



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-TR-2026-097
ชื่อเรื่อง Title	Heat load Management and LN2 Consumption Double Crystal Monochromator (DCM) for SPS-II Beamline
ชื่อฝ่าย Department	ฝ่ายพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องกำเนิดแสงสยาม 2
วันที่เผยแพร่ Release date	22 เมษายน 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 เช่นเว็บไซต์ของสถาบันฯ (Information is available for public)
คำสำคัญ Keyword	Heat loaded management, Liquid nitrogen consumption, Double crystal monochromator

รายชื่อผู้จัดทำรายงานหรือผู้ดำเนินโครงการ (Name)	ส่วนร่วมในการปฏิบัติงานในโครงการ Responsible tasks in the project
นายเดชมงคล แก้วสุวรรณ	หาข้อมูลและวิธีการคำนวณ คำนวณภาระความร้อน คำนวณปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลว และเขียนรายงาน
ดร.รัชฎาภรณ์ ททรัพย์เรืองเนตร	ที่ปรึกษา และตรวจสอบความถูกต้อง
ดร.ชนรรค์ เอื้อรักสกุล	ที่ปรึกษา และตรวจสอบความถูกต้อง

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ศึกษาการจัดการภาระความร้อนและประเมินปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลว (LN2) สำหรับระบบคัดเลือกพลังงานแบบผลึกคู่ (Double Crystal Monochromator: DCM) ของระบบลำเลียงแสงในโครงการเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV (SPS-II) จำนวน 5 ระบบลำเลียงแสง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อรักษาเสถียรภาพทางโครงสร้างของผลึกซิลิกอน ซึ่งต้องทำงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic) เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเข้าใกล้ศูนย์ ป้องกันการโป่งพองหรือการเสียรูปทรงทางกายภาพเฉพาะจุดของอุปกรณ์ทางแสง (Thermal bump) ที่ส่งผลต่อความแม่นยำของพลังงานแสงซินโครตรอน

กระบวนการจัดการภาระความร้อนดำเนินการผ่าน 3 แนวทางหลัก ได้แก่ การใช้ระบบกระจก (Mirror) เพื่อตัดพลังงานส่วนเกินผ่านมุมวิกฤต การใช้ตัวกรอง (Filter) เพื่อดูดกลืนรังสีในช่วงพลังงานต่ำ และการปรับขนาดช่องเปิด (Slit) ตามค่าการเบี่ยงเบนของลำแสง (Divergence) เพื่อลดกำลังของแสงก่อนตกกระทบบนผลึกตัวแรก จากการจำลองด้วยโปรแกรม XOPPY พบว่าภาระความร้อนสูงสุดที่ตกบนผลึกของแต่ละระบบลำเลียงแสง (ที่กระแสอิเล็กตรอน 400 mA) มีค่าอยู่ระหว่าง 121.29 ถึง 163.54 วัตต์

สำหรับการประเมินปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลว ได้พิจารณาจากภาระความร้อนรวม (Total Heat Load) ซึ่งประกอบด้วยความร้อนจากลำแสงซินโครตรอนและความร้อนที่รั่วไหลเข้าระบบท่อลำเลียง (Static Heat Leak) โดยผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลมาตรฐาน FMB และสมการการสูญเสียทางอุณหพลศาสตร์ พบว่าปริมาณการใช้ LN2 ทั้งหมดต่อปี ในเฟสแรกของการใช้งานระบบลำเลียงแสงที่ใช้ไนโตรเจนเหลวในการหล่อเย็นจำนวน 5 ระบบลำเลียงแสง ที่ระดับกระแสอิเล็กตรอน 400 mA สำหรับการให้บริการแสง 8 เดือน หรือ 5,760 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 242,128 ลิตร เมื่อพิจารณาราคากลางของ LN2 ที่ 8.3 บาทต่อลิตร จะต้องจัดสรรงบประมาณสำหรับการจัดซื้อไนโตรเจนเหลวอยู่ที่ประมาณ 2,009,660 บาทต่อปี

คำสำคัญ Keyword: Heat loaded management, Liquid nitrogen consumption, Double crystal monochromator

บทที่ 1 บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

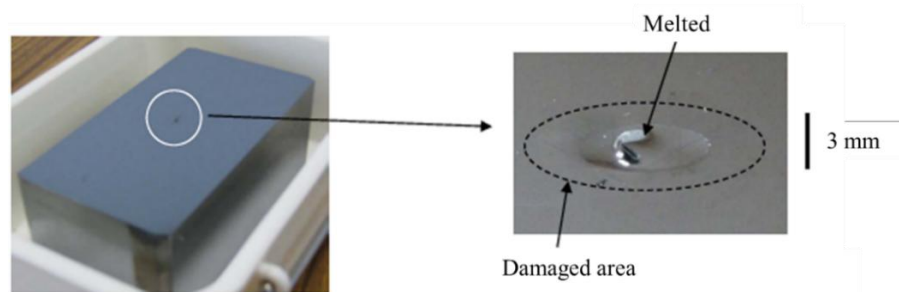
ระบบลำเลียงแสง หรือ สถานีทดลอง ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light Source) จะมีอุปกรณ์ทางด้านทัศนศาสตร์หลายชนิด ซึ่งหนึ่งในอุปกรณ์ที่สำคัญก็คือระบบผลึกคู่สำหรับคัดเลือกพลังงานเดี่ยว (Double Crystal Monochromator, DCM) ทำหน้าที่สำคัญในการคัดเลือกแสงที่มีพลังงานเฉพาะเจาะจง (Monochromatic X-ray beam) โดยใช้ผลึก เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่างๆ

ผลึกที่นิยมใช้งานสำหรับ DCM ได้แก่ ซิลิคอน (Silicon crystal) โดย Si จะต้องทำงานภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิคงที่และมีความเสถียรสูง เพื่อรักษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของผลึกและประสิทธิภาพในการเลี้ยวเบนแสงเอ็กซ์เรย์ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของผลึกแม้เพียงเล็กน้อย สามารถส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของพลังงานแสง เช่น

1. เมื่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการขยายตัวหรือหดตัวของผลึก ซึ่งส่งผลกระทบต่อระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d-spacing) เป็นผลให้พลังงานของแสงที่ถูกคัดเลือกเปลี่ยนแปลงไปตามสมการ Bragg และเกิดการ Mismatch ระหว่างระนาบผลึกของผลึกตัวที่ 1 และ 2 ซึ่งได้รับความร้อนไม่เท่ากัน นอกจากนี้ความร้อนจากแสงซินโครตรอนยังส่งผลกระทบต่อความละเอียดและความแม่นยำของความราบของระนาบผลึกซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อผิดพลาดของความชัน (Slope error) ทำให้ส่งผลกระทบต่อขนาดของลำแสงซินโครตรอนหลังผ่านผลึกอีกด้วย ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้คงที่จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้แสงที่มีพลังงานแม่นยำสำหรับการทดลอง^[1]

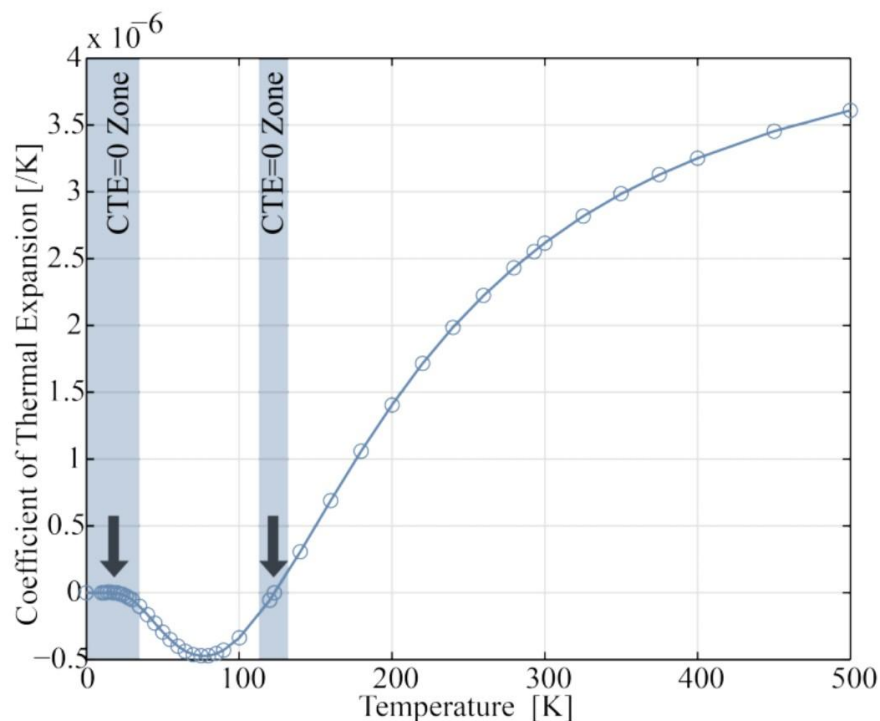
2. ความเสถียรเชิงกล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในผลึกอาจก่อให้เกิดความเค้นภายในผลึก (Thermal stress) ซึ่งนำไปสู่การบิดเบี้ยวหรือความเสียหายของผลึก ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของลำแสงและความน่าเชื่อถือของระบบ

3. ประสิทธิภาพการระบายความร้อน แหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอนผลิตความร้อนจำนวนมาก ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกดูดซับโดยผลึกของ DCM หากไม่มีระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ อุณหภูมิของผลึกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเกินกว่าที่จะควบคุมได้ หากเราไม่สามารถจัดการกับความร้อนดังกล่าวได้อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่ผลึกหรือระบบทัศนศาสตร์อื่นๆได้ ดังแสดงรูปที่ 1 โดยแสดงภาพความเสียหายของกระจกเมื่อได้รับกำลังที่สูงมากเกินไปโดยประมาณ 12 kW^[2] ด้วยเหตุผลดังกล่าว ระบบหล่อเย็นผลึกของ DCM จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง จึงต้องมีความรู้ความเข้าใจในการจัดการความร้อนของแสงที่เกิดขึ้นบนผลึก



รูปที่ 1 แสดงภาพความเสียหายของกระจกเนื่องจากรับกำลังที่สูงเกินไป^[2]

จากการศึกษาค่า Coefficient of Thermal Expansion (CTE) ของ Si พบว่า มีจุดที่ CTE เป็นศูนย์ (zero-crossing) ครั้งแรกที่ประมาณ 20 K (-253.15°C) หมายความว่าที่อุณหภูมินี้ ซิลิคอนไม่ขยายตัวหรือหดตัว หลังจากนั้น CTE จะติดลบต่อเนื่องจนถึงจุดต่ำสุด จากนั้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นมีจุดที่ CTE เป็นศูนย์ครั้งที่สองที่ประมาณ 120 K (153.15°C) นอกจากนี้ที่อุณหภูมิสูงนั้นจะมีค่าการขยายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น^[3] ดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนั้นในการหล่อเย็นผลึก Si ในระบบผลึกคู่สำหรับคัดเลือกพลังงาน จึงนิยมใช้ Liquid Nitrogen (LN2) เนื่องจากมีจุดเดือดอยู่ที่ประมาณ 77 K (-196°C) ดังนั้นการใช้ LN2 ในการหล่อเย็นจะช่วยในการลดการขยายตัวจากความร้อนของผลึกซิลิคอนได้มากเมื่อเทียบกับการใช้งานที่อุณหภูมิห้อง



Coefficient of thermal expansion of undoped silicon, showing zerocrossing near 120 K [36].

รูปที่ 2 ค่า Coefficient of Thermal Expansion ของ Si^[3]

ดังนั้น รายงานนี้ จึงมุ่งเน้นการจัดการความร้อนของแสงซินโครตรอนก่อนตกลงบนระบบทัศนศาสตร์ของระบบลำเลียงแสง รวมไปถึงปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลว (LN2) ที่จำเป็นสำหรับการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการออกแบบระบบลำเลียงแสงและประเมินสมรรถนะของระบบหล่อเย็นสำหรับ DCM นอกจากนี้ ยังสามารถทราบปริมาณการใช้ LN2 รวมถึงงบประมาณในการจัดซื้อ ซึ่งมีความสำคัญต่อการวางแผนการจัดหาและบริหารจัดการทรัพยากรในระบบลำเลียงแสงอีกด้วย

1.2. วัตถุประสงค์

- 1.2.1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่ช่วยลดทอนความร้อนของแสงซินโครตรอนต่อระบบทัศนศาสตร์
- 1.2.2. เพื่อคำนวณปริมาณความร้อนที่ตกลงบนระบบทัศนศาสตร์ของระบบลำเลียงแสง
- 1.2.3. เพื่อประเมินปริมาณการใช้ของไนโตรเจนเหลวในการหล่อเย็นระบบทัศนศาสตร์
- 1.2.4. เพื่อประเมินงบประมาณสำหรับไนโตรเจนเหลวของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน SPS-II

1.3. ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1. การลดทอนความร้อนของระบบทัศนศาสตร์ ของระบบลำเลียงแสงภายใต้เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ระดับพลังงาน 3 GeV จำนวน 5 ระบบลำเลียงแสง ได้แก่
Tender x-ray absorption spectroscopy (TXAS) beamline
Hard x-ray absorption spectroscopy (HXAS) beamline
Small and wide angle x-ray scattering (SWAXS) beamline
Grazing-incident x-ray scattering and Total reflection x-ray fluorescence (GIXRD/TRXRF)
High-resolution x-ray diffraction and Molecular cytography (HRXRD/MX)
- 1.3.2. การศึกษาการลดความร้อนของระบบทัศนศาสตร์ ได้แก่ Aperture Filter Plane mirror
- 1.3.3. การคำนวณปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวของระบบลำเลียงแสงจำนวน 5 ระบบลำเลียงแสง
- 1.3.4. การคำนวณปริมาณการใช้งบประมาณสำหรับค่าใช้จ่ายไนโตรเจนเหลวของระบบลำเลียงแสงภายใต้เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ระดับพลังงาน 3 GeV

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาระความร้อนของระบบลำเลียงแสง

โดยภาระความร้อนที่เกิดขึ้นของแต่ละระบบลำเลียงแสงจะถูกกำหนดโดย

1.ค่ากระแสของอิเล็กตรอน (I_{ring}) เป็นค่าที่กำหนดโดยเครื่องเร่งอิเล็กตรอน ซึ่งสำหรับเครื่อง SPS-II นั้น กำหนดค่า I_{ring} อยู่ที่ 300 mA เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์และมั่นใจในความปลอดภัยของระบบทัศนศาสตร์และผลึก ดังนั้นในการคำนวณโหลดภาระความร้อน จะใช้ค่า I_{ring} ที่มากขึ้น โดยกำหนดที่ $300+30\%I_{ring}$ mA ดังนั้นในการคำนวณกำลัง และโหลดภาระความร้อนของระบบลำเลียงแสงจะกำหนดค่ากระแสอิเล็กตรอนอยู่ที่ 400 mA ซึ่งเป็นค่ากระแสที่สูงที่สุดที่ Storage ring นั้นสามารถจะทำได้

2.ชนิดของแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน หรือ ชนิดของอุปกรณ์แทรก (Insertion devices) ซึ่งจะขึ้นกับความยาวคาบ (Period Length) ซึ่งจะส่งต่อความเข้มหรือ Flux ของแสงซินโครตรอน โดยในส่วนนี้จะขึ้นกับช่วงพลังงานที่ต้องการของแต่ละระบบลำเลียงแสง

โดยในการคำนวณค่ากำลังที่ตก ณ ตำแหน่งผลึกตัวแรกของ DCM ของแต่ละระบบลำเลียงแสง จะดำเนินการคำนวณเฉพาะระบบลำเลียงแสงที่มีการใช้ระบบคัดเลือกพลังงานเดี่ยว (Monochromators) ที่ใช้หลักในการคัดเลือกพลังงานเท่านั้น ซึ่งประกอบด้วย

ระบบลำเลียงแสงเทคนิค Tender X-ray Absorption Spectroscopy (TXAS)

ระบบลำเลียงแสงเทคนิค Hard X-ray Absorption Spectroscopy (HXAS)

ระบบลำเลียงแสงเทคนิค Small and Wide Angle A-ray Scattering (SWAXS)

ระบบลำเลียงแสงเทคนิค Grazing-incident X-ray Diffraction/ Total Reflection X-ray Fluorescence (GIXRD/TRXRF)

ระบบลำเลียงแสงเทคนิค High-resolution X-ray Diffraction/ Macromolecule Crystallography (HRXRD/MX)

ซึ่งมีรายละเอียด Insertion devices และชนิดของ Monochromators ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลอุปกรณ์แทรกสำหรับแหล่งกำเนิดแสงซินโครตรอน และ ระบบคัดเลือกพลังงานเดี่ยวของระบบลำเลียงแสง

Beamline	Insertion Device	Monochromators
TXAS	In-vacuum Undulator Period length: 23 mm (IVU23)	Double Crystal Monochromator (DCM) Crystals: InSb(111), Si(111)
HXAS	In-vacuum Undulator Period length: 18 mm (IVU18)	Chanel-cut Crystal Monochromator (CCM) Crystals: Si(111), Si(311)
SWAXS	In-vacuum Undulator Period length: 20 mm (IVU20)	Double Crystal Monochromator (DCM) Crystals: Si(111)
GIXRD/TRXRF	In-vacuum Undulator Period length: 18 mm (IVU18)	Double Crystal Monochromator (DCM) Crystals: Si(111)
HRXRD/MX	In-vacuum Undulator Period length: 18 mm (IVU18)	Double Crystal Monochromator (DCM) Crystals: Si(111)

ผลการคำนวณภาระโหลดความร้อนและกำลังเมื่อผ่านระบบทัศนศาสตร์ต่างๆ ของแต่ละระบบลำเลียงแสงแสดงในตาราง 4, 5, 6 และ 7 สำหรับระบบลำเลียงแสงเทคนิค TXAS, HXAS, GIXRD/TRXRF, SWAX และ HRXRS/MX ตามลำดับ

2.2 แนวคิดและหลักการ

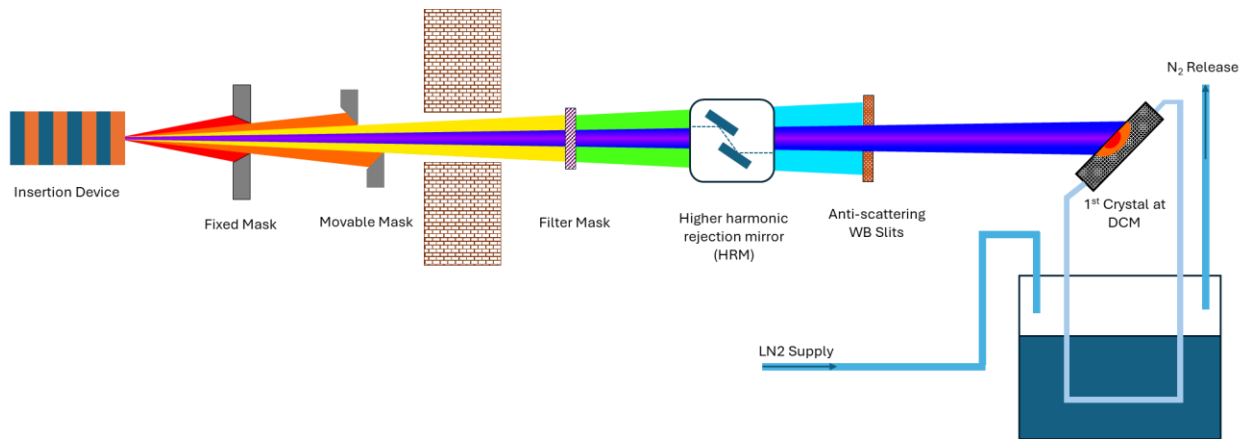
สำหรับการลดความร้อน หรือ กำลังของแสงที่ตกลงอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ของระบบลำเลียงแสง นั้นทำได้โดยการคัดกรองหรือ ตัด ช่วงพลังงานที่ไม่จำเป็น หรือ ไม่ได้ใช้งานออกจากระบบ โดยให้แสงที่ผ่านระบบทัศนศาสตร์ก่อนถึง DCM นั้นมีแค่ช่วงพลังงานที่เราต้องการเท่านั้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ค่ากำลังของแสงที่ตก บนผลึกตัวแรกของ DCM จะอยู่ในช่วง 90 – 150 วัตต์ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่ากำลังของแสงซินโครตรอนที่ตกลงบนระบบคัดเลือกพลังงานแบบผลึกคู่

Affiliation	I ring (mA)	Insertion devices (IDs)	IDs Length (m)	Electron energy (GeV)	Beamline	Total power(W)	Peak Power density (W/mm ²)	Ref.
Brazilian Synchrotron Light Laboratory (LNLS)	350	Undulator	2.00	3.0	-	150	-	[4]
Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF)	300	Undulator	2.00	3.5	BL16U1	148	9.7	[5]
Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF)	250	Superconducting Wiggler	1.36	2.5	BL3W1	150	-	[6]
MAXIV	400	Undulator	2.00	3.0	BioMAX	41	80.0	[7]
Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF)	300	Undulator	-	3.5	-	90	22.5	[8]

ดังนั้น จากข้อมูลผู้คำนวณจึงได้กำหนดค่ากำลังของแสงที่ฟลักซ์ตัวที่ 1 ให้มีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 200 วัตต์ เพื่อเป็นป้องกันการเสียหายของผลึกรวมทั้งประหยัดการใช้ LN2 อีกด้วย

ในการจัดการภาระความร้อนของแสงซินโครตรอนก่อนตกลงบนระบบทัศนศาสตร์หรือระบบคัดเลือกพลังงาน นั้น มีหลากหลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับการออกแบบและปริมาณของภาระความร้อน โดยสามารถสรุปภาพรวมการจัดการภาระความร้อน ได้ดัง**Error! Reference source not found.** ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วย 3 แนวทาง ได้แก่ การใช้ระบบกระจก (Mirror) เพื่อลดทอนฮาร์โมนิกระดับสูง การใช้ตัวกรอง (Filter) เพื่อกรองพลังงาน และการใช้ Slit เพื่อตัดแสง โดยแต่ละแนวทางมีรายละเอียดและหลักการดังต่อไปนี้^[11]



รูปที่ 3 ภาพรวมการจัดการภาระความร้อนของระบบลำเลียงแสง

2.3 การใส่ระบบ Mirror

การใส่ระบบกระจกไว้ส่วนหน้าก่อนเข้า DCM จะช่วยลดทอนความร้อน (Heat load) หรือ กำลังของแสง (Power) ก่อนตกลงบนผลึก เช่น ระบบกระจกทำแสงขนาน (Collimating mirror) ระบบกระจกลดทอนฮาร์โมนิก โดยอาศัยหลักการสะท้อน (Reflectivity) และ ดูดกลืน (Absorption) ดังสมการ Eq.2 โดยอาศัยมุมวิกฤตเพื่อตัดพลังงานในส่วนที่ไม่ต้องการออก (Cut-off energy) และให้เฉพาะพลังงานที่เราต้องการนั้นสามารถสะท้อนผ่านไป ได้^{[12][13][14]} ดังสมการ Eq.2 ดังรูปที่ 4

$$n = 1 - \delta - i\beta \quad (\text{Eq.1})$$

n = Reflection index

δ = Reflection term

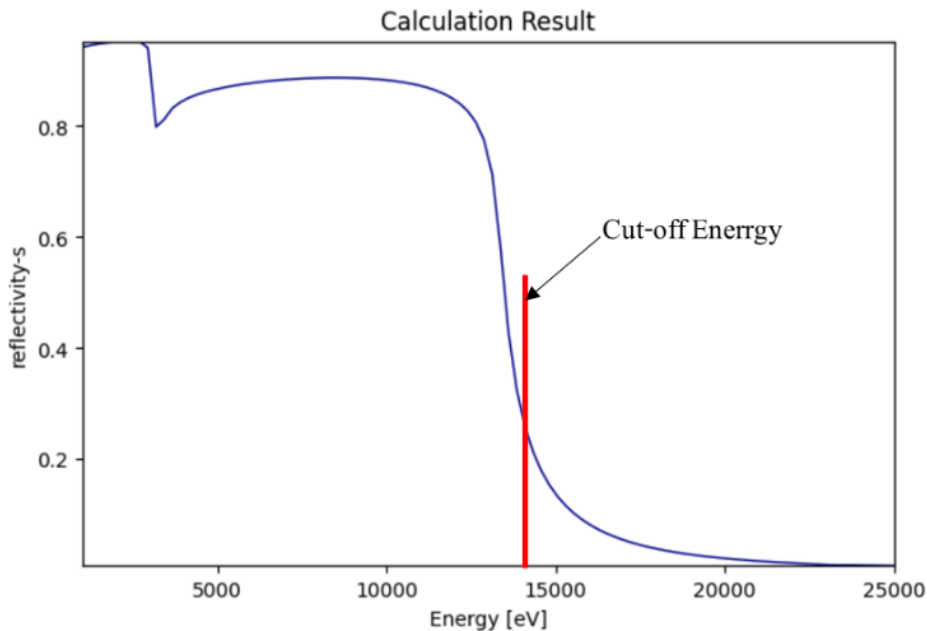
β = Absorption term

$$\theta_i = 20 \frac{\sqrt{\rho}}{E} \rightarrow E \approx 20 \frac{\sqrt{\rho}}{\theta_i} \quad (\text{Eq.2})$$

E = Cut-off energy (eV)

ρ = density of materials (g/cm^2)

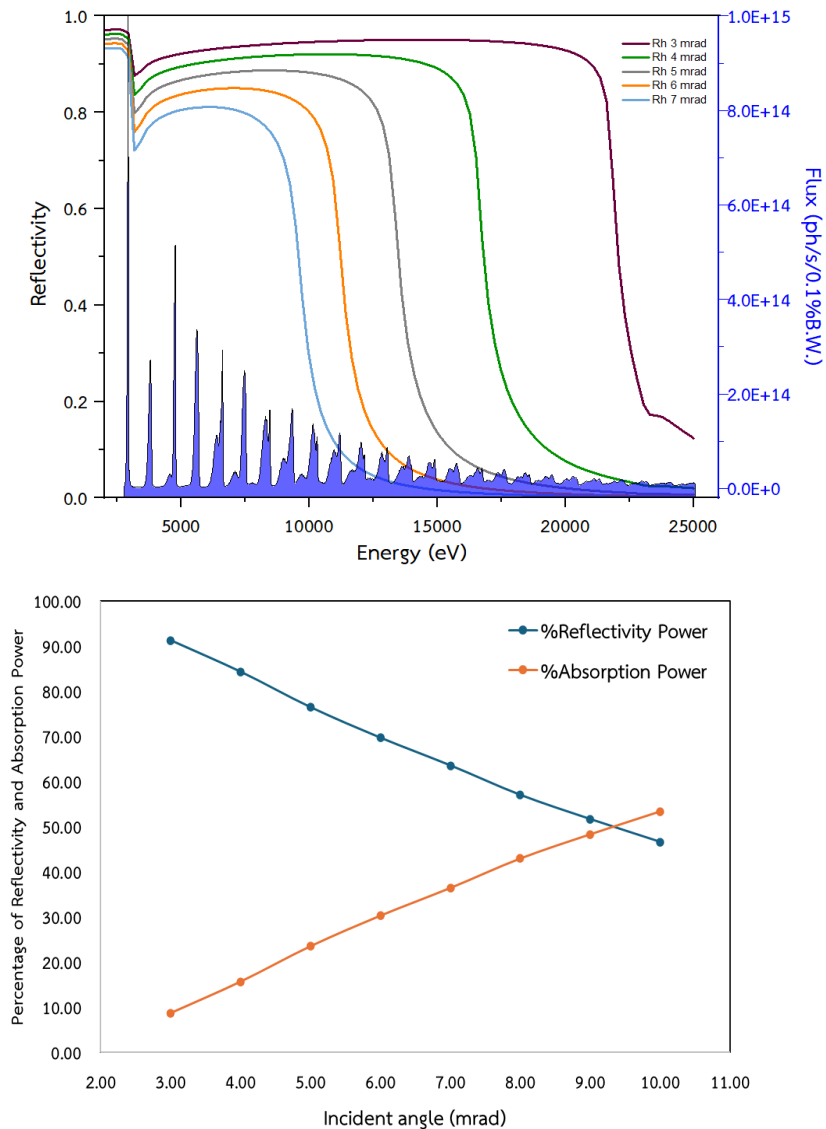
θ = Incident angle (rad)



รูปที่ 4 ผลการคำนวณค่า Reflectivity ของกระจกเคลือบด้วยโรเดียม (Rh) และแสงทำมุมตกกระทบบกับกระจก 5 มิลลิเรเดียน

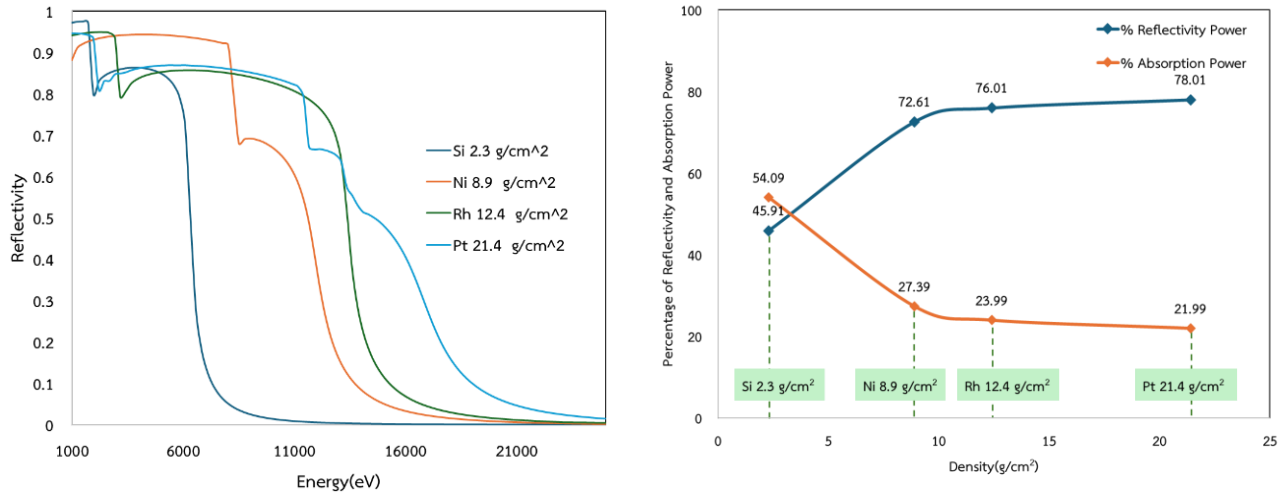
จากรูปที่ 4 เราจะเห็นว่าช่วงพลังงานหลังจากค่า Cut-off energy ของกระจกโรเดียมที่ทำมุมตกกระทบบกับพื้นผิว 5 มิลลิเรเดียนนั้น เมื่อคำนวณจากสมการ Eq.2 จะได้ค่า Cut-off energy อยู่ที่ประมาณ 14,085 eV ซึ่งเราสามารถสังเกตได้ว่าหลังจากพลังงาน 14,085 eV ค่าการสะท้อนของแสงค่อนข้างต่ำ หรือกล่าวได้ว่า ช่วงพลังงานหลังจาก 14,085 eV จะไม่ผ่านไปยัง DCM ทำให้สามารถลด Power หรือความร้อนของแสงก่อนตกลงบนผลึกได้ ซึ่งความร้อนในส่วนนี้จะถูกระบายด้วยน้ำหล่อเย็นของกระจก HRM ทำให้ไม่เป็นภาระโหลดของ LN2 ของ DCM

โดยการปรับค่า Cut-off energy นั้น สามารถทำได้หลายวิธี จากสมการ Eq.2 เราจะเห็นว่าค่าพลังงาน Cut-off energy นั้น แปรผกผันกับมุมตกกระทบบ และ แปรผันตรงกับความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาเคลือบ เช่น โรเดียม (Rh) นิกเกิล (Ni) ทอง (Au) ทองคำขาว (Pt) เป็นต้น รูปที่ 5 (Top) แสดงผลการคำนวณค่า Reflectivity ของกระจกโรเดียมเมื่อเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบบ โดยเมื่อมุมตกกระทบบมากจะทำให้ค่า Cut-off energy นั้นน้อยลง ซึ่งส่งผลต่อค่าพลังงาน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความเข้ม Flux ของแสงแต่ละช่วงพลังงาน ถ้าเลือกมุมของกระจก Rh ที่ 7 มิลลิเรเดียน ก็จะช่วยลดทอนพลังงานตั้งแต่ช่วงประมาณ 10,000 eV เป็นต้นไป รวมทั้งช่วยลดทอน Higher Harmonic ของพลังงานอีกด้วย โดยการลดทอนพลังงานจากกระจกก็จะส่งผลต่อกำลังที่ส่งต่อไปยัง DCM ด้วย ซึ่งผลการคำนวณร้อยละกำลังที่กระจกดูดกลืนและกำลังที่สะท้อนออกไปแสดงดัง รูปที่ 5 (Bottom)



รูปที่ 5 (Top) ผลของการเปลี่ยนแปลง Cut-off energy เมื่อเปลี่ยนมุมตกกระทบของกระจก Rh
(Bottom) ผลคำนวณร้อยละการดูดกลืนและสะท้อนของกำลังเมื่อเปลี่ยนมุมตกกระทบของกระจก Rh

รูปที่ 6 (Left) แสดงผลการคำนวณผลของการเปลี่ยนแปลง Cut-off energy เมื่อเปลี่ยนชนิดของผิวเคลือบที่มีค่าความหนาแน่น (Density) ที่แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบผิวเคลือบชนิด Si Ni Rh และ Pt โดยจะสังเกตเห็นว่าเมื่อค่าความหนาแน่นมากจะส่งผลให้ค่า Cut-off energy นั้นสูง ส่งผลให้ค่าพลังงานหรือกำลังที่สะท้อนไปยัง DCM นั้นสูงตามเช่นกัน ดังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและร้อยละการดูดกลืนและสะท้อนกำลัง ในรูปที่ 6 (Right)

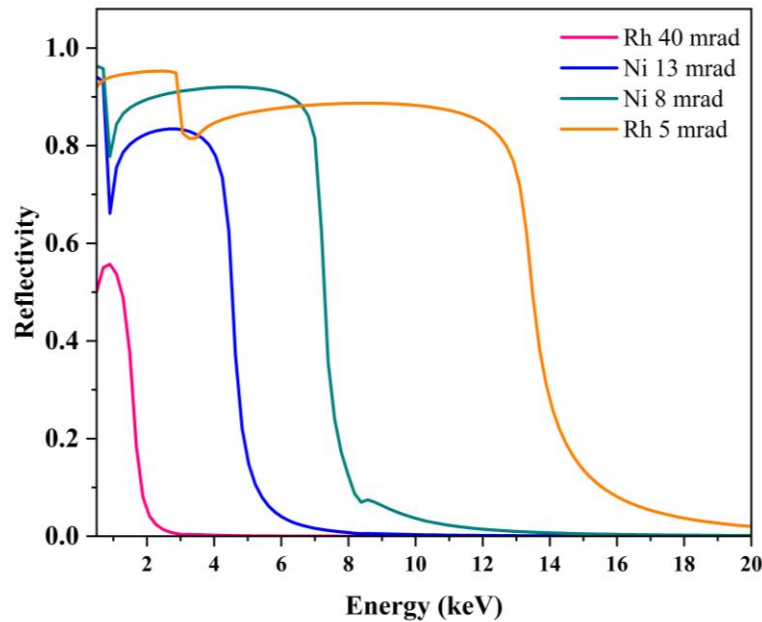


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ค่าการสะท้อนและดูดกลืนกำลัง เมื่อเปลี่ยนชนิดธาตุของผิวเคลือบกระจก

ตัวอย่างการจัดการความร้อน โดยการปรับมุมและชนิดของผิวเคลือบกระจกเพื่อตัดพลังงานในช่วงที่ไม่ต้องการและช่วยลดภาระความร้อนของกระจกของระบบลำเลียงแสงเทคนิค Tender X-ray Absorption Spectroscopy หรือ TXAS โดยระบบลำเลียงแสงนี้ออกแบบโดยการเลือกใช้กระจกลดทอนอาร์โมนิกะดับสูงแบบคู่ (Double Higher Harmonic Rejection Mirror, DHRM) เพื่อช่วยลดทอนพลังงานที่มาจากอาร์โมนิก ระดับสูงและพลังงานที่ไม่ต้องการ รวมถึงช่วยลดภาระความร้อนของแสงก่อนตกลงบน DCM กระจก DHRM ของ TXAS นั้นเป็นแบบ 2 ผิวเคลือบ หรือ 2 Strips โดยเลือกผิวเคลือบชนิด Rh และ Ni โดยมีการเลือกใช้มุมตกกระทบและชนิดผิวเคลือบที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงพลังงานรายละเอียดดังตารางที่ 3 โดยผลการคำนวณกราฟค่าการสะท้อนของกระจกในแต่ละมุมและผิวเคลือบต่างชนิด แสดงดังError! Reference source not found.

ตารางที่ 3 ข้อมูลการใช้มุมตกกระทบและชนิดของผิวเคลือบของกระจก DHRM สำหรับระบบลำเลียงแสง TXAS

ผิวเคลือบ	มุมตกกระทบ (mrad)	พลังงาน (eV)
Rh	40	1,000
Ni	13	2,000-4,000
Ni	8	4,000-6,000
Rh	5	6,000-13,000



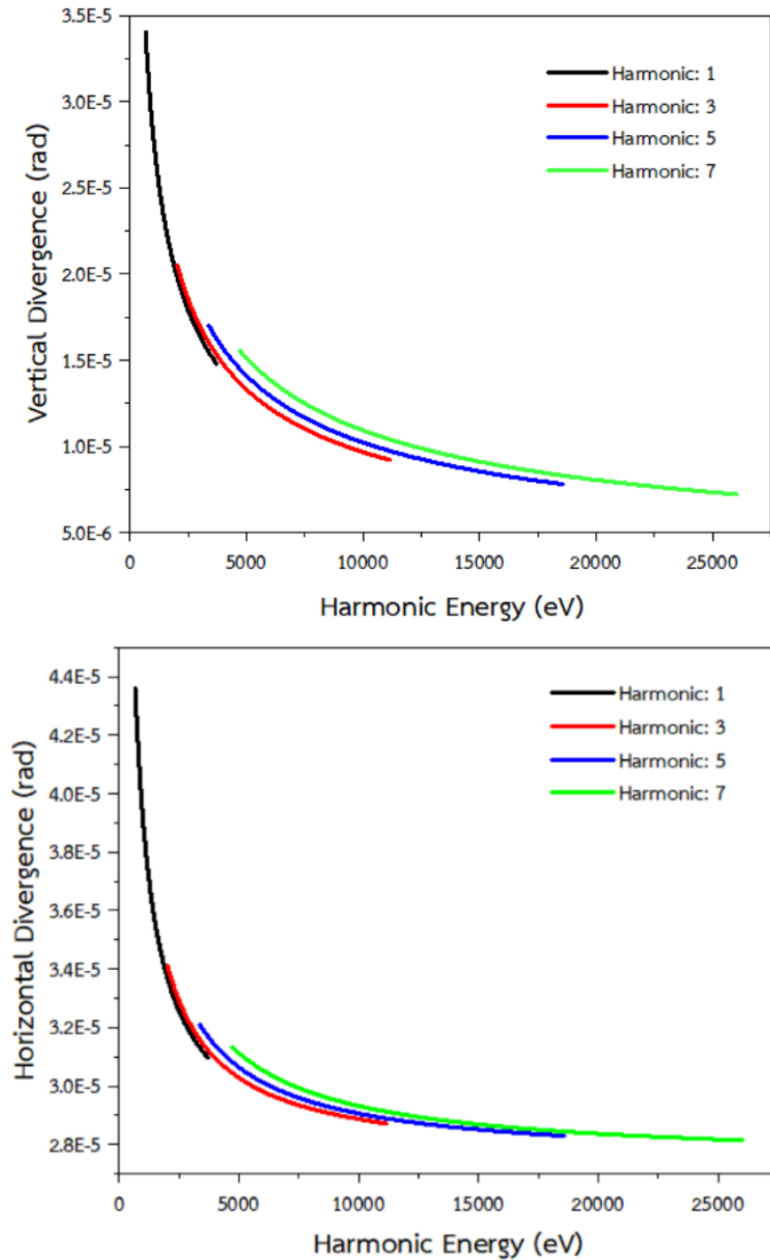
รูปที่ 7 ค่าการสะท้อนในแต่ละช่วงพลังงานของกระจก DHRM ของระบบลำเลียงแสง TXAS

2.4 การปรับขนาดช่องเปิด

การปรับขนาดของช่องเปิดนั้นจะส่งผลให้ขนาดของลำแสงให้มีขนาดเล็กลง โดยการตัดแสงช่วงขอบออก โดยตัวแปรที่จะเป็นตัวกำหนดขนาดของช่องเปิดคือ Divergence ของแสง ซึ่งจะเปลี่ยนตามค่าพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 8

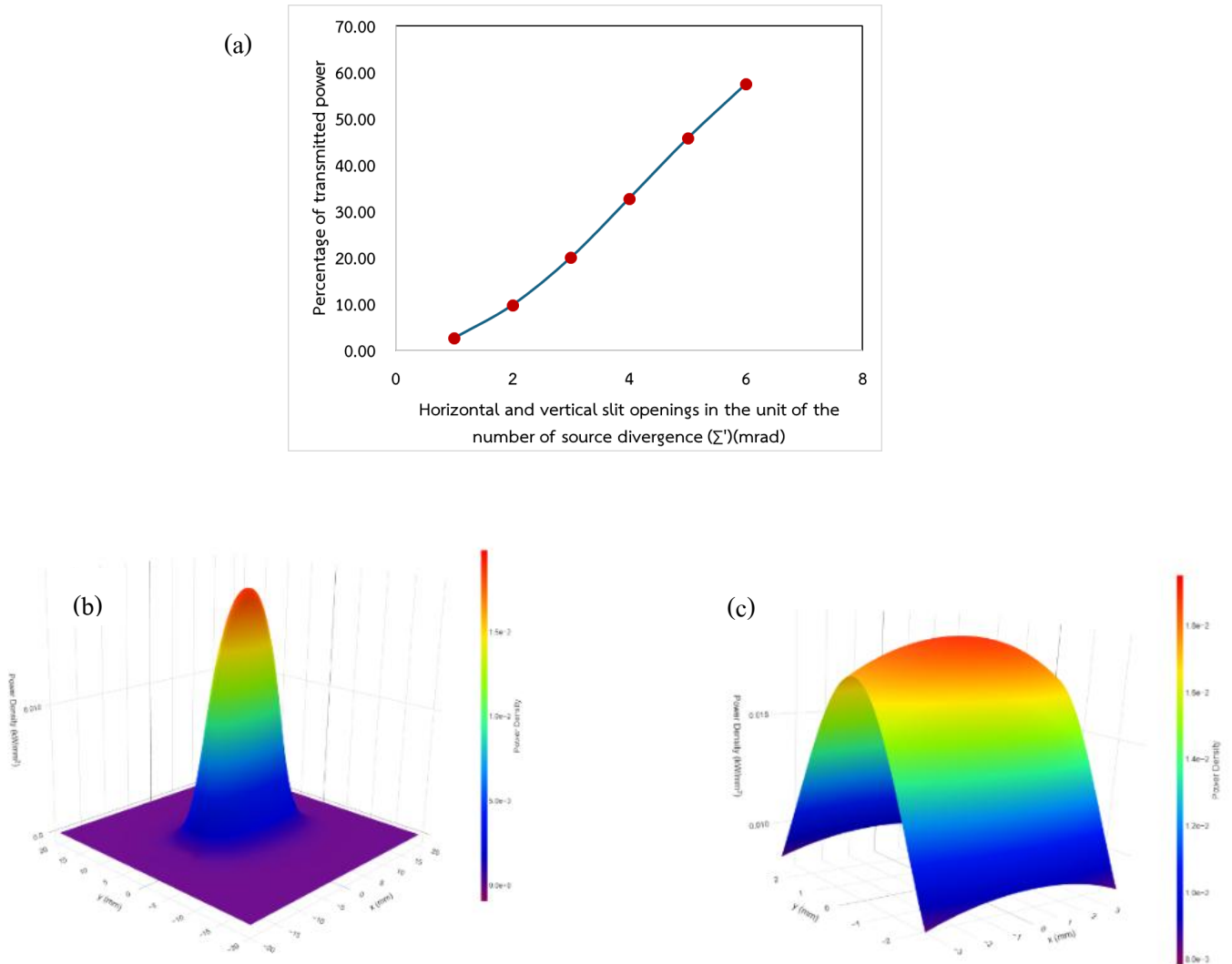
เมื่อแสงถูกตัดออกบางส่วนจึงส่งผลให้ค่าความร้อนหรือกำลังลดลง อย่างไรก็ตามก็จะส่งผลต่อค่า Flux ที่จะลดลงด้วยเช่นกัน

โดยปกติแล้วการกำหนดขนาดของช่องเปิดจะขึ้นอยู่กับกรอกแบบระบบลำเลียงแสงหรือสถานีทดลอง โดยส่วนมากจะใช้ค่า Divergence ของแสง (Σ') ทั้งแนว Horizontal ($\Sigma x'$) และ Vertical ($\Sigma y'$) ของแหล่งกำเนิดแสง (Source) เป็นตัวกำหนด ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้ค่าช่องเปิดประมาณ 4 เท่า ของ Divergence ($4\Sigma'$) ของพลังงานที่ต่ำที่สุดของระบบลำเลียงแสงนั้น เนื่องจากพลังงานที่ต่ำที่สุดจะมีค่า Divergence มากที่สุดสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 8 เมื่อค่าพลังงานสูงขึ้นจะมี Divergence ค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่เรากำลังใช้แสงในช่วงพลังงานสูงจะสามารถลดช่องเปิดให้เล็กลงอีกได้เพื่อตัดความร้อนจากแสงในช่วงของพลังงานต่ำซึ่งมี Divergence กว้างออกไปบางส่วน โดยไม่ถูกลดทอนความเข้มของแสง (Flux) ในช่วงพลังงานที่เราใช้งาน โดยกำลังความร้อนที่ถูกตัดโดยช่องเปิดจะถูกระบายออกด้วยน้ำที่หล่อเย็น ซึ่งโดยทั่วไปจะถูกออกแบบให้มีความสามารถในการรับความร้อนประมาณ 1,500 วัตต์ ต่อ 1 ใบ Blade^{[9][10]} อย่างไรก็ตามการกำหนดช่องเปิดจะขึ้นกับการออกแบบซึ่งในบางครั้งจะปรับช่องเปิดให้มีขนาดเล็กๆ เพื่อช่วยลดกำลังของแสงก่อนตกลงบนระบบทัศนศาสตร์



รูปที่ 8 (Left) ขนาดของ Vertical divergence และ (Right) Horizontal divergence ของ In-vacuum Undulator 23 (IVU23)

รูปที่ 9 แสดงผลการคำนวณปริมาณร้อยละการทะลุผ่านของกำลัง (Transmitted Power) ของ TXAS Beamline ของ SPS-II โดยมีค่า Total power ประมาณ 1,600 วัตต์ โดยปรับค่าช่องเปิด ตั้งแต่ 1 ถึง 6 เท่าของค่า Source divergence ของ White beam ด้วยโปรแกรม Spectra โดยจะเห็นว่ามีการลดลงของกำลังที่สอดคล้องตามความกว้างของขนาดของช่องเปิด



รูปที่ 9 (a) ปริมาณร้อยละการทะลุผ่านของกำลังเมื่อเปลี่ยนขนาดของช่องเปิดตามจำนวนเท่าของ Source Divergence (b) 3D ของ Power เมื่อ Fully opened slit (c) 3D power เมื่อเปิดช่อง Slit 4 เท่าของ Divergence

2.5 การใส่ Filter

Filter เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ ที่มีหน้าที่ในการจัดการความร้อนของแสงซินโครตรอนก่อนที่จะตกยังระบบกระจกอื่นๆ ที่ไม่สามารถทนความร้อนได้มาก เช่น ผลึก (Crystal) กระจก (Mirror) หรือหัวตรวจวัด (Detector) โดยส่วนมากวัสดุที่นำมาใช้งานในการทำเป็น Filter ได้แก่ กราไฟท์ (Graphite) เพชร (Diamond) อลูมิเนียม (Aluminum) และ เบริลเลียม (Beryllium) เป็นต้น ซึ่ง Filter จะทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานบางส่วน ซึ่งจะสัมพันธ์กับวัสดุที่ใช้ทำ Filter ตามกฎของ Beer lambert ดัง สมการที่ Eq.3 โดยค่าความเข้มของแสงก่อนผ่าน Filter จะเท่ากับผล

ของ ความเข้มหลังผ่านคูณกับเทอมเอกโพเนนเชียลของผลของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นและความหนาของ Filter^{[12][13][14]}

$$I_0 = I_1 e^{-\mu x} \quad \text{Eq.3}$$

I_0 = ความเข้มแสงก่อนผ่าน Filter

I_1 = ความเข้มแสงหลังผ่าน Filter

μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

x = ความหนาของ Filter

$$\mu = \mu_0 \rho \quad \text{Eq.4}$$

μ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น

μ_0 = ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมวล มีความสัมพันธ์ $\mu_0 \propto Z^3/E^3$ โดย Z คือ เลขอะตอมและ E คือ ค่าพลังงาน

ρ = ค่าความหนาแน่นของวัสดุ

จากสมการ Eq.3 และ Eq.4 จะเห็นได้ว่า ค่าความเข้มของแสงที่ผ่าน Filter นั้น จะแปรผันตาม 2 ตัวแปรหลักคือ ความหนาของ Filter และ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของสาร (ρ) และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Filter

จาก Beer lambert เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสัดส่วนการทะลุผ่านกับค่าพลังงานโฟตอนได้ดังนี้

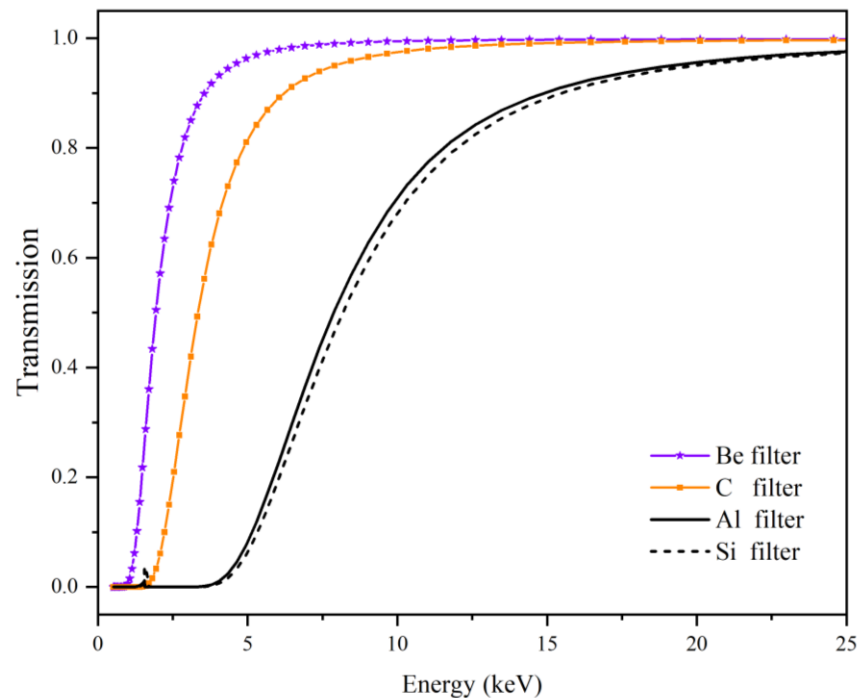
$$T = \frac{I_0}{I_1} = e^{-\mu(E)x} \quad \text{Eq.5}$$

โดย T = สัดส่วนการทะลุผ่าน

$\mu(E)$ = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นในเทอมของพลังงาน

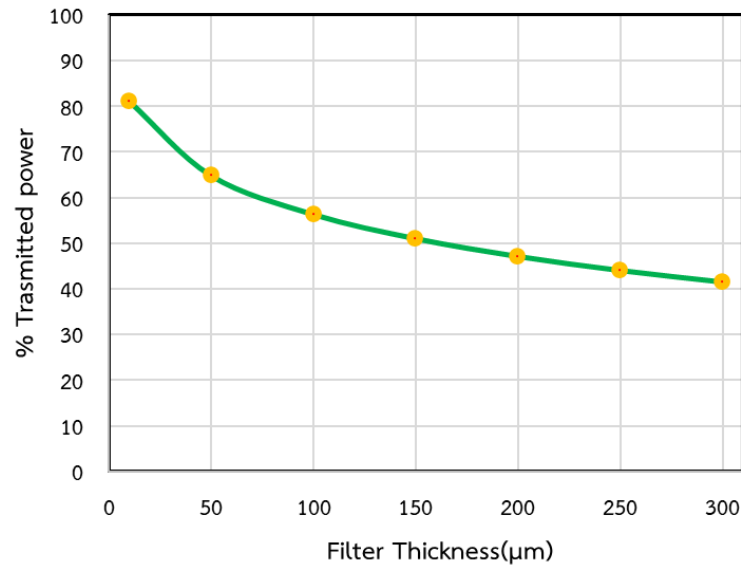
จากสมการที่ Eq.5 เราสามารถคำนวณสัดส่วนการทะลุผ่านของโฟตอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 500 ถึง 25,000 eV เมื่อผ่าน ของ Be C Al และ Si Filter ที่ความหนา 50 ไมครอน โดยสามารถสังเกตได้ว่าสัดส่วนการทะลุผ่านจะแปรผันตามเลขอะตอม โดย Be Filter มีค่าการทะลุผ่านมากที่สุด ดังนั้นจึงนิยมใช้ Be Filter ในระบบลำแสงที่ไม่ต้องการพลังงานในช่วงพลังงานต่ำกว่า 5,000 eV ในส่วนของ Al หรือ Si Filter สามารถสังเกตเห็นว่า สามารถช่วยกรองพลังงานได้ดีในช่วงก่อน 5,000 eV แต่ว่าในช่วงพลังงานสูงกว่า 5,000 eV จนถึงประมาณ 12,000 eV นั้น มีค่าสัดส่วนการทะลุผ่านน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าพลังงานถูกกรองไปค่อนข้างเยอะ ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเข้มของแสง

ซินโครตรอน หรือ Flux ในช่วงพลังงานนั้นด้วย ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับระบบลำเลียงแสงที่มีความต้องการใช้พลังงานในช่วงนี้ ดังแสดงในรูปที่ 10



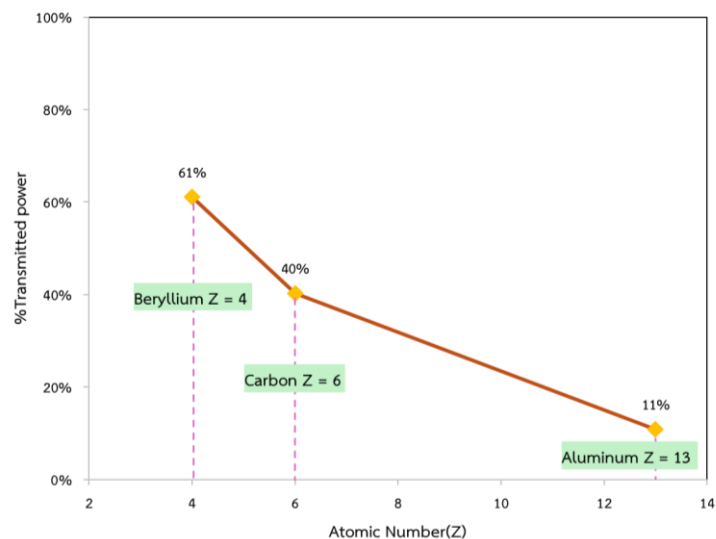
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนการทะลุผ่านกับค่าพลังงานโฟตอนของ Be C Al และ Si Filter ที่ความหนา 50 ไมครอน

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละการทะลุผ่านของกำลังทั้งหมด (Transmitted total power) ของแหล่งกำเนิดแสง IVU23 ที่ Gap ขนาด 6 mm โดยตั้งค่าพลังงานแรกที่พลังงาน 1,000 eV กับ ความหนาของ Diamond filter โดยกำหนดความหนาของ Diamond filter ที่ 10 50 100 150 200 250 และ 300 ไมครอน โดยผลการคำนวณ เป็นไปตามของกฎของ Beer lambert's Law คือ เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละการทะลุผ่านของกำลังก็ลดลงตามฟังก์ชันเอกโพเนนเชียล ดังในสมการ Eq.3



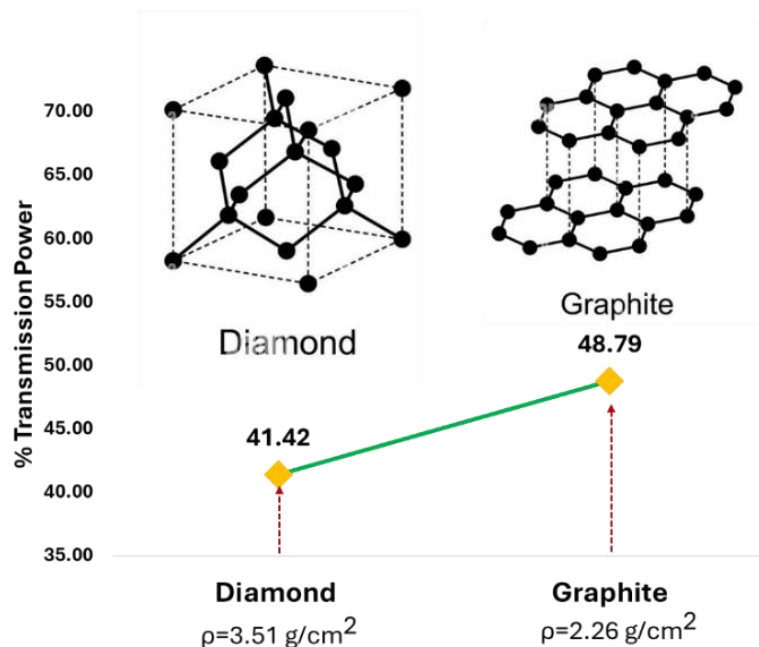
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของค่าร้อยละกำลังทั้งหมด (Total power) ที่ทะลุผ่านตัว Diamond filter ที่มีความหนาแตกต่างกัน

นอกจากนี้ผลการคำนวณเปรียบเทียบการทะลุกำลังเมื่อผ่าน Filter เมื่อชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ Filter แตกต่างกันที่พลังงาน 1,000 eV ได้แก่ Beryllium Carbon และ Aluminum ซึ่งมีเลขอะตอมที่ 4 6 และ 13 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อมีเลขอะตอมมาก นั้นหมายถึงมีจำนวนโปรตรอนมาก ทำให้มีพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นจึงส่งผลให้มีการดูดกลืนพลังงานมากขึ้นตาม^[15] ดังแสดงรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงผลการคำนวณร้อยละของกำลังเมื่อทะลุผ่าน Filter ความหนา 300 ไมครอน ชนิด Be C และ Al ที่พลังงาน 1,000 eV

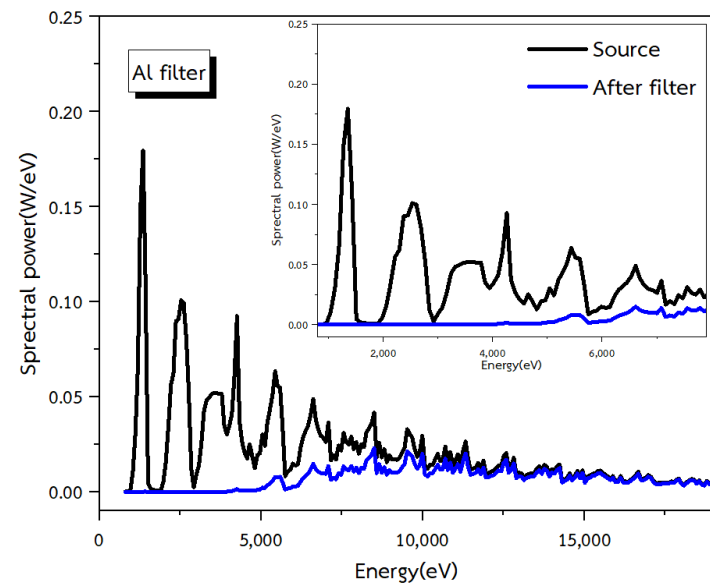
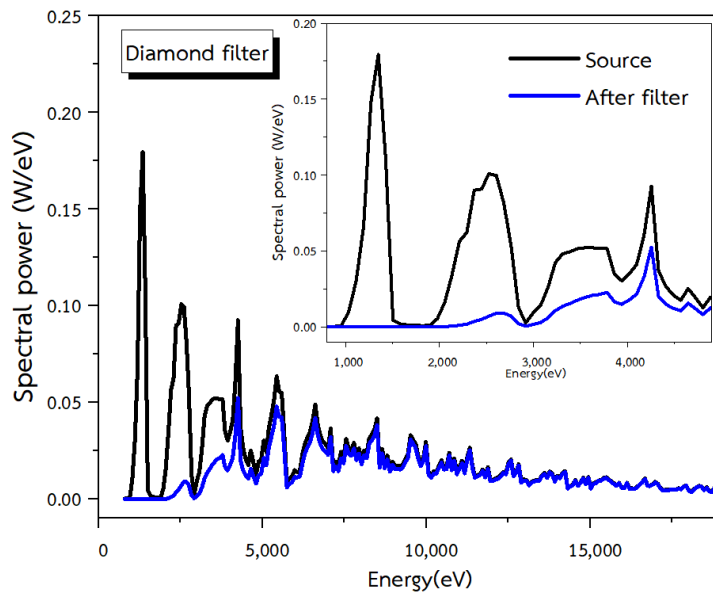
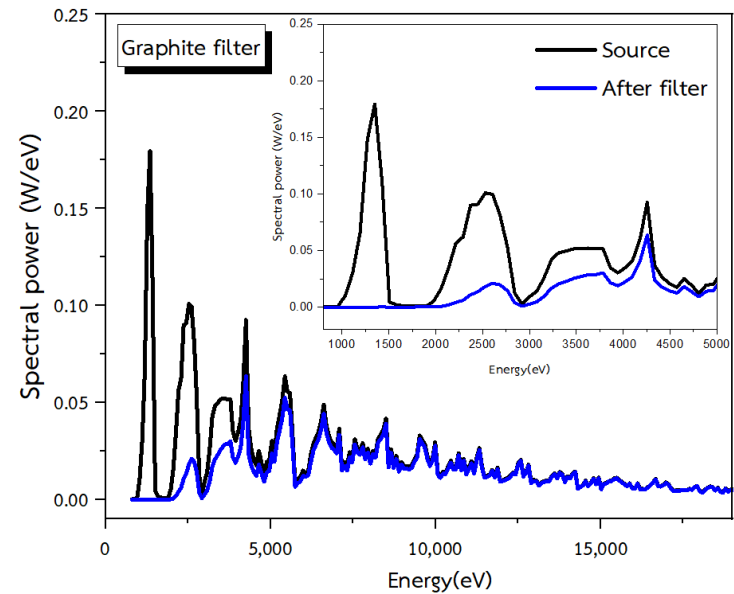
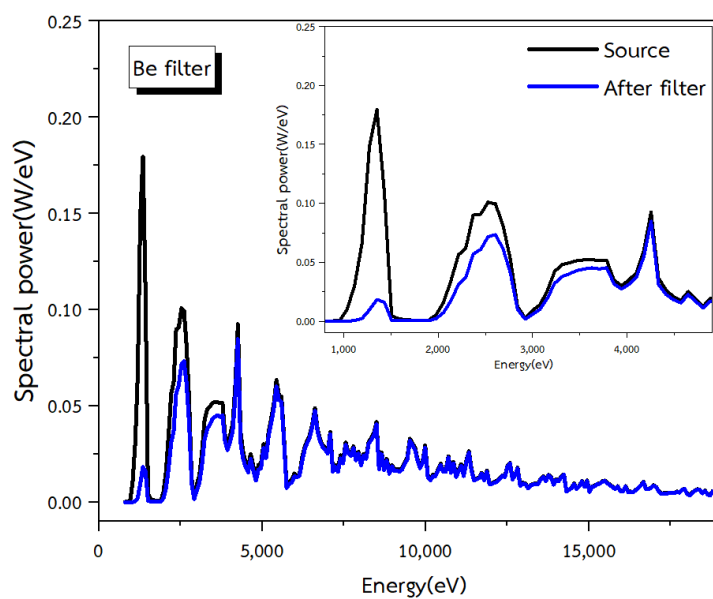
ในกรณีที่วัสดุของ Filter นั้นทำมาจากวัสดุเดียวกันแต่มีโครงสร้างต่างกัน ก็จะส่งผลต่อการทะลุผ่านของรังสี เช่นเดียวกัน เนื่องจากมีความหนาแน่นของอะตอมที่แตกต่างกัน รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบผลของความหนาแน่นของวัสดุที่ทำ Filter ที่ส่งผลต่อร้อยละการทะลุผ่านของกำลัง โดยเปรียบเทียบระหว่าง วัสดุ Diamond และ Graphite



รูปที่ 13 เปรียบเทียบร้อยละการทะลุผ่านของกำลังเมื่อ Filter ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีโครงสร้างอะตอมแตกต่างกัน ที่พลังงาน 1,000 eV

รูปที่ 14 แสดงผลการคำนวณการลดทอนกำลังในแต่ละพลังงาน ของ Filter ความหนา 300 ไมครอน ชนิด Beryllium Graphite Diamond และ Aluminum ตามลำดับ เมื่อใช้กับแหล่งกำเนิดแสง IVU23 ที่ Gap ขนาด 6 mm โดยตั้งค่า Harmonic 1 ที่พลังงาน 1,000 eV โดยสามารถสังเกตได้ว่า Filter เหล่านี้จะช่วยลดทอนกำลังในช่วงพลังงานต่ำ ช่วง 1,000 – 5,000 eV โดยมีค่า Transmitted power อยู่ที่ร้อยละ 68.9 48.79 41.42 และ 15.1 สำหรับ Beryllium Graphite Diamond และ Aluminum ตามลำดับ ดังนั้น สำหรับระบบลำเลียงแสงที่ไม่ต้องใช้พลังงานในช่วงนี้ เช่น SWAXS GIXRD ก็สามารถใช้ Filter เป็น Optical element แรก เพื่อกรองพลังงานต่ำ และลดกำลังของแสงก่อนตกไปยัง DCM

อย่างไรก็ตามในการเลือกใช้ Filter ในแต่ละชนิดก็จะต้องมีความเหมาะสมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ สถานีทดลอง และยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ระยะเวลาใช้งาน ราคา ความหนา เป็นต้น



รูปที่ 14 แสดงการลดทอนของกำลังในแต่ละช่วงพลังงานเมื่อใช้ Filter ต่างชนิดกัน

2.6 การหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว

การหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen - LN2) ในระบบซินโครตรอน มีบทบาทสำคัญมากในการรักษาสภาพของอุปกรณ์ทางแสงในระบบลำเลียงแสง (Beamline Optics) โดยเฉพาะอย่างยิ่งชิ้นส่วนที่ต้องรับรังสีเอกซ์พลังงานสูง เช่น Double Crystal Monochromator (DCM) หรือ X-ray Mirrors เมื่อผลึกซิลิกอนที่ใช้ในอุปกรณ์เหล่านี้ถูกทำให้อยู่ในอุณหภูมิระดับ Cryogenic (ประมาณ 77 K ถึง 125 K) ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนจะลดลงจนเข้าใกล้หรือเท่ากับศูนย์ (Zero thermal expansion) ในขณะที่ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) จะเพิ่มสูงขึ้นมาก การหล่อเย็นจึงช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการเสียรูปทรง (Thermal bump) จาก Heat load มหาศาล ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพและเสถียรภาพของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านไปยังสถานีทดลอง (End-station) เพื่อให้ระบบหล่อเย็นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่สร้างแรงสั่นสะเทือน (Vibration) ที่จะไปรบกวนการจัดเรียงตัวของออปติกส์

ระบบในซินโครตรอนจึงมักออกแบบเป็น "ระบบหมุนเวียนแบบปิดในสถานะเย็นยวดยิ่ง" (Closed-loop Subcooled LN2 System) โดยมีองค์ประกอบหลักดังนี้

1. เครื่องทำความเย็นและระบบหมุนเวียน (Cryocooler & LN2 Circulator) เป็นหัวใจหลักในการดึงความร้อนออกจากระบบและปั๊มไนโตรเจนเหลวให้หมุนเวียน ได้แก่ Cryogenic Pump (LN2 Pump) ปั๊มที่ออกแบบมาพิเศษสำหรับของเหลวอุณหภูมิต่ำมาก ทำหน้าที่ผลักดันให้ LN2 ไหลเวียนในวงจรปิด โดยต้องเป็นปั๊มที่สร้างแรงสั่นสะเทือนน้อยที่สุดและทนทานต่อการเกิดโพรงไอ (Cavitation)

2. อุปกรณ์ควบคุมสถานะของเหลว (Sub-cooler / Heat Exchanger) สิ่งสำคัญที่สุดในการหล่อเย็น ออปติกส์คือ ต้องห้ามไม่ให้น้ำ LN2 เดือดในขณะที่สัมผัสกับชิ้นส่วน เพราะฟองอากาศจากการเดือด (Boiling) จะทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนระดับไมโครอนซึ่งทำลายคุณภาพของบีมระบบจึงต้องมี Sub-cooler เพื่ออัดความดันและลดอุณหภูมิของ LN2 ให้อยู่ในจุด "Subcooled" (ต่ำกว่าจุดเดือดที่ความดันนั้นๆ) ทำให้ของเหลวสามารถรับ Heat load ได้โดยคงสถานะของเหลวไว้ 100%

3. ท่อลำเลียงสุญญากาศ (Vacuum Insulated Transfer Lines) ท่อสำหรับลำเลียง LN2 จากเครื่องทำความเย็นไปยังอุปกรณ์ใน Beamline ต้องเป็นท่อหุ้มฉนวนสุญญากาศ (Vacuum jacketed) เพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากภายนอกรั่วไหลเข้าไป (Heat leak) และป้องกันการเกิดน้ำแข็งเกาะรอบท่อ

4. ชุดบล็อกหล่อเย็น (Cooling Block / Manifold) ชิ้นส่วนที่ประกบติดกับผลึกซิลิกอนหรือกระจกโดยตรง มักทำจากทองแดงปลอดออกซิเจน (OFHC Copper) หรือวัสดุที่นำความร้อนได้ดีเยี่ยมในอุณหภูมิต่ำภายในบล็อกจะมีการเจาะช่อง (Micro-channels) เพื่อให้ LN2 ไหลผ่านและแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลึกได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมักใช้ Indium foil เป็นตัวกลางเชื่อมต่อ (Thermal interface) เพื่ออุดช่องว่างและเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

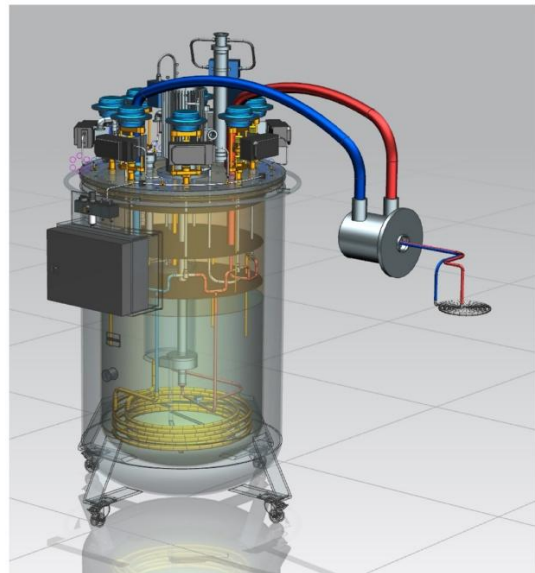
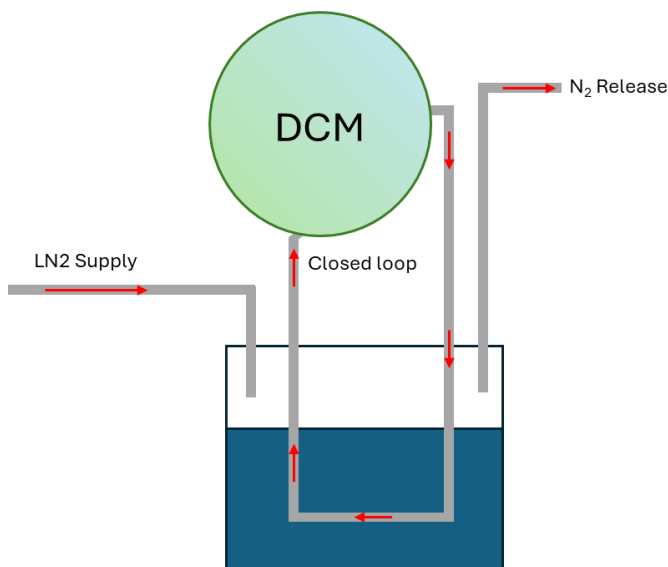
5. ระบบเซนเซอร์และควบคุม (Instrumentation & Control System) Temperature

5.1 Sensors เซนเซอร์วัดอุณหภูมิที่ออกแบบสำหรับงาน Cryogenic โดยเฉพาะ เช่น เซนเซอร์แบบ Cernox หรือ Pt100Flow

5.2 Meters & Pressure Gauges: เพื่อตรวจสอบอัตราการไหลและความดันของระบบให้คงที่

5.3 PID Controller & Valves ระบบควบคุมอัตโนมัติที่สั่งการวาล์วสัดส่วน (Proportional valves) และฮีตเตอร์ เพื่อรักษาระดับอุณหภูมิและความดันของ Sub-cooled LN2

5.4 Safety Relief Valves วาล์วระบายความดันฉุกเฉินในกรณีที่ระบบเกิดการขยายตัวของก๊าซอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 15 จำลองการทำงานของระบบ Cooling LN2

2.7 การสูญเสียของไนโตรเจนเหลว

โดยทั่วไปแล้วการสูญเสีย (Loss หรือ Boil-off) ของไนโตรเจนเหลว (LN2) ในระบบหล่อเย็น เกิดจากการที่ LN2 ได้รับความร้อนจนถึงจุดเดือด (-196°C) ทำให้เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการสูญเสียนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่มหลักๆ ดังนี้

2.7.1 การสูญเสียของความร้อนจากสภาพแวดล้อม (Static Heat Leak)

เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียอยู่ตลอดเวลา แม้ระบบจะไม่ได้มีการดึง LN2 ไปใช้งานก็ตาม โดยแบ่งเป็น

- การเสื่อมสภาพของระบบสุญญากาศ (Convection Loss) ระบบท่อส่ง (Transfer line) และถังเก็บ LN2 มักใช้ท่อหุ้มสุญญากาศ (Vacuum Jacketed Lines) หากระดับสุญญากาศ (Vacuum level) เสื่อมลง อากาศที่แทรกซึมเข้าไปจะทำให้ LN2 ระเหยอย่างรวดเร็ว (มักสังเกตได้จากหยดน้ำหรือน้ำแข็งเกาะที่ผิวนอกของอุปกรณ์)

- การนำความร้อนผ่านโครงสร้าง (Conduction Loss) ความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านของแข็งที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนที่เย็นจัดกับอุณหภูมิห้องได้ เช่น ขาหยั่งรองรับท่อ (Supports), ก้านวาล์ว, ข้อต่อ (Bayonet connections) หรือแม้แต่สายไฟเซนเซอร์ที่เดินทะลุเข้าไปในระบบสุญญากาศ
- การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Loss) ความร้อนจากภายนอกแผ่รังสีเข้าไปยังท่อด้านใน การป้องกันส่วนนี้มักใช้ฉนวนหุ้มหลายชั้น (Multi-Layer Insulation - MLI) หุ้มไว้ในชั้นสุญญากาศ หาก MLI ฉีกขาด เสื่อมสภาพ หรือพันไว้ไม่ดีขีด จะทำให้เกิด Loss สูงขึ้น

2.7.2 ภาระความร้อนจากการทำงานของอุปกรณ์ (Active Heat Load)

คือความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวอุปกรณ์ที่เราต้องการหล่อเย็นโดยตรง โดยสำหรับซินโครตรอนแล้ว ในระบบสถานีทดลอง (End-station) หรือระบบลำเลียงแสง ภาระความร้อนนี้อาจมาจากลำแสงความเข้มสูงที่ตกกระทบลงบนชิ้นส่วนออปติกส์ (เช่น Monochromator) ยิ่งโหลดความร้อนตรงนี้สูง LN2 ก็จะต้องรับความร้อนแฝงกลายเป็นไอน้ำมากขึ้นเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่มากขึ้นเช่นเดียวกัน

2.7.3. ปัจจัยด้านพลศาสตร์และการออกแบบท่อส่ง (Dynamic & Transfer Losses)

- การระเหิดจากความดันตกคร่อม (Flashing Loss) เมื่อ LN2 ไหลผ่านวาล์ว ข้อต่อโค้งงอ หรือจุดที่ท่อลดขนาด จะเกิดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ความดันที่ลดลงกะทันหันนี้ทำให้จุดเดือดของ LN2 ต่ำลง ส่งผลให้ของเหลวบางส่วนเดือดกลายเป็นก๊าซ (Flash gas) ทันที
- การสูญเสียตอนเริ่มเดินระบบ (Cool-down Loss) คือปริมาณ LN2 ที่ต้องใช้ไปเพื่อดึงอุณหภูมิของมวลวัสดุท่อและอุปกรณ์ต่างๆ ให้เย็นลงจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิใช้งาน ปัจจัยนี้จะส่งผลกระทบมากหากระบบมีการเปิด-ปิดหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนบ่อยๆ
- ขนาดและระยะทางของท่อท่อ ที่ยาวเกินไป หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าอัตราการไหลที่ต้องการ จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนจากภายนอกโดยไม่จำเป็น

2.7.4 ปัญหาทางกลไกของอุปกรณ์ (Mechanical Issues)

- วาล์วระบายความดัน (Relief Valves) รั่ว หากสปริงล้า หรือตั้งค่าความดัน (Set pressure) ไว้น้อยเกินไปกับแรงดันใช้งานจริง วาล์วอาจจะเปิดระบายไอน้ำไนโตรเจนทิ้งเร็วกว่าปกติ
- ประสิทธิภาพของ Phase Separator ตัวแยกก๊าซและของเหลวที่ปลายท่อก่อนเข้าสู่อุปกรณ์ หากทำงานไม่สมบูรณ์ อาจทำให้มีของเหลวหลุดรอดทิ้งไปพร้อมกับท่อระบายก๊าซได้

2.8 การคำนวณอัตราการสูญเสียของไนโตรเจนเหลว

การคำนวณอัตราการสูญเสียหรือการระเหย (Boil-off rate) ของไนโตรเจนเหลว (LN2) หลักๆ จะใช้หลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ในสภาวะคงที่ (Steady-state) โดยพิจารณาจาก ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ไหลเข้าระบบ เทียบกับ ความร้อนแฝงกลายเป็นไอ ของ LN2

$$\dot{m} = \frac{Q_{total}}{L_v}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการระเหยของ LN2 เป็นมวลต่อเวลา (เช่น kg/s หรือ kg/hr)

Q_{total} คือ ภาระความร้อนรวมทั้งหมดที่ไหลเข้าระบบ (หน่วยเป็น Watt หรือ J/s)

L_v คือ ความร้อนแฝงกลายเป็นไอ (Latent Heat of Vaporization) ของ LN2 ที่ความดันบรรยากาศ (1 atm) ซึ่งมีค่าคงที่ประมาณ 199 kJ/kg (หรือ 199,000 J/kg)

ในการหาค่า Q_{total} ต้องนำภาระความร้อนจากทุกแหล่งมาบวกกัน [20]

$$Q_{total} = Q_{active} + Q_{static}$$

2.8.1 Static Heat Load, Q_{static}

คือ ความร้อนที่รั่วไหลผ่านผนังท่อและถังเก็บ (Heat Leak) โดยประกอบไปด้วย

- ท่อส่ง (Transfer Lines) โดยสามารถดูจากสเปกชีตของผู้ผลิต (เช่น ท่อ Vacuum Jacketed Line อาจมีค่า Heat leak อยู่ที่ 0.5 W/m) หากเดินท่อยาว 10 เมตร ก็จะได้ Static Heat Load ของท่อ = 5 W
- สำหรับข้อต่อ (Bayonets / Valves) ผู้ผลิตมักจะระบุค่า Heat leak มาให้เป็นวัตต์ต่อชิ้น (เช่น ข้อต่อละ 1.5 W) ^[19]

ตารางที่ 4 ประมาณการค่าความร้อนรั่วไหลสำหรับข้อต่อชนิดต่างๆ

อุปกรณ์ (Component)	ค่าความร้อนรั่วไหลประมาณการ (Watts)
Bayonet Coupling (ข้อต่อถอดประกอบได้)	0.5 - 2.0 W ต่อคู่
Cryogenic Valve (วาล์วแบบ Manual)	3.0 - 5.0 W ต่อตัว
Control Valve (วาล์วควบคุมอัตโนมัติ)	5.0 - 10.0+ W (ขึ้นอยู่กับขนาด Actuator)
Pipe Support (จุดรองรับท่ภายใน)	0.1 - 0.5 W ต่อจุด
Tee / Elbow (ข้อแยก/ข้องอ)	0.5 - 1.5 W ต่อจุด
Flex Hose (สายอ่อน - ต่อเมตร)	1.5 - 3.0 W/m (สูงกว่าท่อแข็ง)

2.8.2 Active Heat Load, Q_{active}

คือความร้อนที่เกิดจากอุปกรณ์ที่คุณต้องการหล่อเย็นขณะทำงาน หากเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือฮีตเตอร์ สามารถดูจากกำลังไฟฟ้า (Watt) ได้เลย หากเป็นชิ้นส่วนที่รับความร้อนจากแหล่งอื่น (เช่น การดูดกลืนพลังงานจากลำแสง) ต้องคำนวณหรือจำลอง (Simulate) ค่าพลังงานที่ตกกระทบและถูกดูดกลืนเป็นหน่วย Watt

2.8.3 Dynamic & Transfer Losses

แบ่งออกเป็น

- การระเหยจากความดันตกคร่อม (Flashing Loss) เมื่อ LN2 ไหลผ่านวาล์ว ข้อต่อโค้งงอ หรือจุดที่ท่อลดขนาด จะเกิดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) ความดันที่ลดลงกะทันหันนี้ทำให้จุดเดือดของ LN2 ต่ำลง ส่งผลให้ของเหลวบางส่วนเดือดกลายเป็นก๊าซ (Flash gas) ทันที
- ขนาดและระยะทางของท่อ ท่อที่ยาวเกินไป หรือมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าอัตราการไหลที่ต้องการ จะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการรับความร้อนจากภายนอกโดยไม่จำเป็น

2.8.3 ผลของ Flow rate และ Pressure drop ต่อการสูญเสียไนโตรเจนเหลว

เมื่อไนโตรเจนเหลว (LN2) ไหลผ่านท่อ ข้อต่อ และวาล์วต่างๆ จะเกิดแรงเสียดทาน ทำให้เกิด ความดันตกคร่อม (ΔP) สมมติว่าต้นทาง (ถัง Dewar) จ่าย LN2 มาที่ความดัน 3 bar (จุดเดือดจะอยู่ที่ประมาณ -185 °C) เมื่อไหลไปถึงปลายทางที่อุปกรณ์ ความดันอาจตกลงเหลือ 1 bar (จุดเดือดลดลงเหลือ -196 °C) กระบวนการที่ความดันลดลงนี้ (Isenthalpic expansion) จะทำให้ LN2 มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือดใหม่ของตัวเอง สิ่งที่เกิดขึ้นคือ LN2 บางส่วนจะต้อง เดือดกลายเป็นไอ (Flash Gas) ทันที เพื่อดึงความร้อนแฝง และลดอุณหภูมิของของเหลวที่เหลือให้เย็นลงไปอยู่ที่ -196 °C ไอที่เดือดทิ้งไป นั่นคือ Loss จากอัตราการไหล (Flow rate) ที่ไม่ได้ช่วยดึงความร้อนจากอุปกรณ์เราเลย แต่เสียไปเพราะการดันของเหลวผ่านท่อ

โดย Flow rate ถือเป็นหนึ่งในปัจจัย ที่มีผลต่อการออกแบบระบบหล่อเย็นด้วยไนโตรเจนเหลว แต่ต้องเข้าใจว่า Flow rate ไม่ได้ทำให้เกิดการสูญเสียเสมอไป มีทั้งช่วยเพิ่มและลดขึ้นอยู่กับกรณี โดยหากเทียบ เมื่อมีการสูญเสียของไนโตรเจนมากขึ้น แต่การสูญเสียเนื่องจากระบบอื่นยังคงเท่าเดิมนั้น จะพบว่า เมื่อมีอัตราการไหลที่มากขึ้น จะทำให้การสูญเสียไนโตรเจนน้อยลง ขณะที่อัตราการไหลต่ำ จะพบว่าอัตราการสูญเสียที่มากกว่า ดังสมการ

$$Loss(\%) = \frac{\dot{m}_{system}}{\dot{m}_{flash}}$$

เนื่องจากไนโตรเจนเหลวจะไหลเอื่อยๆ ผ่านข้อต่อต่างๆ ความร้อนที่แทรกเข้ามาตามข้อต่อจะทำให้ LN2 เริ่มเดือดกลายเป็นฟองก๊าซปะปนมาในท่อ และเมื่อของเหลวเดินทางไปถึงอุปกรณ์ปลายทาง (เช่น ชุดทำความเย็นของคริสตัลหรืออุปกรณ์ออปติกส์) จะกลายเป็นสภาวะ Two-phase flow (มีทั้งก๊าซและของเหลว) ซึ่งก๊าซมีประสิทธิภาพในการรับความร้อนได้แย่มาก ทำให้อุณหภูมิของอุปกรณ์แกว่ง และอาจจะบายความร้อนไม่ทัน

ในกรณีที่อัตราการไหลสูงเกินไป โดยปกติภายในท่อ VJP มักจะมีการออกแบบท่อชั้นใน (Inner pipe) ให้มีรอยหยักคล้ายสปริง (Bellows) เพื่อรองรับการหดตัวจากความเย็นจัด เมื่อดัน LN2 ด้วย Flow rate ที่สูงมาก ความเร็วของของเหลวที่ปะทะกับผิวท่อและข้อต่อต่างๆ จะสร้างแรงเสียดทาน ทำให้เกิด ความดันตกคร่อม (Pressure Drop) อย่างรวดเร็ว เมื่อความดันลดลงกะทันหัน จุดเดือดของ LN2 จะลดลงตามไปด้วย ทำให้ LN2 บางส่วนเดือดฉับพลัน (Flash gas) กลายเป็นไอทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ นอกจากนี้ ฟองก๊าซที่เกิดจาก Pressure drop อาจจะมีวงแหวนไปตามท่อด้วยความเร็วสูง การยุบและขยายตัวของฟองก๊าซเหล่านี้สร้างแรงสั่นสะเทือน (Micro-vibration) ซึ่งเป็นอาจจะส่งผลกับของระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงในระดับไมครอนหรือนาโนเมตร

ดังนั้นสามารถ หาอัตราการสูญเสียรวมทั้งหมดได้ดังนี้

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{system} + \dot{m}_{flash}$$

โดย $\dot{m}_{system}$ = Loss จากความร้อนทะลุท่อและตัวอุปกรณ์

$\dot{m}_{flash}$ = Loss จากการสูญเสียแรงดัน (คิดจาก Flow rate และ Pressure drop)

2.8.4 ตัวอย่างการคำนวณ

นำท่อ Vacuum Jacket Line ที่มีอัตราการสูญเสีย 0.5 W/m ขนาดความยาว 10 เมตร 2 เส้น ถูกต่อด้วยข้อต่อที่มีอัตราการสูญเสีย อยู่ที่ 2 W ต่อชิ้น โดยนำไปหล่อเย็นผลึก ที่มีภาระความร้อนอยู่ที่ 198 W จะมีอัตราการสูญเสีย ไตรเจนอยู่ที่

1. คำนวณค่าการสูญเสียไนโตรเจนเหลว

- ค่าการสูญเสียของท่อ = 0.5 W/m * 10 m * 2 เส้น = 100 W

- ค่าการสูญเสียของข้อต่อ = 2 W

รวมเป็น 102 W

ดังนั้น ค่าอัตราการสูญเสีย (Q total) อยู่ที่ 198+102 = 300 W (J/s) *ไม่ได้คำนึงถึง Flow rate และ Pressure drop

2. มวลที่ระเหย เท่ากับ

$$\dot{m} = \frac{300 \text{ J/s}}{199,000 \text{ J/kg}}$$

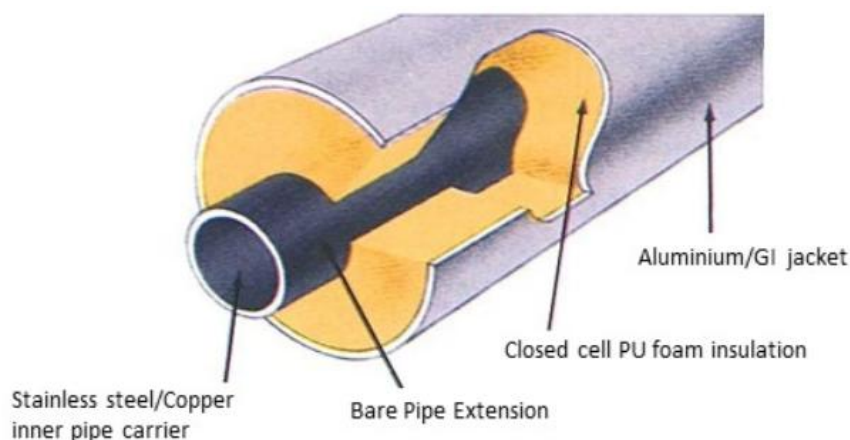
ดังนั้น จะได้ค่าอัตราการสูญเสียอยู่ที่ 0.001507 kg/s หรือ 6.72 L/hr

2.9 ชนิดของท่อลำเลียงไนโตรเจนเหลว

ในรายงานนี้จะมุ่งเน้นการสูญเสียเนื่องจากท่อที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงของไนโตรเจนเหลว ไปยังจุดที่ต้องการหล่อเย็น โดยท่อนั้นจะต้องสามารถทนต่ออุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ซึ่งประมาณ -196 องศาเซลเซียส รวมถึงมีการนำความร้อน (Thermal conductivity) นั้นต่ำในบริบทนี้หมายถึง ค่าความสามารถในการยอมให้ความร้อนจากภายนอกผ่านเข้าไปยังไนโตรเจนเหลวภายในท่อ ซึ่งระบบท่อที่ถูกนำมาใช้ควรออกแบบมาให้มีค่านี้ "ต่ำที่สุด" เพื่อลดการระเหยของก๊าซ โดยหากค่า การนำความร้อนนั้นต่ำ ก็จะทำให้การสูญเสียของไนโตรเจนเหลวนั้นลดลงไปด้วย

โดยชนิดของท่อลำเลียงไนโตรเจนเหลวนั้นมี 2 ชนิดหลักๆ ด้วยกันดังนี้

ท่อชนิดที่ 1 ท่อชนิดโฟมฉนวน (Foam Insulated Transfer Piping) ซึ่งเป็นท่อแบบโบราณ โดยท่อประกอบไปด้วย ท่อด้านในทำจากทองแดง หรือ สแตนเลส และถูกหุ้มด้วยชั้นโฟมฉนวนกันความร้อน โดยทำจาก Polyvinyl chloride, Polyurethane หรือ Armaflex โดยข้อดีของท่อชนิดนี้ คือ มีราคาถูก แต่ว่า มีอัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่า โดยท่อมีการถ่ายเทความร้อน 10 – 20 วัตต์/เมตร (BTU/hr/ft) ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียของไนโตรเจนเหลวค่อนข้างสูง และมักจะมีปัญหาเรื่องน้ำเกาะ (Condensation) หรือน้ำแข็งเกาะหากฉนวนเสื่อมสภาพ โดยมักจะเสื่อมสภาพภายใน 5 ปีเนื่องจากความชื้น ดังแสดงรูปที่ 16



รูปที่ 16 ท่อชนิดโฟมฉนวน (Foam Insulated Transfer Piping)

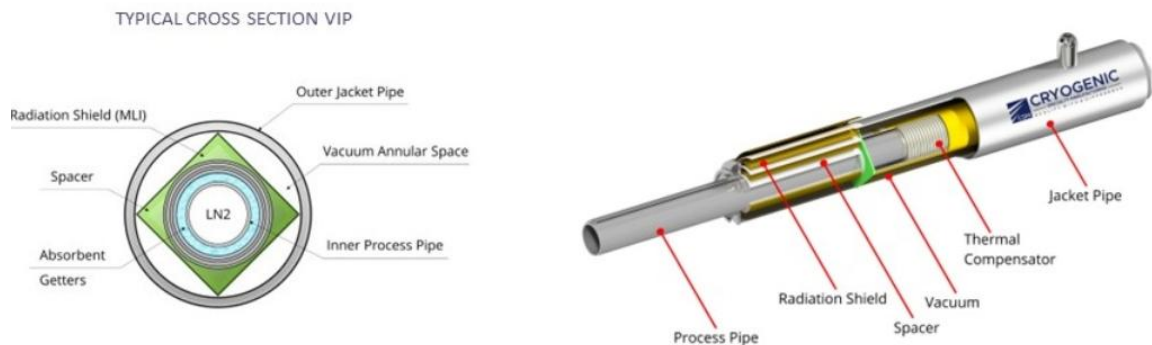
ท่อชนิดที่ 2 ท่อชนิดสุญญากาศ (Vacuum insulated pipe (VIP) or Vacuum jacketed pipe(VJP)) ประกอบด้วยท่อสองชั้น (ท่อในและท่อนอก) โดยช่องว่างระหว่างท่อจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อน

ท่อชั้นใน (Inner Pipe): ทำหน้าที่ลำเลียงของเหลวอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic liquid) มักพันด้วยแผ่นสะท้อนความร้อนหลายชั้น (Multi-layer Insulation - MLI) เพื่อลดการแผ่รังสีความร้อน

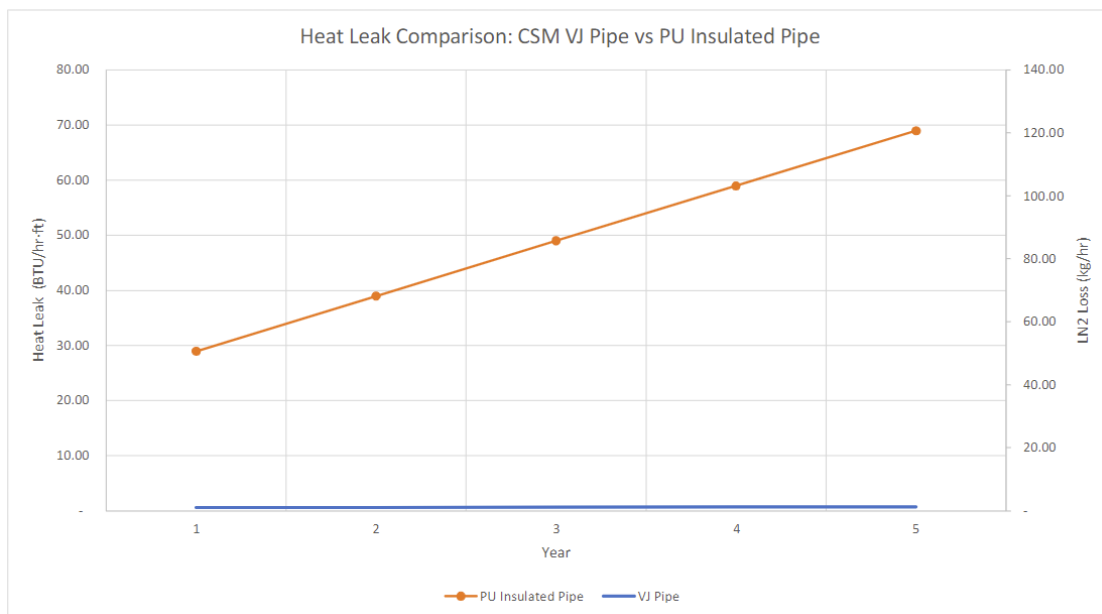
ชั้นสุญญากาศ (Vacuum Annulus): ช่องว่างระหว่างท่อในและท่อนอกจะถูกดูดอากาศออกจนเป็นสุญญากาศ เพื่อตัดการนำความร้อน (Conduction) และการพาความร้อน (Convection)

ท่อชั้นนอก (Outer Jacket): ทำหน้าที่เป็นเปลือกหุ้มและคงสภาพสุญญากาศไว้ โดยปกติท่อชั้นนอกจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง แม้ภายในจะมีไนโตรเจนเหลวที่เย็นจัดไหลอยู่ก็ตาม โดยท่อชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการกั้นความร้อนดีกว่าท่อหุ้มโฟมแบบเดิมถึง 10-50 เท่า ดังแสดงในรูปที่

17



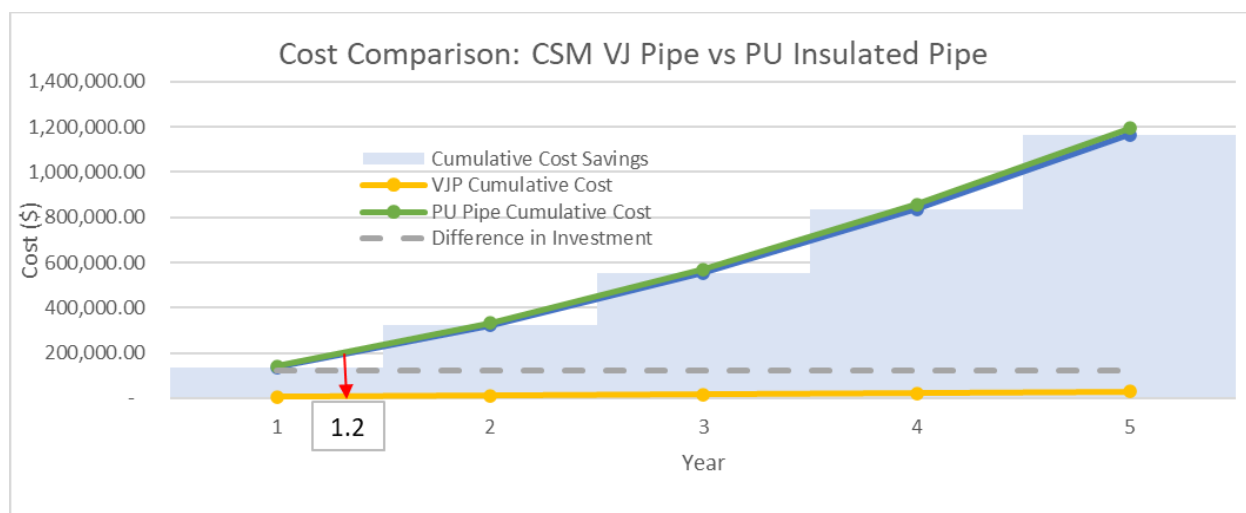
รูปที่ 17 ท่อชนิดชนิดสุญญากาศ (Vacuum insulated pipe (VIP) or Vacuum jacketed pipe(VJP))



รูปที่ 18 อัตราการสูญเสียไนโตรเจนเหลว ระหว่าง VJP และ PU Insulated Pipe

จากรูปที่ 18 และ 19 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 5 ปี อัตราการสูญเสียของ PU Insulated pipe นั้นเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยบริษัท CSM ยังได้แสดงอัตราความคุ้มทุนของบริษัทเซมิคอนดักเตอร์แห่งหนึ่ง^[19] โดยเปรียบเทียบท่อความยาว 100 เมตร ชนิด ทองแดงหุ้มฉนวน PU isolated pipe ที่ราคา ประมาณ 40,000 ดอลลาร์ และ ระบบ

ท่อ สแตนเลส SS304L หุ้มฉนวนสุญญากาศ ราคา 160,000 โดยจากการคำนวณพบว่าบริษัทสามารถชดเชยค่าลงทุนท่อชนิด VJP ได้ภายใน 1.2 ปี ^[19]



รูปที่ 19 อัตราความคุ้มค่าในการลงทุนใช้ท่อ VJP

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ อัตราการสูญเสีย กับ ขนาดของท่อ และ ชนิดของท่อ ^[19]

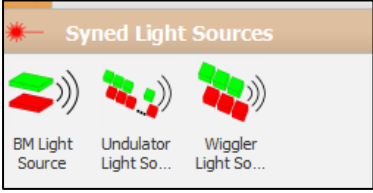
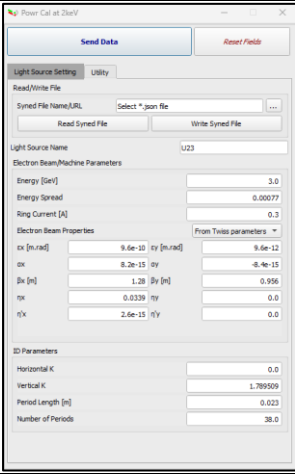
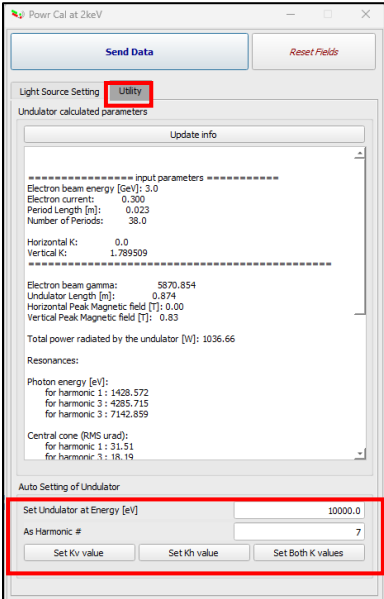
Line Size	Vacuum Jacketed Pipe (W/m)	Insulated Copper: New (W/m)	Insulated Copper: After 5 Yrs (W/m)	Bare Copper (W/m)
¾" ODT	0.47	7.9	32.3	165
1" IPS	0.5	8.8	44.2	280
1 ½" IPS	0.58	10.5	52.7	397
2" IPS	0.64	12.2	60.8	530
3" IPS	0.79	15.2	76.1	769
4" IPS	0.92	18.2	90.8	1000

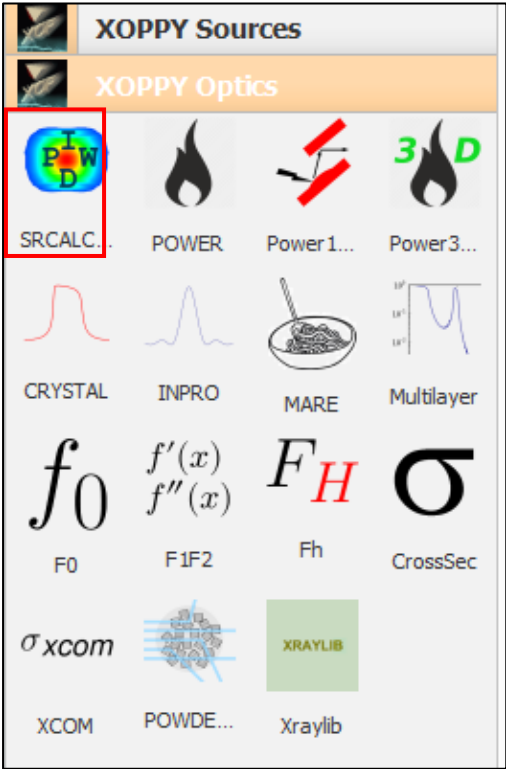
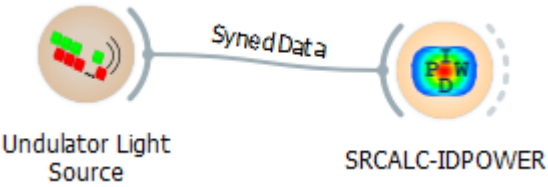
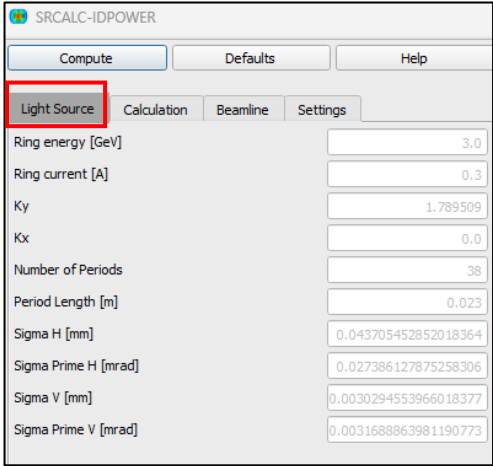
บทที่ 3 การคำนวณภาระความร้อนที่ตกบนระบบทัศนศาสตร์

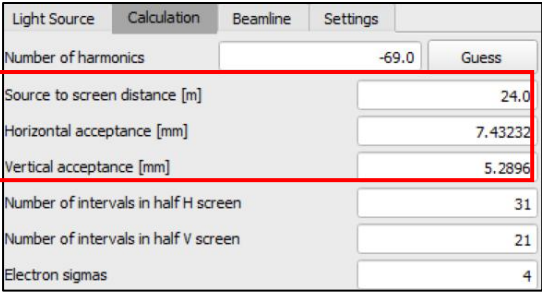
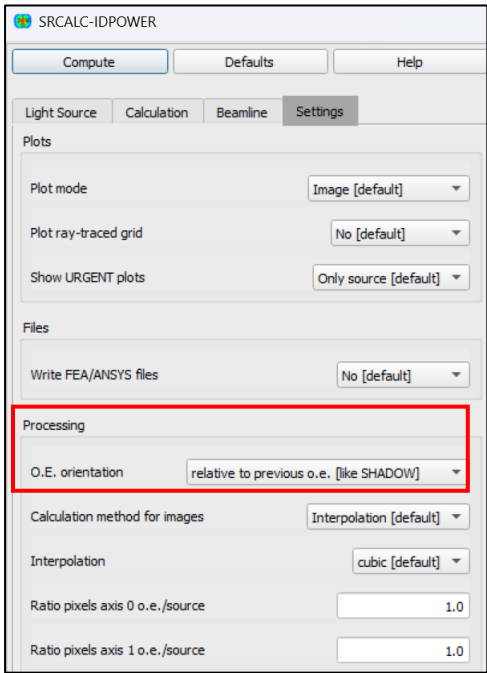
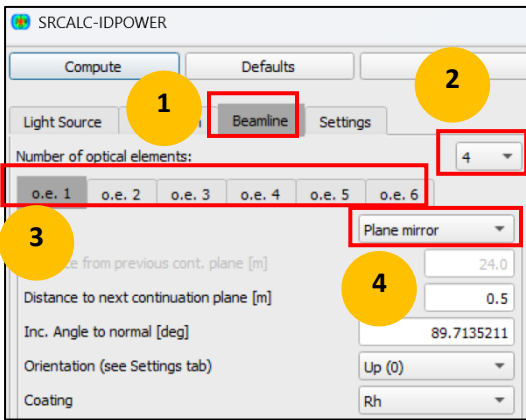
3.1 การคำนวณ Power บนผลึก

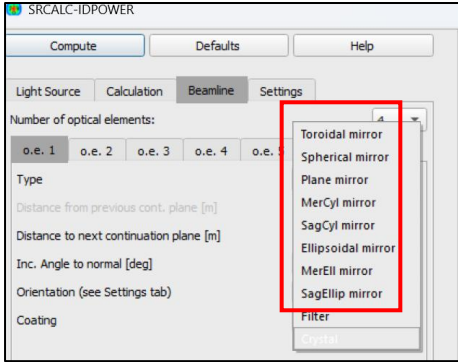
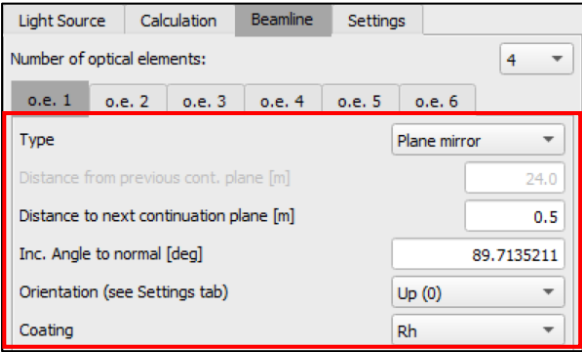
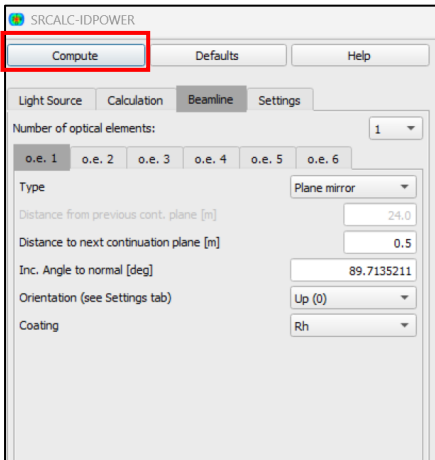
การคำนวณจะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การคำนวณกำลัง การคำนวณระยะทางของไนโตรเจนเหลว (LN2 line) และการคำนวณอัตราการใช้ LN2 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

3.1 คำนวณกำลัง (Power) ที่ตกลงบนผลึกว่ามีขนาดเท่าไร ด้วยโปรแกรม XOPPY

	1. เลือกชนิด Source
	2. กรอก Source parameters
	3. คลิก Utility จากนั้นกรอกค่าพลังงาน และ Harmonic ที่ต้องการคำนวณกำลัง (ในตัวอย่างนี้ ต้องการคำนวณที่พลังงาน 10 keV โดยใช้ Harmonic 7) 4. จากนั้น กด Set K value 5. กด Send Data

	6. เลือก Channel XOPPY Optic จากนั้นเลือก Icon “SRCALC-IDPOWER”
	7. เชื่อม 2 Icon เข้าด้วยกัน
	8. จากนั้นเมื่อ กด Send Data ข้อมูล Source Parameters จาก “Undulator Light Source” จะถูกส่งต่อมายัง “SRCALC-IDPOWER” 9. เมื่อคลิก Tap “Light Source” จะแสดง สีเทา ดังรูป *หากไม่ต้องการใช้ “Undulator Light Source” สามารถ กรอก Source Parameters โดยตรงใน “SRCALC-IDPOWER” ได้เช่นเดียวกัน

	10. กรอกพารามิเตอร์ Tap “Calculation” - Source to screen distance: กรอกระยะจาก Source จนถึงตำแหน่ง Optic ตัวแรก - Horizontal and Vertical acceptance: กรอกขนาดของช่องเปิด ณ ตำแหน่งกระจกตัวแรก
	11. คลิก Tap “Setting” เลือก O.E. Orientation เลือก “Relative to previous o.e.” ซึ่งจะเป็นการตั้งค่ากำหนดแนวการวางกระจก โดยเลือกค่าสั่งเพื่อกำหนดว่าในการกำหนด orientation ของ o.e. เมื่อเทียบกับ o.e. ก่อนหน้า ว่าหมุนไปเท่าไร
	12. คลิก Tap หมายเลข 1 “Beamline” จากนั้นคลิก หมายเลข 2 เพื่อเลือกจำนวน Optical elements ก่อนถึง DCM ที่ต้องการคำนวณ 13. คลิกหมายเลข 3 o.e.1 ถึง o.e.6 เป็น Tap สำหรับ ตั้งค่าพารามิเตอร์ Optical elements แต่ละตัว 14. หมายเลข 4 เป็นเครื่องมือสำหรับเลือกชนิดของ Optic เช่น Plane mirror, Filter

	15. แสดง Optical elements ที่สามารถเลือกเพื่อคำนวณ ซึ่งแต่ละ Optic จะมีการกรอกพารามิเตอร์ที่ต่างกััน
	ยกตัวอย่างการตั้งค่าพารามิเตอร์กระจก Plane mirror - Type: เลือก Plane mirror - Distance from previous cont. plane: ระยะจาก o.e. ตัวก่อนหน้า ยกเว้น o.e.1 จะ Link ข้อมูลจาก Source to screen distance - Distance to next continuation plane: ระยะจนถึง o.e. ตัวถัดไป - Inc. angle to normal: มุมตกกระทบนหน่วย deg. เทียบกับ normal axis - Orientation: ตั้งค่าแนวการวางกระจก โดยเปรียบเทียบกับตัวข้างหน้า - Coating: เลือกชนิดผิวเคลือบกระจกหรือวัสดุที่ใช้ทำ Filter
	16. คลิก “Compute”

17. คลิก Tap “Result”
18. Tap 1 แสดง Integrated Power ก่อนตกกระทบ จก
19. Tap 2 แสดง Absorption Power ที่กระจก
20. Tap 3 แสดง Transmitted Power หรือ Reflected Power

```
#
# Info from IDPower/Urgent
#

Undulator : Period = 0.02300 m, kx = 0.0000, ky = 1.7895, n = 38

Electron beam : Energy = 3.000 GeV, Current = 0.300 A,
sigmx = 0.0437 mm, sigy = 0.0030 mm, sigx1 = 0.0274 mrad, sigy1 = 0.0032 mrad

Acceptance : d = 24.000 m, XSize = 7.432 mm, YSize = 5.290 mm,
nxp = 63, nyp = 43

iharm = -69, nSig = 4

E1 = 1428.575 eV, Ec = 4985.73 eV, Highest harmonic = 98571.68 eV

Total Power = 1035.679 W, Power Density = 8152.998 W/mrad**2

Mirror 1 angle = 89.71 Pol = s Coating = Rh

420.22 W emitted on: harmonics 1 to 69

Pow. ref(W) Pow. abs.(W)
Mirror 1 319.4057 100.8103

#
```

21. โดยผลกาคำนวณแสงยัง Tap “Info”
22. จะแสดงผลการคำนวณดังรูป

```
#
# Additional Info o.e. distances
#

***** SUMMARY OF DISTANCES *****
** DISTANCES FOR ALL O.E. [m] **

OE#      TYPE  p [m]  q [m]  src-oe  src-screen
-----
1  Plane mirror  24.0000  0.5000  24.0000  24.5000
```

นอกจากนี้ยังสามารถตรวจเช็คความถูกต้องของตำแหน่งกระจกที่เราคำนวณได้ได้เช่นเดียวกัน

3.2 ผลการคำนวณ Power บนผลึก

ตารางที่ 6 ระบบทัศนศาสตร์และการจัดการภาระความร้อนของกำลังของแสงซินโครตรอนระบบลำเลียงแสง Tender X-ray Absorption Spectroscopy (TXAS)

TXAS				White beam Slit	CM	HRM1	HRM2	Filter	Power at DCM (W)
Energy (eV)	Harmonic	K	Info.						
1,000	1	2.3306	Parameters	0.30 x 0.22 (4 σ') (mrad ²)	Coating: Rh Inc. Ang: 5 mrad	Coating: Rh Inc. Ang: 40 mrad	Coating: Rh Inc. Ang: 40 mrad		11.0
			Power (W)	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.		
				2,342.3 1,585.5	756.8 255.9	500.8 476.3	24.6 13.56		
2,000	1	1.3099	Parameters	0.30 x 0.22 (4 σ') (mrad ²)	Coating: Rh Inc. Ang: 5 mrad	Coating: Ni Inc. Ang: 13 mrad	Coating: Ni Inc. Ang: 13 mrad		109.8
			Power (W)	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.		
				739.9 364.1	375.8 63.89	311.9 172.0	139.8 30.0		
10,000	7	1.7895	Parameters	0.29 x 0.19 (4 σ') (mrad ²)	Coating: Rh Inc. Ang: 5 mrad	Coating: Rh Inc. Ang: 5 mrad	Coating: Rh Inc. Ang: 5 mrad	Be filter (Moveable) thickness: 300 μ m	163.54
			Power (W)	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				1,380.9 911.8	469.1 116.9	352.2 44.02	308.2 34.4	273.7 110.22	

* Abs. = Absorbed power, Tran. =Transmitted power, Inc. Ang = Incident angle

ตารางที่ 7 ระบบทัศนศาสตร์และการจัดการภาระความร้อนของกำลังของแสงซินโครตรอนระบบลำเลียงแสง Hard X-ray Absorption Spectroscopy (HXAS)

HXAS				Fixed Mask	Window	Filter		Filter	Filter	CM	Power at CCM (W)			
Energy (eV)	Harmonic	K	Info.											
6,000	3	1.6577	Parameters	0.13 × 0.10 (mrad ²)	Be window thickness: 300 μm		Diamond filter thickness: 300 μm				Coating: Si Inc. Ang: 2.3 mrad	128.05		
			Power (W)	In	Abs.	In	Abs.	In			Abs.		In	Abs.
				4,423.1	3,965.8	457.27	110.05	347.23			104.35		242.8	114.81
20,000	9	1.5077	Parameters	0.13 × 0.10 (mrad ²)	Be window thickness: 300 μm		Diamond filter thickness: 300 μm		Diamond filter thickness: 500 μm	Diamond filter thickness: 500 μm	Coating: Rh Inc. Ang: 2.3 mrad	103.21		
			Power (W)	In	Abs.	In	Abs.	In	Abs.	In	Abs.		In	Abs.
				3,658.9	3,248.8	413.07	114.27	298.7	96.82	201.9	54.98		146.9	29.74
35,000	17	1.6163	Parameters	0.13 × 0.10 (mrad ²)	Be window thickness: 300 μm		Diamond filter thickness: 300 μm		Diamond filter thickness: 500 μm	Diamond filter thickness: 500 μm	Coating: Pt Inc. Ang: 2.3 mrad	119.10		
			Power (W)	In	Abs.	In	Abs.	In	Abs.	In	Abs.		In	Abs.
				4,204.8	3,759.7	445.06	111.42	333.6	102.13	231.51	60.73		170.78	32.72

* Abs. = Absorbed power, Tran. =Transmitted power, Inc. Ang = Incident angle

ตารางที่ 8 ระบบทัศนศาสตร์และการจัดการภาระความร้อนของกำลังของแสงซินโครตรอนระบบลำเลียงแสง Grazing-incidence X-ray Diffraction/ Total Reflection X-ray Fluorescence Spectrometer (GIXRD/TRXRF) และ ระบบลำเลียงแสง High-resolution X-ray Diffraction (HRXRD)

GIXRD and HRXRD				Fixed Mask	XY Slit	Window	Filter	White beam Slit	Power at DCM (W)
Energy (eV)	Harmonic	K	Info.						
8,000	3	1.24945	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	Be window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	0.24*0.11 (4σ') mrad ²	94.27
			Power (W)	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				2512.64 526.04	1986.6 114.52	872.08 296.39	575.68 430.21	145.47 51.20	
16,000	7	1.46787	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	Be window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	0.24*0.11 (4σ') mrad ²	135.45
			Power (W)	In Out	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				3467.9 906.1	2561.8 1508.5	1053.3 313.84	739.44 507.51	231.92 148.42	
28,000	11	1.31556	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	Be window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	0.24*0.11 (4σ') mrad ²	106.47
			Power (W)	In Out	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				2785.46 623.36	2162.1 1234.62	927.48 304.41	623.07 452.09	169.98 63.51	

* Abs. = Absorbed power, Tran. =Transmitted power, Inc. Ang = Incident angle

ตารางที่ 9 ระบบทัศนศาสตร์และการจัดการภาระความร้อนของกำลังของแสงซินโครตรอนระบบลำเลียงแสง Small and Wide Angle X-ray Scattering (SWAXS)

SWAXS				Fixed Mask	XY Slit	Window	Filter	White beam Slit	Power at DCM (W)
Energy (eV)	Harmonic	K	Info.						
8,000	3	1.0977	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	Be window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	Opening: 0.23*0.09 mrad ² (4σ')	47.63
			Power (W)	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				1572.56 298.25	1274.3 680.91	593.39 242.04	351.34 289.31	62.03 14.39	
10,000	5	1.50776	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	Opening: 0.23*0.09 mrad ² (4σ')	102.68
			Power (W)	In Out	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				2966.75 830.36	2136.4 1264.4	872.00 275.85	596.32 429.33	166.99 64.31	
20,000	11	1.6433	Parameters	0.4*0.4 mrad ² Position: 13.33 m	0.2*0.2 mrad ² Position: 17.9 m	window thickness: 300 µm	Diamond thickness: 500 µm	Opening: 0.23*0.09 mrad ² (4σ')	121.29
			Power (W)	In Out	In Abs.	In Abs.	In Abs.	In Abs.	
				3524.19 1122.09	2402.1 1446.32	955.78 276.46	679.32 472.22	207.09 85.8	

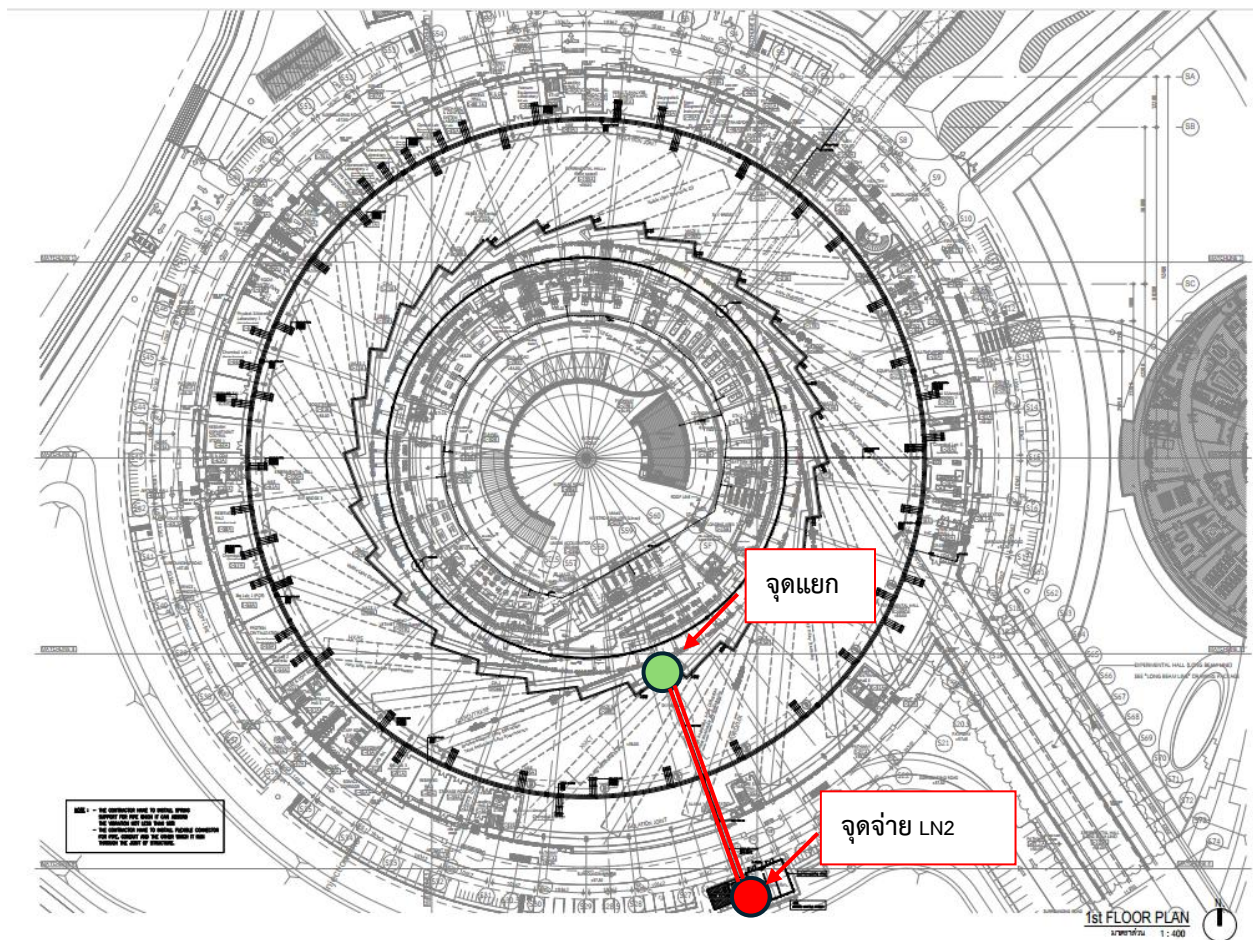
* Abs. = Absorbed power, Tran. =Transmitted power, Inc. Ang = Incident angle

บทที่ 4 วิธีการทดลอง

4.1 การคำนวณระยะทางจากแหล่งจ่าย LN2 มายังผลึก

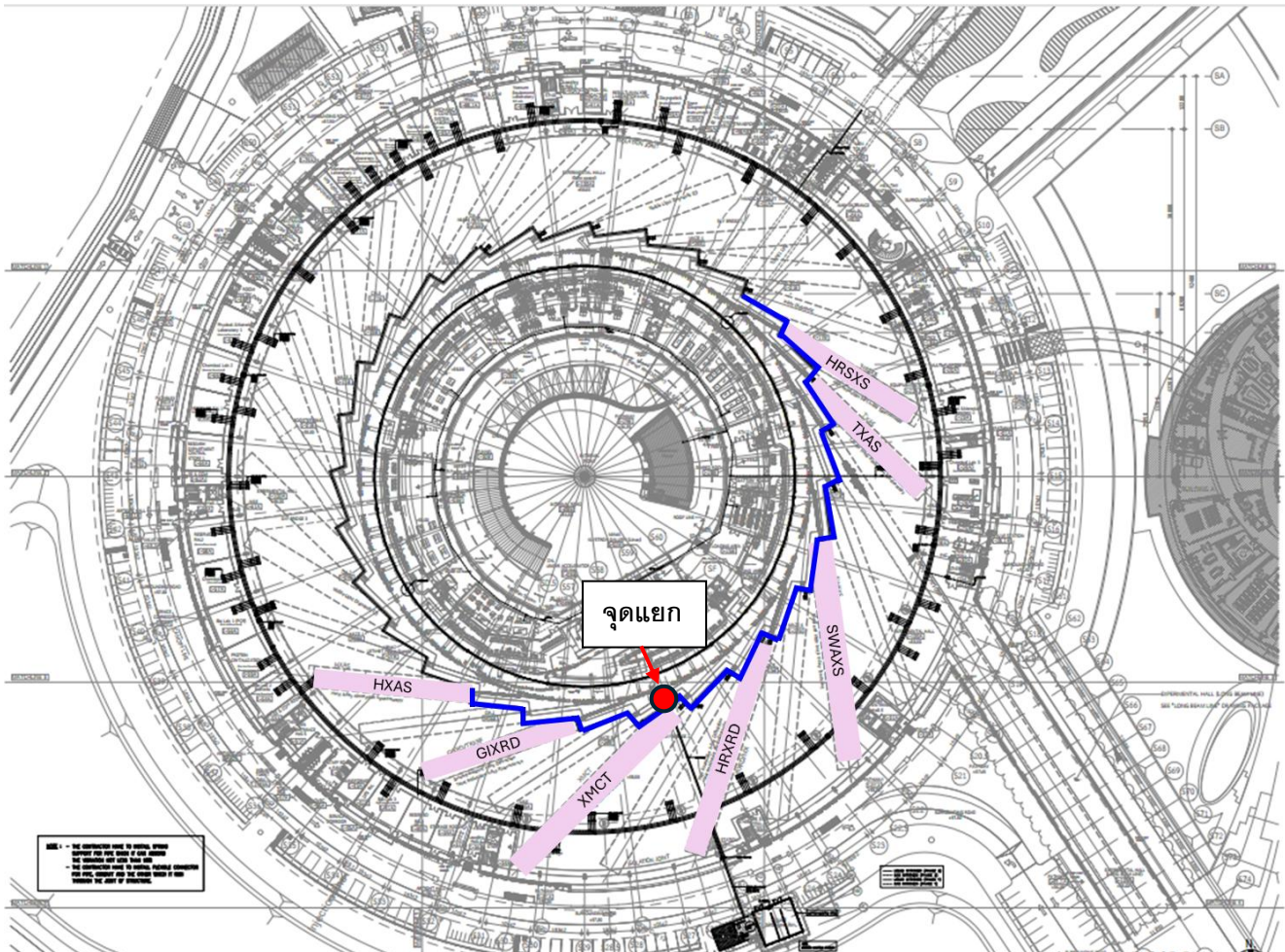
การคำนวณระยะทางจะแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่

ระยะช่วงที่ 1 จากจุดจ่ายมายังจุดแยกวงกักเก็บซึ่งประกอบไปด้วย 2 เส้น โดยมีระยะทาง 55 เมตร ดังนั้นคิดเป็น 110 m ดังรูปที่ 20



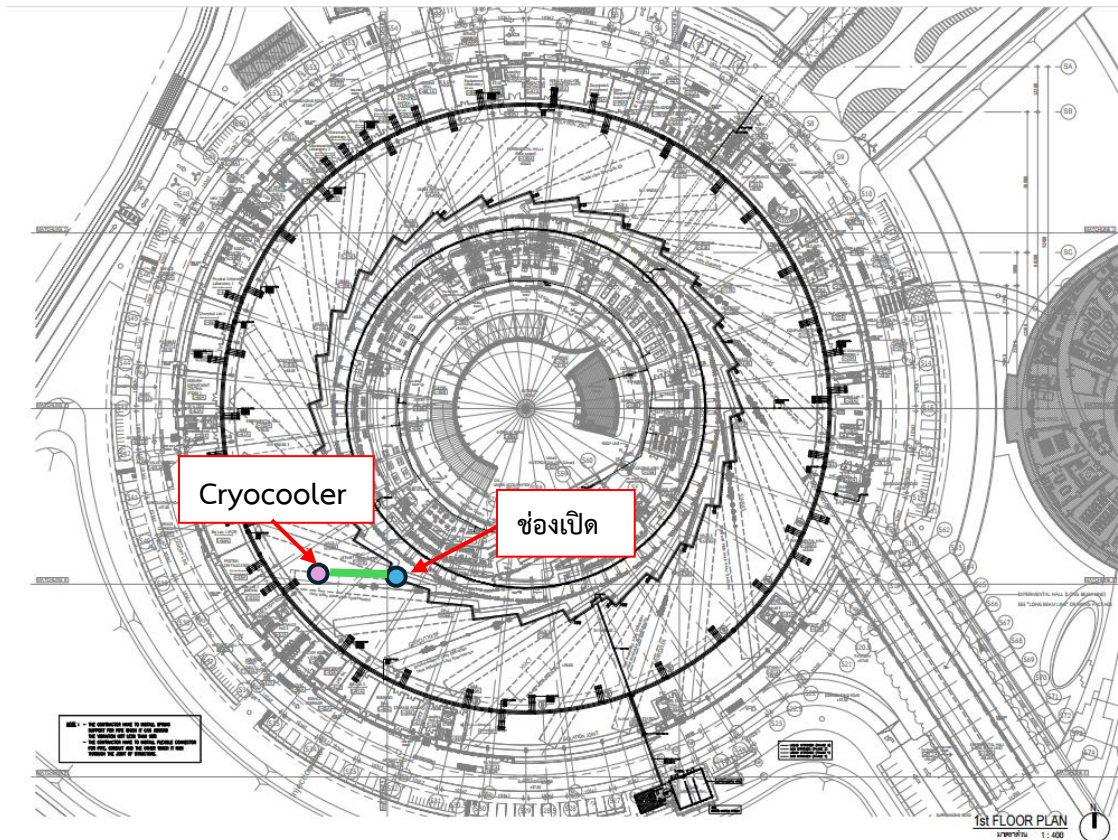
รูปที่ 20 ระยะทางที่ 1 แสดงเส้นทางจากจุดจ่าย LN2 มายังจุดแยก

ระยะช่วงที่ 2 จุดแยกจะทำแยก LN2 line ไปยังด้านซ้ายและขวาของวงกักเก็บเพื่อไปยังตำแหน่งช่องเปิด ของแต่ละระบบลำเลียงแสง (เส้นสีน้ำเงิน) โดยจะเป็นแบบทางเดียว ซึ่งแต่ละ 1 หักของกำแพง มีความยาวประมาณ 15 เมตร จากในรูปมีจำนวน 13 หัก ดังนั้นระยะทางนี้ เท่ากับ $13 \times 15 = 195 \text{ m}$ ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงเส้นทางการวัดทางเดินท่อ LN ตำแหน่งการวัดระยะที่ 2

ระยะช่วงที่ 3 คือ จากช่องเปิดของแต่ละระบบลำเลียงแสงมายัง Cryocooler ซึ่งอยู่ระยะเดียวกับตำแหน่งของ DCM แต่อยู่ภายนอก Hutch (ไม่มี Return) ดังนั้นระยะนี้จะขึ้นกับตำแหน่งการวางของ DCM โดยจะนำระยะทางจาก Source ถึง กำแพง (ประมาณ 20 เมตร) ลบ กับระยะ Source ถึง DCM ดังรูปที่ 22 ซึ่งสามารถสรุปออกมาได้ดังตารางที่ 10

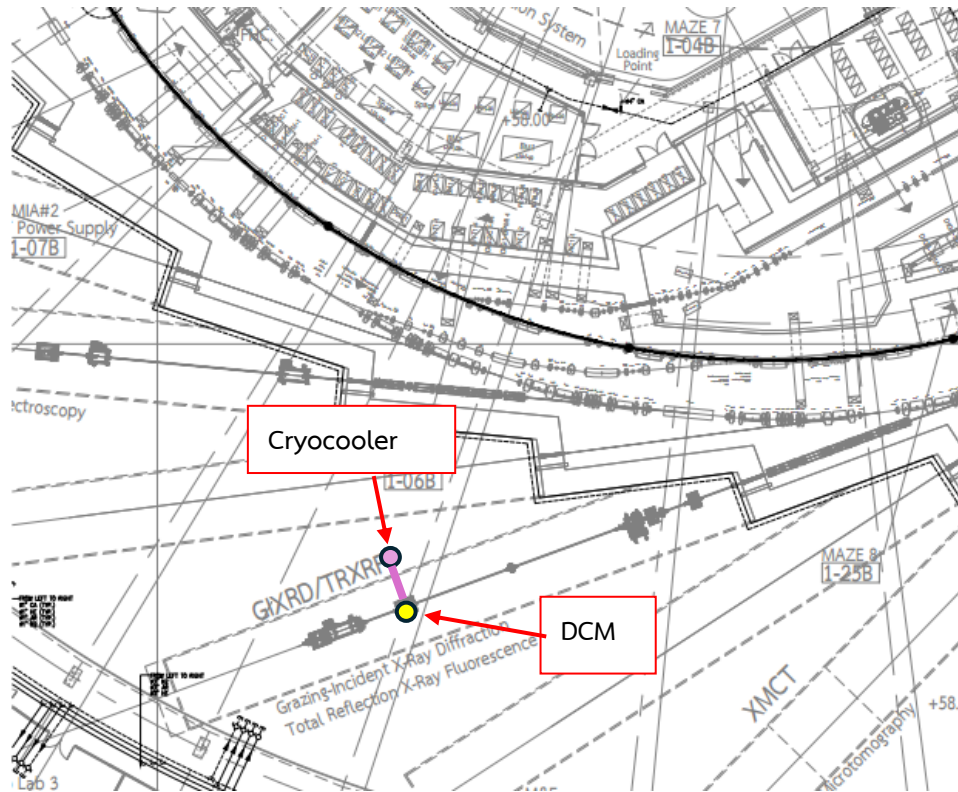


รูปที่ 22 ตำแหน่งการวัดระยะช่วงที่ 3

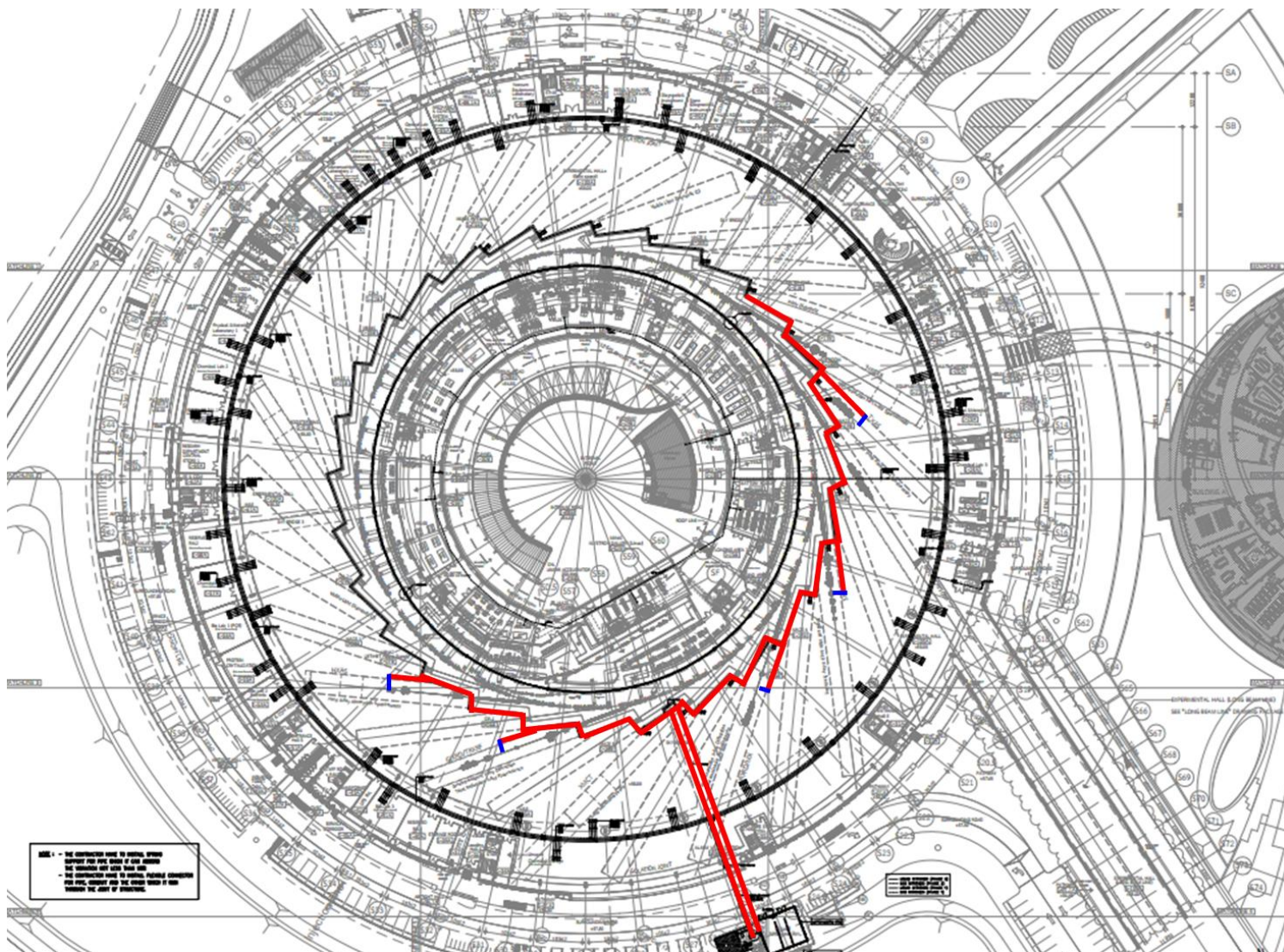
ตารางที่ 10 ผลสรุประยะทางช่วงที่ 3 จากช่องเปิดถึง Cryocooler

Beamline	ผลระยะช่วงที่ 3 (m)
TXAS	8
HXAS	8
SWAXS	5
GIXRD/TRXRF	5
HRXRD/MX	5

ระยะช่วงที่ 4 เป็นระยะจาก Cryocooler มายังผลึกตัวที่ 1 ภายใน DCM โดยรูปแบบจะเป็นลักษณะ Closed loop ดังแสดงรูป 23 ทั้ง Feed+Return คิดเป็น ระยะทาง 8 เมตร ทั้งหมด 5 ระบบลำเลียงแสง คิดเป็น $8 \times 5 = 40$ เมตร



รูปที่ 23 แสดงเส้นทางการจ่าย LN2 จาก Cryocooler ไปยัง ผลึกตัวแรก



รูปที่ 24 แสดงเส้นทางการจ่าย LN2 ไปยังแต่ละระบบลำเลียงแสง

ตารางที่ 11 ผลการคำนวณระยะทางจากจุดจ่าย LN2 มายังผลึกตัวแรกที่ DCM

Distance Calculation			
ระยะช่วงที่ 1	ความยาว (m)	จำนวน line	ระยะทาง(m)
จากจุดจ่าย LN2 --> จุดแยก มี 2 line	55	2	110
ระยะช่วงที่ 2	ความยาวหัก (m)	จำนวนหัก	ระยะทาง(m)
จากจุดแยก --> ช่องเปิดแต่ละปีมไลน์	15	13	195
ระยะช่วงที่ 3	Source to DCM (m)	Source to Wall (m)	Wall to DCM(m)
จากช่องเปิดแต่ละปีมไลน์ --> Cryocooler			
TXAS	28	20	8
HXAS	28	20	8
SWAXS	25	20	5
GIXRD/TRXRF	25	20	5
HRXRD/MX	25	20	5
ระยะช่วงที่ 4	Cryo to 1 st X'tal (m)	จำนวน beamline	ระยะทาง(m)
จาก Cryocooler --> 1st crystal			
Feed and Return (4*2)	8	5	40

4.2 การคำนวณเวลาการให้บริการ

คำนวณเวลาการให้บริการแสง (Beamtime) โดยในที่นี้ เรากำหนดให้ เปิดให้บริการทั้งหมด 8 เดือน เฉลี่ยเดือนละ 30 วัน เนื่องจากเครื่อง SPS-II เป็นการเติมอิเล็กตรอนแบบ Top-Up mode ชั่วโมงการให้บริการแสงทั้งหมด 24 ชั่วโมง ดังนั้น จำนวนชั่วโมงการให้บริการแสงเท่ากับ $8 \times 30 \times 24 = 5,760$ ชั่วโมง

4.3 การคำนวณอัตราการใช้ไนโตรเจนเหลว

การคำนวณอัตราการใช้ ไนโตรเจนเหลวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ซึ่งจะใช้สมการในการคำนวณไม่เหมือนกัน ได้แก่

4.3.1 การคำนวณอัตราการใช้ไนโตรเจน ช่วงที่ 1 (ระยะช่วงที่ 1 ถึง ระยะช่วงที่ 3)

ระยะตั้งแต่จุดจ่ายไนโตรเจน จนถึง Cryocooler นั่นก็คือ ระยะช่วงที่ 1 ถึง ระยะช่วงที่ 3 ในตารางที่ 11 ซึ่งมีระยะทางรวม โดยในช่วงนี้ จากการสอบถามผู้มีความเชี่ยวชาญภายในสถาบันคาดว่าจะมีการใช้ท่อแบบ Vacuum

jet pipe เนื่องจากช่วยลดอัตราการสูญเสียได้ดี และยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ดังนั้นใช้สมการ อัตราการสูญเสียไนโตรเจนจากไหลภายในท่อ ดังสมการ

$$\dot{m} = \frac{Q_{total}}{L_v}$$

และสมการ

$$Q_{total} = Q_{ท่อ} + Q_{ข้อต่อ}$$

$$Q_{ท่อ} = 336 (m) \times 0.92 (W/m) = 309.12 W$$

สำหรับการคำนวณโหลดกำลังของข้อต่อ นั้น โหลดจะขึ้นอยู่กับจำนวนข้อต่อ โดยคิดเป็นจุดละ 1.5 วัตต์ โดยจากภาพที่ XX นั้นมี 30 จุด ดังนั้นจะได้ว่า

$$Q_{ข้อต่อ} = 30 \times 1.5 = 45 W$$

ดังนั้น

$$Q_{total} = 309.12 + 45 = 354.12 W, (J/s)$$

$$\dot{m} = \frac{354.12 J/s}{199,000 J/kg} = 0.0017795 kg/s$$

หรือ กล่าวคือ 7.93 Liter/hr

ดังนั้นจากข้อมูลเวลาการให้บริการแสงซินโครตรอน 1 ปี 5,760 ชั่วโมง ดังนั้น

อัตราการสูญเสียต่อปี = $7.93 \times 5,760 = 45,677$ ลิตรต่อปี

* การคำนวณอัตราการสูญเสียจากท่อ เราจะไม่คิด การสูญเสียจากข้อต่อ เนื่องจาก เราเคยได้รับข้อมูลจากบริษัทว่าสามารถใช้เป็นการเชื่อมต่อหน้างาน ซึ่งจะทำให้ไม่มีการสูญเสียจากข้อต่อ (To be confirmed)

4.3.2 การคำนวณอัตราการใช้ไนโตรเจน ช่วงที่ 2 (ระยะช่วงที่ 4+โหลดบนผลึก)

ในช่วงนี้นั้นประกอบไปด้วยโหลดกำลัง (Power Loaded) 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

- โหลดกำลังจาก Cryocooler ซึ่งก็คือระยะที่ 4 หรือ เส้นสีน้ำเงินในรูปที่ 19 โดยคำนวณทั้ง Feed and Return line โหลดกำลังที่สูญเสียอยู่ที่ประมาณ ความยาว 1 เมตร/ 10 วัตต์ (ข้อมูลจาก FMB) ดังนั้นหาโหลดกำลังได้จากระยะทางช่วงที่ 4 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 40 เมตร ดังนั้นโหลดกำลังอยู่ที่ $40 \times 10 = 400$ วัตต์ โดยในส่วนนี้เราจะใช้ข้อมูลจาก FMB ในการคำนวณ เนื่องจากเป็นข้อมูลที่มีเกิดจากการวัดอัตราการสูญเสียจริงๆ
- โหลดกำลังที่ผลึกตัวแรก ซึ่งจะขึ้นแต่ละระบบลำเลียงแสง โดยได้ข้อมูลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม XOPPY ในหัวข้อที่

ตารางที่ 12 ตารางสรุปโหลดของกำลัง

คำนวณโหลดกำลัง	
โหลดกำลังที่ผลิตแรกของแต่ละระบบลำเลียงแสง	หน่วยวัตต์
TXAS	163.54
HXAS	128.05
SWAXS	121.29
GIXRD/TRXRF	135.45
HRXRD/MX	135.45
โหลดกำลังจาก Cryocooler line ของทุกระบบลำเลียงแสง	400
จำนวนโหลดกำลังทั้งหมด	1,083.78

ข้อมูลจาก HEPS และ FMB อยู่ที่ประมาณ = 100 วัตต์ / 2.5 ลิตร / 1 ชั่วโมง

จากผลรวมกำลังจะได้จำนวน LN2 ต่อ 1 ชั่วโมงคือ

ถ้า 100 วัตต์ ใช้ 2.5 ลิตร/ชั่วโมง

ดังนั้น 1,083.78 วัตต์ ใช้ $(1,083.78 \times 2.5) / 100 = 27.1$ ลิตรต่อชั่วโมง

จากข้อมูลเวลาการให้บริการจากขั้นตอนที่ 1 คือ 5,760 ชั่วโมง

ดังนั้นปริมาณการใช้ LN2 ทั้งหมดต่อปีจะได้ $27.1 \times 5,760 = 156,096$ ลิตรต่อปี

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณราคาค่าใช้จ่าย LN2

นำผลรวมปริมาณการทั้ง 2 ช่วง และดำเนินการบวกเพิ่มอีก 20% สำหรับ Engineering factor เช่น การสูญเสียเนื่องจากความดันตกคร่อมตก ซึ่งจะต้องการข้อมูลในส่วนของ Flow rate และขนาดของท่อ PVJ เพิ่มเติม

ดังนั้นใช้ไนโตรเจนเหลว $(45,677 + 156,096) + 20\% = 242,128$ ลิตรต่อปี

จากข้อมูลราคา LN2 ต่อลิตรอยู่ที่ประมาณ 8.3 บาทต่อลิตร (อ้างอิงจากราคากลางการจัดซื้อเครื่องปัจจุบัน)^[16] ดังนั้น ราคาค่าใช้จ่ายค่า LN2 ต่อปี โดยเปิดให้บริการแสงจำนวน 8 เดือนอยู่ที่

$242,128 \times 8.3 = 2,009,660$ บาทต่อปี

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

หากมีข้อมูลเพิ่มเติม ในส่วนของ Flow rate และขนาดของท่อ PVJ เพิ่มเติม ก็จะสามารถคำนวณปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวและงบประมาณได้แม่นยำมากขึ้น

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการคำนวณปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวของระบบลำเลียงแสงทั้ง 5 ระบบลำเลียงแสงได้แก่ TXAS, HXAS, SWAXS, GIXRD/TRXRF และ HRXRD/MX โดยมีค่าโหลดภาระความร้อนสูงสุดที่ค่ากระแสอิเล็กตรอน 400 มิลลิแอมแปร์ ตก ณ ตำแหน่งผลึกตัวแรกของระบบคัดเลือกพลังงานแบบผลึกคู่ อยู่ที่ประมาณ 163.54, 128.05, 121.29, 135.45, และ 135.45 วัตต์ ตามลำดับ

โดยสามารถคิดปริมาณการใช้ไนโตรเจนเหลวสำหรับหล่อเย็นทั้ง 5 ระบบลำเลียงแสง ได้เป็นจำนวน 242,128 ลิตรต่อปี โดยคิดเป็นค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนเงิน 2,009,660 บาทต่อปี

7. กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์

นักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ภายในสถาบันฯ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chumakov, A. I., Sergeev, I., Celse, J. P., Rüffer, R., Lesourd, M., Zhang, L., & Sánchez del Río, M. (2014). Performance of a silicon monochromator under high heat load. *Synchrotron Radiation*, 21(2), 315-324.
- [2] Ohashi, H. (2014). Optics Engineering for x-ray beamline design - What is Cheiron School? [PowerPoint slides]. Presented at Cheiron School 2014, SPring-8.
- [3] Rodriguez, J., Chandorkar, S. A., Glaze, G. M., Gerrard, D. D., Chen, Y., Heinz, D. B., ... & Kenny, T. W. (2018). Direct detection of anchor damping in MEMS tuning fork resonators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 27(5), 800-809.
- [4] Silva, M. S., Geraldes, R. R., Gilmour, A., Ruijl, T. A. M., & Schneider, R. M. (2016). Thermal Management and Crystal Clamping Concepts for the New High-Dynamics DCM for Sirius. *Proc. MEDSI'16*, 194-197.
- [5] Fan, Y., Qin, H., Zhu, W., Jia, W., Liu, Y., Wang, J., & Li, Z. (2020). Angular stability measurement of a cryocooled double-crystal monochromator at SSRF. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 983, 164636.
- [6] Liang, H., Cao, G., Gao, L., Jiang, Y., Sheng, W., Tang, S., & Zhou, A. (2018, December). A high heat load double crystal monochromator and its cryo cooling system for HEPS. In *Mechanical Eng.~ Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI'18), Paris, France, 25-29 June 2018* (pp. 430-434). JACOW Publishing, Geneva, Switzerland.
- [7] Kristiansen, P., Johansson, U., Ursby, T., & Jensen, B. N. (2016). Vibrational stability of a cryocooled horizontal double-crystal monochromator. *Synchrotron Radiation*, 23(5), 1076-1081.
- [8] Li, A., Gong, X., Bai, Y., Lu, Q., Li, S., Zhang, W., & Chai, K. (2024). Research on the Mechanism of Flow-Induced Vibration in the Cooling System of a Double Crystal Monochromator. *Applied Sciences*, 14(7), 2767.
- [9] https://www.jjxray.dk/product/white-beam-slits-up-to-4000w/?utm_source=chatgpt.com
- [10] Benson, C., Jaski, Y., Maser, J., Powers, T., Schmidt, O., & Rossi, E. (2007, January). White Beam Slits and Pink Beam Slits for the Hard X-ray Nanoprobe Beamline at the Advanced Photon Source. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 879, No. 1, pp. 1061-1064). American Institute of Physics.

- [11] Ciocci, F., Dattoli, G., Renieri, A., & Torre, A. (2000). Insertion devices for synchrotron radiation and free electron laser (Vol. 6). World Scientific.
- [12] Peatman, W. B. (2018). Gratings, mirrors and slits: beamline design for soft X-ray synchrotron radiation sources. Routledge.
- [13] Haruhiko, O. (2012). Optic Engineering for x-ray beamline design. Cheiron School 2012
- [14] Altissimo, M. (2024). Beamline design. School on Synchrotron Light Source and Their Applications.
- [15] Pury, P. A. (n.d.). Modern Physics: Leaflet p6323_e. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FAMAF). Retrieved July 3, 2025, from https://www.famaf.unc.edu.ar/~pury/famaf.gui/modern1/leaflets/p6323_e.pdf
- [16] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) (2025). การจัดซื้อไนโตรเจนเหลว (Liquid Nitrogen for Bulk) แบบราคาคงที่ไม่จำกัดปริมาณ. บก.๐๖. เลขที่ ๖/๒๕๖๘.
- [17] <https://technifab.com/cryogenic-liquid-flow/>
- [18] <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
- [19] [Heat leak comparison between foam insulation and vacuum jacketed pipe](#)
- [20] Flynn, T. (2004). *Cryogenic engineering, revised and expanded*. CRC Press.
- [21] Yao, J., Lu, X., Xie, Y., Wang, Q., & Liu, X. (2024). A Liquid Nitrogen Cooling Circulation Unit: Its Design and a Performance Study. *Machines*, 12(4), 271.