัวอย่างต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิที่สูงมาก ระบบจึงเลือกใช้ขั้ววัดอุณหภูมิที่ทำจากโลหะผสมพิเศษทั้งสแตนเลสและเรเนียม (W5%Re/W26%Re) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่สามารถคงสภาพและวัดค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำในสภาวะสุญญากาศสูงโดยไม่หลอมละลาย

วงแหวนโมลิบดีนัมสำหรับจุดสัมผัส (Molybdenum Ring for Contact): ปลายสายของเทอร์โมคัปเปิลจะถูกต่อเข้ากับวงแหวนโมลิบดีนัม เพื่อทำหน้าที่เป็นจุดรับสัมผัสเชิงกลและส่งผ่านสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (EMF) ที่แปรผันตามอุณหภูมิกลับไปยังระบบควบคุมภายนอกได้อย่างแม่นยำ

Molybdenum ring (หรือ Moly ring / Mo ring): วงแหวนโมลิบดีนัมทำหน้าที่เป็นฐานรองรับทางกลศาสตร์ (Mechanical Support) ซึ่งติดตั้งอยู่บริเวณใต้แผ่นตัวอย่างทดลองโดยตรง (Proximity Position) พื้นผิวของวงแหวนนี้ใช้เป็นจุดเชื่อมประสานทางไฟฟ้าและความร้อน โดยใช้วิธีการเชื่อมจุด (Spot-welding) เพื่อยึดปลายสายของหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิลประเภท Type-C (W5%Re / W26%Re) เข้ากับแผ่นโลหะแทนทาลัม (Tantalum Foil) ที่ติดตั้งอยู่บนตัววงแหวน โครงสร้างลักษณะนี้ช่วยให้สามารถรับและส่งผ่านสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric Voltage) ซึ่งแปรผันตรงตามอุณหภูมิ ส่งกลับไปยังระบบประมวลผลและควบคุมอุณหภูมิส่วนกลาง (Temperature Controller) ได้อย่างแม่นยำ

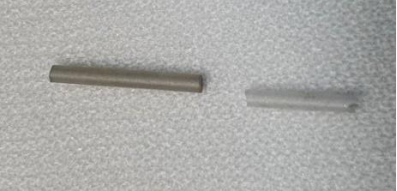
Filament pin (ขาฟิลาเมนต์): ทำหน้าที่เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าหลักและโครงสร้างรองรับสำหรับชุดให้ความร้อนภายใน (Filament Assembly) เพื่อให้ขาทำหน้าที่เป็นสะพานไฟในการรับกระแสไฟฟ้าและส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าไปยังลวดฟิลาเมนต์ทั้งสแตนเลสในการทำความร้อนให้แก่ตัวอย่างทดลอง ขาพินนี้จะถูกร้อยเชื่อมต่อลงไปยังส่วนฐาน โดยเชื่อมเข้ากับชิ้นส่วนเซรามิกฉนวนแบบ 4 รู (4-hole ceramic) และแผ่น L-sheet ก่อนจะประกบยึดเข้ากับแผ่นฐานหลัก (Basis plate)

Contact spring for TC-W5% (สปริงหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า): หน้าที่หลักของ Contact spring คือ ทำหน้าที่เป็นตัวรับหน้าสัมผัสเชิงกลและส่งผ่านสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (EMF) จากลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิดทั้งสแตนเลส-เรเนียม 5% (Wire W5%Re) ของชุดวัดอุณหภูมิ เพื่อนำสัญญาณเชื่อมต่อไปยังระบบอ่านค่าและควบคุมอุณหภูมิภายนอกตัวยึดตัวอย่าง ช่วยรักษาความเสถียรและแรงกดของหน้าสัมผัส (Maintaining Mechanical Tension) เนื่องจากชุดยึดตัวอย่างต้องมีการเคลื่อนย้ายเข้า-ออกระบบ (Sample Transfer) และต้องเผชิญกับการขยายตัว-หดตัวทางความร้อนสูงมาก (Thermal Cycling) ตัวสปริงนี้จะทำหน้าที่ให้ความยืดหยุ่นเชิงกล ช่วยกดให้ขั้วเชื่อมต่อไฟฟ้าแนบสนิทอยู่ตลอดเวลา ป้องกันปัญหาน้ำสัมผัสหลวมหรือสัญญาณขาดหายในระหว่างการทดลอง และป้องกันไฟฟ้าลัดวงจรผ่านชิ้นส่วนฉนวน ตัวสปริงจะถูกติดตั้งยึดเข้ากับแผ่นฐานหลัก (Basis plate) โดยต้องทำงานร่วมกับสกรูโมลิบดีนัม (Moly screw

and nut M1,7) และเซรามิกฉนวน (Isolation ceramic) เพื่อทำหน้าที่ลือกสัญญาณเฉพาะของขั้ว W5%Re ให้แยก
ขาดจากโครงสร้างส่วนอื่นอย่างเป็นระบบ

ข้อควรระวังสำคัญในขั้นตอนการประกอบ (Assembly Note) ห้ามสลับขั้วเด็ดขาด ในคู่มือระบุชัดเจนว่าลวดเทอร์
โมคัปเปิลและ Contact spring ต้องมีเปอร์เซ็นต์เรเนียม (%Re) ที่เท่ากันและตรงกัน โดยชิ้นส่วนนี้ (หมายเลข 11)
ต้องใช้คู่กับลวด W5%Re เท่านั้น ส่วนลวด W26%Re จะต้องแยกไปใช้คู่กับ Contact spring for TC-W26%Re
(หมายเลข 12, Part number: 100-006-2A-16a) การตรวจสอบหลังประกอบ หลังจากประกอบเสร็จสิ้น จะต้อง
ใช้มัลติมิเตอร์ทำการวัดค่าความต้านทาน (Contact Check) ระหว่างหน้าสัมผัสของเทอร์โมคัปเปิล เพื่อยืนยันว่าค่า
ความต้านทานเชื่อมต่อถึงกันอย่างสมบูรณ์และไม่สูงเกินไป เพื่อให้ระบบควบคุมสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้อย่าง
แม่นยำ

ตารางที่ 3 ชิ้นส่วนเซรามิกทนความร้อนสูง

Part number		รายละเอียดอุปกรณ์	รูปภาพประกอบ
1	100-006-2A- 9a+9b	TC isolation ceramic (1set per cartridge)	
2	100-006-2A- 17	4-hole ceramic	

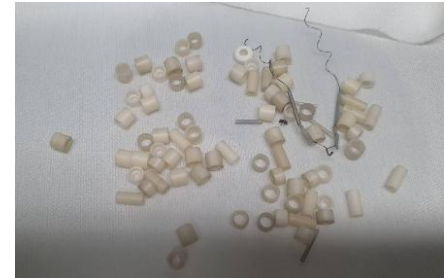
3.4 วัสดุฉนวนและวัสดุสิ้นเปลืองสำหรับซ่อมบำรุง (Isolation & Maintenance Materials)

เซรามิกฉนวน (Isolation Ceramic): ชิ้นส่วนเซรามิกทนความร้อนสูง ทำหน้าที่เป็นฉนวนกั้นระหว่างส่วนที่มี
กระแสไฟฟ้า/แรงดันไฟฟ้าสูง (เช่น ขาฟิลาเมนต์ และขั้ว E-beam) กับโครงสร้างหลักที่เป็นโลหะ เพื่อป้องกันการเกิด
ไฟฟ้าลัดวงจร ชิ้นส่วนนี้จำเป็นต้องได้รับการดูแลไม่ให้มีสารปนเปื้อน (Contaminant) มาเกาะจับ

แผ่นแทนทาลัม (Tantalum Sheet): วัสดุสิ้นเปลืองที่เป็นโลหะทนความร้อนสูง ทนทานต่อการกัดกร่อน และมี
อัตราการคายก๊าซ (Outgassing) ในระบบสุญญากาศต่ำมาก ใช้สำหรับตัดเป็นแผ่นขนาดเล็กเพื่อรองรับการเชื่อมจุด
(Spot Welding) ในการยึดต่อระหว่างขาฟิลาเมนต์ทั้งสแตนเข้ากับขั้วจ่ายไฟให้มีความแข็งแรงเชิงกลสูงและนำไฟฟ้า
ได้ดี ในขั้นตอนการประกอบอุปกรณ์ เมื่อผู้ปฏิบัติงานติดตั้งชุดฟิลาเมนต์และร้อยสายเทอร์โมคัปเปิลขึ้นมาด้านบนแล้ว
จะต้องทำการครอบ Moly cup ลงไปก่อน จากนั้นจึงจะนำแหวนโมลิบดีนัม (Moly ring) มาวางซ้อนไว้ด้านบนของ
Moly cup อีกทีหนึ่ง เพื่อทำการเชื่อมต่อปลายสายเทอร์โมคัปเปิล (TC) เข้ากับจุดแทนทาลัมต่อไป

4.2 ขั้นตอนการซ่อมบำรุงและการประกอบชิ้นส่วน (Maintenance & Assembly Procedures)

เมื่อชุดยึดตัวอย่างผ่านการใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิสูง (1,100 °C ถึง 1,500 °C) อย่างต่อเนื่อง ชิ้นส่วนภายในจะเกิดการเสื่อมสภาพเชิงโครงสร้าง ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องดำเนินการกระบวนการกู้คืนสภาพอุปกรณ์ตามลำดับขั้นตอนที่เข้มงวดภายใต้สภาวะแวดล้อมที่สะอาด เพื่อคงความสมบูรณ์ในการทำงานภายใต้ระบบสุญญากาศระดับสูงมาก (UHV Compatibility) ดังนี้



รูปที่ 2 คราบปนเปื้อน (Contaminant) บนพื้นผิวชิ้นส่วนเซรามิกฉนวน

1. การเตรียมและการทำความสะอาดชิ้นส่วน (Component Preparation & Cleaning)

คราบปนเปื้อน (Contaminant) ที่เกิดจากการระเหยของตัวอย่างขณะได้รับความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2 จะเข้าไปเคลือบผิวชิ้นส่วนเซรามิกฉนวนจนทำให้สูญเสียความเป็นฉนวนและเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดระบบไฟฟ้าลัดวงจร โดยมีขั้นตอนการจัดคราบอย่างละเอียดดังนี้ ขั้นตอนการล้างทางเคมีสำหรับเซรามิกฉนวน (Isolation Ceramic) แยกชิ้นส่วนเซรามิกฉนวน (Isolation ceramic, 4-hole ceramic, TC isolation ceramic) ออกจากโครงสร้างโลหะอย่างระมัดระวังเพื่อป้องกันการแตกหัก นำชิ้นส่วนเซรามิกที่มีคราบปนเปื้อนไปแช่ใน กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 5-10% เพื่อทำปฏิกิริยากัดเซาะคราบโลหะและสารปนเปื้อนที่เกาะติดอยู่บนพื้นผิว นำชิ้นส่วนขึ้นจากกรดแล้วทำการล้างทำความสะอาดอย่างหมดจดด้วย น้ำดีไอ (Deionized Water: DI Water) ด้วยเครื่อง Ultrasonic Cleaner เป็นเวลา 15-30 นาที เพื่อขจัดสารเคมีตกค้าง ขั้นตอนการจัดคราบฝังลึกเชิงกล: หากคราบปนเปื้อนมีความหนามากและฝังลึกจนสารเคมีไม่สามารถกัดออกได้หมด (ตรวจสอบแล้วยังคงนำไฟฟ้า) ให้ใช้กระดาษทรายเบอร์ 800 ทำการขัดเบาๆ บนผิวเซรามิกบริเวณที่นำไฟฟ้าอย่างระมัดระวังจนกว่าคราบจะหลุดออกหมด เกณฑ์การตรวจสอบความเป็นฉนวน (Verification Criteria) ใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความต้านทานบนผิวเซรามิกหลังทำความสะอาด ผลการวัดจะต้องแสดงค่าเป็นอนันต์ (Overload: O.L หรือไม่แสดงผลบนมิเตอร์) เพื่อยืนยันว่าชิ้นส่วนกลับคืนสภาพความเป็นฉนวนที่สมบูรณ์ 100% การทำความสะอาดชิ้นส่วนโลหะ (โมลิบดีนัม และ แทนทาลัม) นำชิ้นส่วนโลหะ เช่น Basis plate, Moly cup, Moly ring ไปล้างด้วยตัวทำละลายความบริสุทธิ์สูง (เช่น อะซิโตนและเอทานอล) ในเครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรก เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนแห้งบริสุทธิ์ และห้ามสัมผัสชิ้นส่วนด้วยมือเปล่า (ต้องสวมถุงมือไร้แป้งตลอดเวลา) เพื่อป้องกันคราบไขมันจากผิวหนังซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซหลงเหลือ (Outgassing) ในระบบสุญญากาศ

2. ขั้นตอนการเปลี่ยนและเชื่อมฟิลาเมนต์ (Filament Replacement & Spot Welding)

เมื่อลวดทั้งสแตนเดมเปราะหรือขาดจากการขยายตัวและหดตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cycling) ให้ปฏิบัติตามขั้นตอนการผลิตและประกอบชุด Filament Assembly
ขั้นตอนการตัดทำลวดฟิลาเมนต์:

เลือกใช้ลวดทังสเตน (Tungsten wire) สเปกความบริสุทธิ์สูง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 มิลลิเมตร นำก้านโลหะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร มาใช้เป็นแกนกลาง ทำการม้วนพันลวดทังสเตนรอบแกนเหล็กให้ได้รูปทรงสปริงอย่างเป็นระเบียบจำนวน 12 ถึง 16 รอบ (ค่าความต้านทานประมาณ 1-5 โอห์ม)

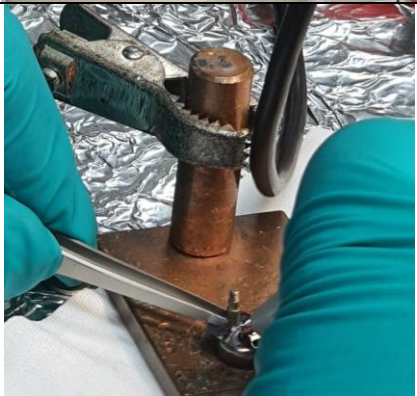
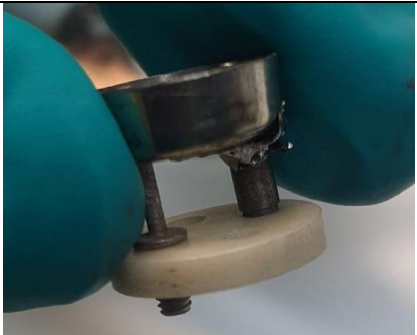


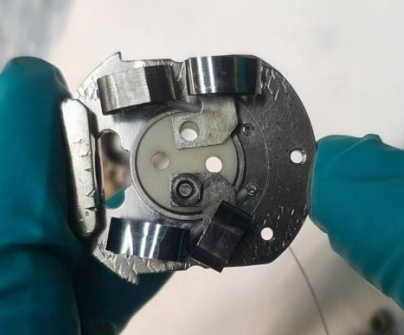
รูปที่ 3 การทำลวด Filament

3. การเชื่อมจุด (Spot Welding) บนแผ่น Tantalum โดยรายละเอียด แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การเชื่อมจุด (Spot Welding) บนแผ่น Tantalum

ลำดับ	รูปภาพการประกอบ Sample cartridge	รายละเอียด
1		ตัดแผ่นแทนทาลัม (Tantalum sheet ความหนา 0.03 มิลลิเมตร) ให้ได้ขนาดประมาณ 0.5 × 0.7 เซนติเมตร ใช้แท่งโลหะปลายแหลมเจาะรูตรงกลางแผ่นแทนทาลัมที่ตัดไว้
2		นำแผ่นแทนทาลัมสวมเข้าที่ด้านบนของ Filament pin

3		ประกอบติดตั้งเข้ากับ Reflector cap ตรงช่องรูเล็ก
4		เปิดเครื่องเชื่อมจุด (Spot Welder) โดยกดปุ่มสี่เหลี่ยมทางขวา ปรับค่ากำลังไฟ (Power) ไปที่ประมาณ 75 และรอน สัญญาณไฟสีเขียวที่คำว่า "READY" สว่างขึ้น
5		นำ Filament pin แผ่น Tantalum เข้ากับ Reflector cap มาวางบนฐานทองแดงสำหรับเชื่อม โดยต้องหนีบสาย กราวด์ (Grounding clip) ไว้ที่แท่งทองแดงเพื่อความ ปลอดภัยและการนำกระแสไฟฟ้าที่ดี นำหัวเชื่อมกดลงบน แผ่นแทนทาลัมในจุดที่ต้องการเชื่อม กดเท้าวางบนแป้น เหยียบด้านล่างเพื่อปล่อยกระแสไฟเชื่อม (ไฟ READY สี เขียวจะดับลง) รอนไฟ READY สีเขียวสว่างขึ้นอีกครั้ง จึง ทำการเชื่อมจุดกดไปจนแน่นหนาครบทุกจุด
6		ลักษณะเมื่อเชื่อม Filament pin แผ่น Tantalum เข้ากับ Reflector cap เสร็จ ดังแสดงในภาพ
7		นำ Filament pin อีกตัวประกอบเข้ากับ Reflector cap แล้วนำทั้งหมดประกอบเข้ากับฉนวนเซรามิกแบบ 4 รู (4- hole ceramic)

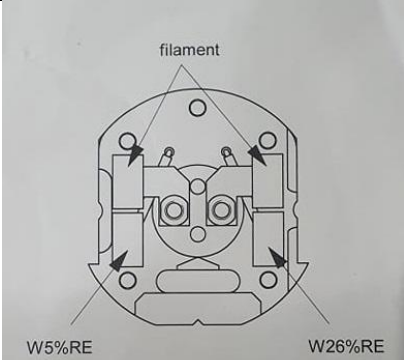
8		หลังจากนั้นนำชุด Filament Assembly มาประกอบเข้ากับ Basis plate
9		นำแผ่นขา L (L-sheet) ด้านสั้นประกอบยึดเข้ากับรูของ 4-hole ceramic แล้วขันด้วย Nut M2 ให้แน่นหนา เพื่อตรึงโครงสร้างของ ชุด Filament Assembly ให้มั่นคง

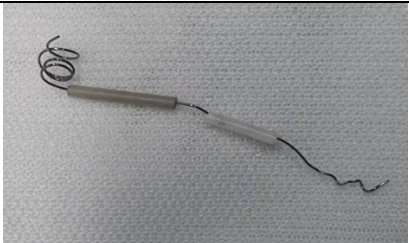
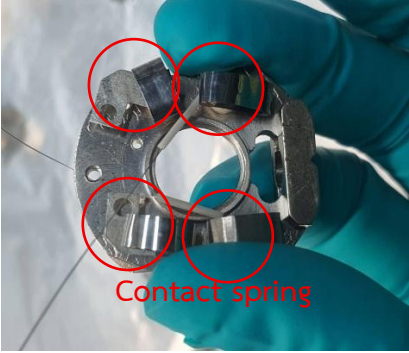
4. ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ

หากลวดเทอร์โมคัปเปิลหลุด ขาด หรือมีความยาวไม่เพียงพอ ให้ดำเนินขั้นตอนกู้คืนระบบเพื่อรักษาเสถียรภาพในการติดตามผลอุณหภูมิ (Temperature feedback) ดังนี้

การเตรียมสายและร้อยฉนวน: เตรียมลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C ขนาด 0.20 mm ได้แก่ ลวด W5%Re และ ลวด W26%Re หากสายเดิมสั้นเกินไปให้เปลี่ยนลวดใหม่ยกชุดทันที โดยรายละเอียด แสดงในตารางที่ 5

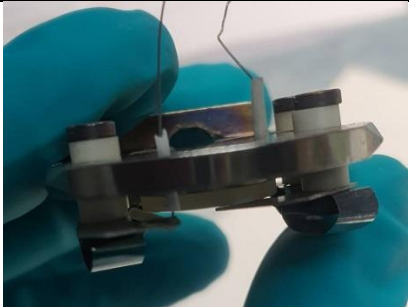
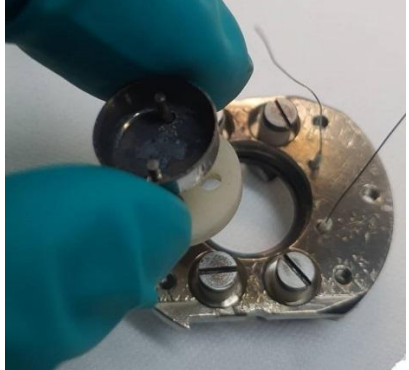
ตารางที่ 5 ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ

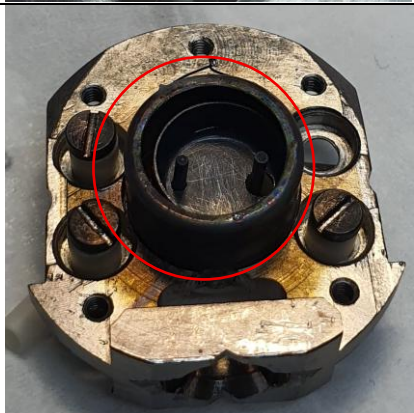
ลำดับ	รูปภาพการประกอบ Sample cartridge	รายละเอียด
1		ต่อ Thermocouple (TC) สำหรับอุณหภูมิตัวอย่างโดยใช้ลวด W5%Re และ W26%Re , Contact spring for TC-W5%Re และTC-W26%Re และ TC isolation ceramic

2		ทำการร้อยลวดแต่ละเส้นแยกกันเข้าไปในปลอกฉนวนเซรามิกสำหรับเทอร์โมคัปเปิล (TC isolation ceramic)
3		นำสายที่ร้อยแล้วไปร้อยประกบเข้ากับ Basis plate ร่วมกับสปริงหน้าสัมผัส (Contact spring) โดยมีเงื่อนไขสำคัญคือลวดและ Contact spring ต้องมีเปอร์เซ็นต์เรเนียม (%Re) ที่ตรงกันชั่วโครชั่วมันเด็ดขาด (W5%Re คู่กับหมายเลข 11 และ W26%Re คู่กับหมายเลข 12) ขันยึดชุดสายเข้ากับแผ่นฐานหลักด้วยสกรูและน็อตโมลิบดีนัมขนาด M1.7 ร่วมกับ Isolation ceramic เพื่อแยกสัญญาณไฟฟ้าออกจากฐาน

5. การเชื่อมต่อและจัดตำแหน่งบนวงแหวนโมลิบดีนัม (Moly ring) โดยรายละเอียด แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ขั้นตอนการซ่อมแซมจุดวัดอุณหภูมิ

ลำดับ	รูปภาพการประกอบ Sample cartridge	รายละเอียด
1		นำปลายลวดที่ร้อย TC isolation ceramic ร้อยเข้ากับ Basis plate ขึ้นมาด้านบนของ Basis plate
2		หลังจากนั้นนำชุด Filament Assembly มาประกอบเข้ากับ Basis plate

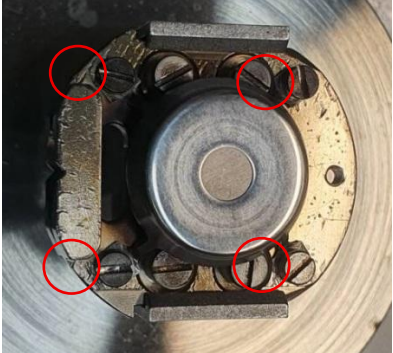
3		และประกอบ Contact spring for filament, Filament Assembly เข้ากับ Basis plate ด้วย Moly screw and nut M1.7 และ isolation ceramic ดังแสดงในภาพ
4		ปลายลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C ทั้งสองเส้น (ฝั W5%Re และฝั W26%Re) จะต้องถูกตัดให้พาดผ่านและแนบสนิท
5		แล้วทำการครอบถ้วยโมลิบดีนัม (Moly cup) ลงไป
6		นำลวดฟิลาเมนต์ทั้งสแตนที่ตัดเสร็จแล้วมาจัดวางตำแหน่ง โดยให้ขดสปริงอยู่ตรงกลางช่องของ Reflector cap และตัดปลายลวดสวมเข้ากับขา Filament pin แต่ละข้าง
7		ตัดแผ่นแทนทาลัม (Tantalum) ชิ้นเล็กๆ นำมาเชื่อมจุด (Spot-weld) ยึดติดไว้บนวงแหวนโมลิบดีนัม (Moly ring) เพื่อทำหน้าที่เป็นจุดประสาน

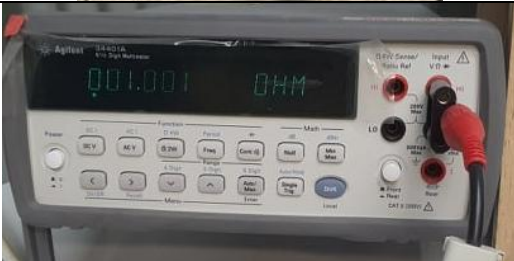
8		นำ Moly ring วางซ้อนบน Moly cup จากนั้นขันดัดจัดตำแหน่งปลายลวดเทอร์โมคัปเปิล (TC) ให้แตะสนิทบนจุดแทนทาลัม แล้วใช้เครื่อง Spot Welding เชื่อมประสานปลายลวดติดเข้ากับจุดแทนทาลัมบน Moly ring ให้แน่นหนาและมีหน้าสัมผัสทางไฟฟ้าที่ดีที่สุด
9		การเชื่อม ปลาย TC เข้ากับจุด Tantalum บน Moly ring เรียบร้อย

6. การตรวจสอบความถูกต้องทางไฟฟ้า (Electrical Verification)

หลังจากประกอบชิ้นส่วนทั้งหมดเข้าด้วยกัน รวมถึงการวางฐานรองตัวอย่าง ตัวอย่าง และชั้นล็กฝาครอบด้านบนสุด (Moly-hat with hole) ด้วยสกรู M2 เรียบร้อยแล้ว ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้มัลติมิเตอร์ดิจิทัลทำการตรวจสอบระบบไฟฟ้าอย่างละเอียดก่อนนำชุดอุปกรณ์ไปใช้งานจริง เพื่อป้องกันการเกิดไฟฟ้าลัดวงจรภายใน (Sample Holder) โดยรายละเอียด แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การตรวจสอบความถูกต้องทางไฟฟ้า (Electrical Verification)

ลำดับ	รูปภาพการประกอบ Sample cartridge	รายละเอียด
1		วางฐานรองตัวอย่าง และ ตัวอย่างวางด้านบนฐานรอง
2		ใส่ Moly-hat with hole ด้วย Moly screw M2

3	 	การวัดค่าความต้านทานและวงจรปิดของฟิลาเมนต์ (Filament Continuity Check): ตั้งมัลติมิเตอร์ไปที่ โห้มวัดค่าความต้านทาน (Omega) นำโพรบวัดแต่ละที่ ขั้วสัมผัสไฟฟ้า (Contact) ของ Filament ทั้งสองข้าง เกณฑ์การตัดสิน: ค่าความต้านทานที่อ่านได้ต้องเป็นค่า ต่ำ (Low resistance) และ "ค่าความต้านทานประมาณ 1-5 โอห์ม" เพื่อยืนยันว่าลวดฟิลาเมนต์เชื่อมต่อถึงกัน อย่างสมบูรณ์ ไม่ขาด และกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่าน ได้สะดวก
4	 	การเช็กการลัดวงจรของฟิลาเมนต์กับโครงสร้าง (Filament Isolation/Short Circuit Check): ใช้โพรบ ตัวหนึ่งแตะที่ขั้วสัมผัสไฟฟ้าของ Filament และโพรบ อีกตัวหนึ่งแตะที่ตัวเรือนโลหะหลักของชุดยึดตัวอย่าง (Holder body / Basis plate) เกณฑ์การตัดสิน: หน้าจอของมัลติมิเตอร์ "ต้องแสดงค่า ความต้านทานสูงในระดับโอเวอร์โหลตเป็นอนันต์ (เช่น ขึ้น OVL.D MOHM)" เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งนี้ต้องถูก กันแยกด้วยฉนวนเซรามิกและต้องไม่แตะสัมผัส (Contact) กันเด็ดขาด หากมีค่าความต้านทานต่ำแสดง ว่ามีจุดไฟฟ้าลัดวงจร ต้องทำการรื้อและตรวจสอบฉนวน เซรามิกใหม่
5	 	การวัดค่าความต้านทานของวงจรเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Continuity Check): แตะโพรบของ มิเตอร์เข้ากับขั้วสัมผัสสปริง (Contact spring) ของลวด ผึง W5%Re และผึง W26%Re เกณฑ์การตัดสิน: "ค่าความต้านทานค่าความต้านทาน ประมาณ 1-5 โอห์ม" และต้องแสดงความต่อเนื่องทาง ไฟฟ้าเพื่อยืนยันว่าจุดเชื่อมต่อ (Junction) บน Moly ring มีการเชื่อมต่อแบบวงจรปิดที่สมบูรณ์ สามารถส่ง สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (EMF) แปรผันตามอุณหภูมิ กลับมาได้ อย่างแม่นยำ

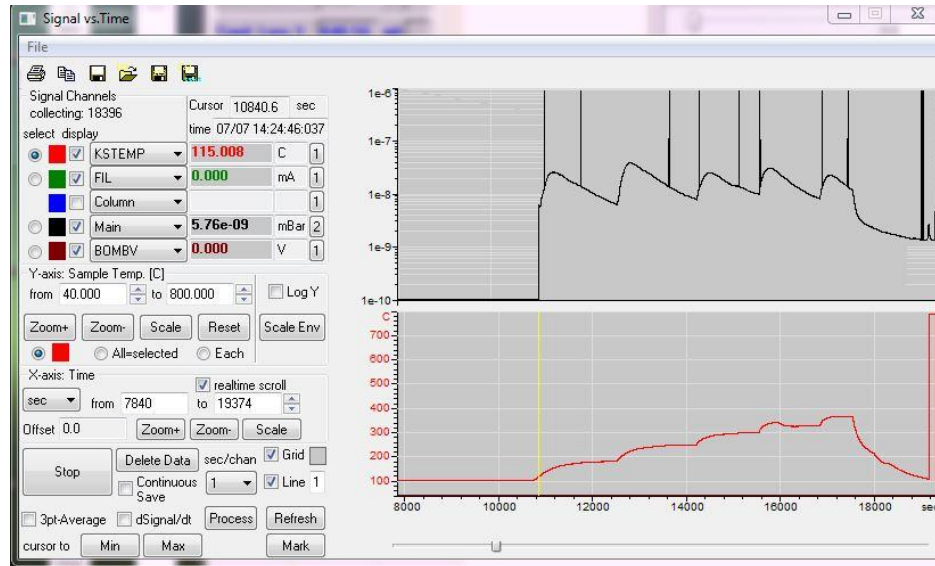
6		การเช็คการลงกราวด์ของระบบวัดอุณหภูมิ (TC Grounding Check): วัดค่าความต้านทานระหว่างขั้วสัมผัสของเทอร์โมคัปเปิลเทียบกับตัวเรือนโลหะหลัก เกณฑ์การตัดสิน: สาย "เทอร์โมคัปเปิล (TC) ต้องสัมผัสถึงกัน (Contact) กับตัว holder" เพื่อให้ระบบสามารถอ้างอิงแรงดันและอ่านค่าอุณหภูมิสะสมที่บริเวณได้ตัวอย่างทดลองได้อย่างถูกต้อง
---	---	---

4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพและการอบไล่ก๊าซหลังการซ่อมบำรุง (Performance Testing & Degassing Results)

ภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการซ่อมบำรุงเชิงกลและการประกอบชิ้นส่วนภายใน ชุดยึดตัวอย่าง (Sample Holder) ทั้งหมดจะถูกนำมาเข้าสู่กระบวนการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานร่วมกับเครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ (PEEM) ณ ระบบลำเลียงแสงที่ 3.2 Uab ดังแสดงในรูปที่ 4 การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ (1) เพื่อสอบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ฟิลาเมนต์ (Filament Current) กับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง และ (2) เพื่อทำกระบวนการอบไล่ก๊าซหลงเหลือ (Degassing) ของชิ้นส่วนโครงสร้างอุปกรณ์ภายใต้สภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 4 นำ sample holder มาทำการทดสอบกับเครื่อง PEEM



รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิและความดันระหว่างการทดสอบหลังการซ่อมบำรุง sample holder

การดำเนินการ Degassing ล่วงหน้าในขั้นตอนนี้ มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการลดการเกิดปรากฏการณ์คายก๊าซ (Outgassing) ในระหว่างการทดลองจริง ซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถทำอุณหภูมิสูงได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพมากขึ้น เนื่องจากภาระการคายก๊าซในระบบสุญญากาศจะเหลือเพียงแค่ส่วนที่มาจากตัวอย่างทดลอง (Sample) เท่านั้น ส่งผลให้ลดความเสี่ยงต่อการปนเปื้อนและรักษาความบริสุทธิ์ของผิวหน้าตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแปรผันตามกระแสไฟฟ้าของฟิลาเมนต์ในแต่ละ Sample Holder (ดังแสดงในรูปที่ 5) ได้ถูกบันทึกและแสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการสอบเทียบอุณหภูมิเทียบกับกระแสไฟฟ้าฟิลาเมนต์ของ Sample Holder แต่ละชุด
(หมายเหตุ: ข้อมูลอุณหภูมิบันทึกจาก Thermocouple)

กระแสไฟฟิลาเมนต์Filament (A)	ชื่อของ Sample Holder			
	36	10	44	New
1.00	84.2	88.0	103.0	96.8
1.20	131.0	126.7	117.0	135.9
1.50	175.5	179.8	145.0	190.4
1.70	217.0	240.0	169.0	228.9
1.90	248.4	276.6	199.0	270.7
2.10	282.9	309.0	234.0	328.2
2.30	319.2	338.0	269.0	373.0
2.50	354.0	402.0	312.0	416.2

5. สรุปผลการซ่อมบำรุง (Conclusion)

การปฏิบัติตามกระบวนการซ่อมบำรุงเชิงเทคนิคที่ระบุในคู่มือฉบับนี้ มีเป้าหมายสำคัญเพื่อถ่วงดุลและรักษาประสิทธิภาพการทำงานของชุดยึดตัวอย่าง (Sample Cartridge) ให้กลับมาอยู่ในสภาพสมบูรณ์ตามมาตรฐานทางเทคนิค โดยสรุปสาระสำคัญของผลสำเร็จในการดำเนินงานได้ดังนี้

ความสมบูรณ์ของระบบฉนวนไฟฟ้า: ผ่านกระบวนการล้างทางเคมีและเชิงกลที่ถูกต้อง ทำให้ชิ้นส่วนเซรามิกฉนวนกลับมาเป็นค่าความต้านทานเป็นอนันต์ (O.L.) ป้องกันการลัดวงจรในระบบสุญญากาศได้อย่างเด็ดขาด

ความเสถียรของระบบให้ความร้อน: การผลิตและเชื่อมต่อฟิลาเมนต์ทั้งสแตนด้วยเทคนิค Spot Welding บนแผ่นแทนทาลัม ช่วยให้ระบบทำความร้อนทั้งแบบ Radiative และ E-beam มีความแข็งแรงเชิงกลสูง นำไฟฟ้าได้ดี และรองรับการทำอุณหภูมิสูงถึง 1,000–1,200 องศาเซลเซียส ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความแม่นยำของระบบติดตามผลอุณหภูมิ: การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type-C และสปริงสัมผัสสปริง (Contact Spring) ที่ถูกต้องตามข้อบัญญัติ ช่วยให้ระบบควบคุมสามารถอ่านค่าอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำและมีเสถียรภาพตลอดช่วงการทดลอง

ความพร้อมใช้งานในสภาวะสุญญากาศระดับสูงมาก (UHV): การทำความสะอาดและการอบไล่ก๊าซ (Degassing) ตามขั้นตอน ช่วยลดปัญหา Outgassing ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะพร้อมใช้งานได้รวดเร็วและรักษาความสะอาดของพื้นผิวตัวอย่างทดลองได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของสถานทดลอง

ข้อเสนอแนะ/ ปัญหาอุปสรรค	แนวทางการดำเนินการ
การปนเปื้อนบนเซรามิกฉนวน: สารปนเปื้อนจากตัวอย่างทดลองระเหยมาเคลือบผิวเซรามิกฉนวน ทำให้สูญเสียสมบัติความเป็นฉนวน และกลายเป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้ระบบไฟฟ้าลัดวงจร	กระบวนการล้างทางเคมีและเชิงกล: สำหรับเซรามิกที่ปนเปื้อน ให้ใช้การแช่ กรด HCl 5-10% ร่วมกับเครื่อง Ultrasonic Cleaner และหากยังมีคราบฝังลึกให้นำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800
ความเปราะบางของระบบวัดอุณหภูมิ: สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) มักหลุดออกจากจุดเชื่อมบนวงแหวนโมลิบดีนัม หรือน้ำสัมผัสหลวมเนื่องจากการขยายตัวและหดตัวทางความร้อน	เทคนิคการเชื่อมประสานที่มั่นคง: ใช้การเชื่อมจุด (Spot Welding) บนแผ่น Tantalum Foil เพื่อยึดต่อขาฟิลาเมนต์และปลายสายเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับโครงสร้างโลหะ ช่วยให้การนำไฟฟ้าดีขึ้นและความแข็งแรงเชิงกลสูง

ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนางาน (Suggestions & Future Improvement)

การทำ Degassing ก่อนใช้งานจริง: ควรบรรจุขั้นตอนการทำ Degas อุปกรณ์ในสภาวะสุญญากาศก่อนนำไปใช้วิเคราะห์งานวิจัย เพื่อลดการปล่อยก๊าซจากตัวอุปกรณ์และช่วยให้เพิ่มอุณหภูมิได้รวดเร็วขึ้น

การจัดทำคลังสำรองอะไหล่สำคัญ: เนื่องจากชิ้นส่วนเฉพาะทางมีราคาสูง (เช่น ชุด Cartridge หรือชิ้นส่วนเซรามิก) ควรมีการบันทึกอายุการใช้งานและวางแผนสำรองอะไหล่เพื่อไม่ให้กระทบต่อการให้บริการแสงซินโครตรอน

การพัฒนาฐานข้อมูลผลการทดสอบ (Performance Data Logging): ควรมีการบันทึกค่าความต้านทานและประสิทธิภาพการทำอุณหภูมิหลังการซ่อมบำรุงในทุกครั้ง เพื่อเปรียบเทียบเสื่อมสภาพและประเมินรอบการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance)

เอกสารอ้างอิง

- [1] <https://elmitec.de/Components.php?Bereich=Cartridges>
- [2] <https://www.maxiv.lu.se/beamlines-accelerators/beamlines/maxpeem/user-information/>
- [3] <https://www.diamond.ac.uk/Instruments/Magnetic-Materials/I06/laserPEEM/sample-specs.html>