



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-2026-092
ชื่อเรื่อง Title	การวิเคราะห์และออกแบบระบบระบายความร้อนของ Double Multilayer Monochromator สำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนพลังงาน 3 GeV
ชื่อฝ่าย Department	ฝ่ายระบบลำแสงแสง
วันที่เผยแพร่ Release date	1 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 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	การเขียนแบบ, การวิเคราะห์ทางความร้อน และเขียนรายงาน
ดร. ขนรรค์ เอื้อรักสกุล	ออกแบบการทดลอง ปรีกษาประสานกับผู้เชี่ยวชาญ และ ตรวจทานรายงาน
ดร. พัฒน์ โพธิ์ทองคำ	ปรีกษา และตรวจทานรายงาน
ดร. รัชฎาภรณ์ ทวีทรัพย์เรืองเนตร	ปรีกษาคำนวณค่าความหนาแน่นกำลัง (power density)
นายเดชมงคล แก้วสุวรรณ	คำนวณค่าความหนาแน่นกำลัง (power density)

บทคัดย่อ

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่องานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงทำให้มีการต่อยอดสู่การออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อยกระดับศักยภาพของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน สู่ระดับพลังงาน 3 GeV ด้วยระดับพลังงานที่สูงขึ้นจาก 1.2 GeV เป็น 3 GeV นักวิจัยและวิศวกรจึงมีความตระหนักถึงความร้อนที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่รับพลังงานจากแสงซินโครตรอนอาจสร้างความเสียหายแก่เครื่องมือและอุปกรณ์ได้ Double Multilayer Monochromator (DMM) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนที่มีหน้าที่เลือกพลังงานและควบคุมลำแสง ความร้อนที่ DMM ดูดซับส่งผลให้เกิด การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ ซึ่งนำไปสู่ การบิดเบี้ยวของพื้นผิวผลึก (surface slope error) และ ความเค้นทางความร้อน (thermal stress) ที่อาจทำให้อุปกรณ์เสียหายและลดประสิทธิภาพในการผลิตลำแสง X-ray คุณภาพสูง การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV สำหรับระบบลำเลียงแสง X-ray Microtomography (XMCT) beamline ได้สร้างแบบจำลอง DMM 3 แบบ

- แบบที่ 1: กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
- แบบที่ 2: กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง DMM
- แบบที่ 3: กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีการระบายความร้อนออกด้านข้างของกระจกด้วยการประกบแท่งทองแดงที่มีช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน (bar cooling)

ผลการวิจัยยืนยันว่าระบบระบายความร้อน ทั้งแบบ eutectic cooling และ bar cooling ด้วยน้ำ สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดและการเสียรูปเชิงความร้อนใน DMM ได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ DMM ที่ไม่มีระบบระบายความร้อน โดย แบบที่ 2 (eutectic cooling) ให้ค่าการเสียรูปเชิงความร้อนต่ำที่สุด การศึกษานี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีคุณค่าในการ ปรับปรุงการออกแบบ DMM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และความทนทาน ภายใต้สภาวะความร้อนสูง ซึ่งจะช่วยให้ DMM สามารถผลิตลำแสง X-ray ที่มีคุณภาพสูงและเสถียรสำหรับการใช้งานทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ

คำสำคัญ Keyword: Double Multilayer Monochromator ,Thermal Deformation, Thermal Stress

1. บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย [1-6]

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนของไทยที่ใช้ในปัจจุบัน คือ เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam Photon Source) เป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนขนาดพลังงาน 1.2 GeV แสงซินโครตรอนมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่องานวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ดังนั้นทำให้มีการต่อยอดสู่การออกแบบและพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อสร้างเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องที่ 2 มีระดับพลังงาน 3 GeV ซึ่งระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องแรก นักวิจัยและวิศวกรจึงมีความตระหนักถึงความร้อนที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต้องรับพลังงานจากแสงซินโครตรอนซึ่งอาจจะสร้างความเสียหายแก่เครื่องมือและอุปกรณ์ได้

Double Multilayer Monochromator (DMM) เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบลำเลียงแสงเอกซ์เรย์ มีหน้าที่ในการเลือกช่วงพลังงานของแสงเอกซ์เรย์ที่ต้องการสำหรับการทดลองต่างๆ เช่น การกระเจิงของแสงเอกซ์เรย์มุมเล็ก (Small Angle X-ray Scattering - SAXS) [1] หรือการศึกษาโครงสร้างของวัสดุ [2] DMM โดยทั่วไปประกอบด้วยผลึกหลายชั้นสองชั้นที่ทำงานร่วมกันอย่างแม่นยำเพื่อคัดเลือกลำแสงเอกซ์เรย์ที่เฉพาะเจาะจง [1] เมื่อลำแสงเอกซ์เรย์ตกกระทบกับผลึกชั้นแรกของ DMM พลังงานส่วนใหญ่จะถูกดูดซับ [1] โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ Bragg angles ต่ำ [3] ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับนี้จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในผลึกและส่วนประกอบอื่นๆ ของ DMM [3] ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิด การขยายตัวทางความร้อนของวัสดุ [1,2] การขยายตัวทางความร้อนนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานของ DMM การเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่างของผลึกเนื่องจากการขยายตัวที่ไม่สม่ำเสมอสามารถนำไปสู่ การบิดเบี้ยวของพื้นผิวผลึก (surface slope error) ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของลำแสงเอกซ์เรย์ที่สะท้อนออกมา เช่น ความเข้มลดลง การเบี่ยงเบน หรือการเปลี่ยนแปลง rocking width. Kim et al. (2013) พบว่า การเสียรูปในทิศทาง z มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของ DMM การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและมุมของผลึก ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการเลือกพลังงานที่ต้องการได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากการทำงานของผลึกทั้งสองชั้นใน DMM ต้องมีความสอดคล้องกันอย่างมาก การเกิดความเค้นทางความร้อน (thermal stress) ภายในผลึกและส่วนประกอบอื่นๆ ซึ่งหากมีค่าสูงเกินไปอาจนำไปสู่ความเสียหายของอุปกรณ์ในระยะยาว เช่น การแตกร้าวหรือการ delamination ของชั้นเคลือบ [4] Cheng et al. (2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ contraintes thermiques (ความเค้นทางความร้อน) ใน multilayer coatings ภายใต้ภาระทางความร้อนสูง. Kravchenko (2008) ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับ thermal deformations in X-ray optics [5] เพื่อรักษาประสิทธิภาพและความแม่นยำของ DMM จึงจำเป็นต้องมีการ จัดการกับความร้อนที่เกิดขึ้นและควบคุมการขยายตัวทางความร้อน วิธีการที่ใช้ในการจัดการความร้อน ได้แก่ การออกแบบระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เช่น การใช้น้ำหล่อเย็น หรือ eutectic cooling, และการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนที่เหมาะสม.[1,3,6] การศึกษาผลกระทบของการขยายตัวทางความร้อนของ DMM มักใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method - FEM หรือ FEA) ในการจำลองและวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ การเสียรูป และความเค้นภายในอุปกรณ์. Kim et al. (2013) ใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการเสียรูปของผลึกแรกใน DMM Tupe (2016) ก็ได้ทำการวิเคราะห์ thermal mechanical finite element analysis เพื่อออกแบบ DMM ที่ Diamond

Light Source. Cheng et al. (2014) ได้เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางความร้อนโดยใช้ multilayer elements และ solid elements

ดังนั้นการทำความเข้าใจถึงกลไกและผลกระทบของการขยายตัวของ DMM เมื่อได้รับแสงเอกซเรย์ และการพัฒนาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการจัดการกับผลกระทบเหล่านี้ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการ รับประกัน ประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และความแม่นยำของการทำงานของระบบลำแสงเอกซเรย์ เพื่อให้ได้ผลการทดลองทาง วิทยาศาสตร์ที่มีคุณภาพสูง การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การกระจายอุณหภูมิ การเสียรูป และความเค้น ภายในอุปกรณ์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) โดยใช้โปรแกรม Ansys เป็นวิธีที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันและสามารถทดสอบซ้ำ ข้อดีคือลดต้นทุนการผลิตแบบจำลองต้นแบบในการศึกษา สะดวกต่อการขึ้นรูป แบบจำลอง และช่วยพัฒนาให้ผลลัพธ์เป็นไปในทางที่ดีขึ้น รายงานวิจัยนี้ เน้นขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รูปแบบพฤติกรรมทางความร้อนวัสดุที่เหมาะสมกับอุปกรณ์และการออกแบบ ตลอดจนการนำมาประยุกต์ใช้ได้ จริง ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการนำไปปรับปรุงในด้านการออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันเหตุ ความเสียหายของอุปกรณ์เมื่อได้รับพลังงานสูงจากแสงซินโครตรอน

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 เพื่อศึกษาประเมินการเสียรูปเชิงความร้อน (thermal deformation) ที่เกิดขึ้นใน DMM ความร้อนที่ไม่ สม่าเสมอสามารถทำให้ส่วนประกอบของ DMM ขยายตัวและเสียรูป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการเลือก พลังงานของลำแสง X-ray และคุณภาพของลำแสง ดังนั้นการศึกษาจึงมีเป้าหมายเพื่อทำนายและลดการเสีย รูปเหล่านี้
- 2.2 เพื่อออกแบบและปรับปรุงระบบระบายความร้อนสำหรับ DMM เพื่อควบคุมอุณหภูมิและลดการเสียรูปเชิง ความร้อน การศึกษามักจะรวมถึงการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนต่างๆ เช่น การใช้ น้ำหล่อเย็น, หรือ eutectic cooling และการออกแบบโครงสร้าง DMM ที่เหมาะสมเพื่อให้การระบายความ ร้อนมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. แนวคิด/ทฤษฎี/หลักการ

การทบทวนวรรณกรรม/งานวิจัย ที่เกี่ยวข้อง

Kim, Seungnam, et al [1] ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงระบบระบายความร้อนของผลึกตัวแรก ใน Double Multilayer Monochromator (DMM) สำหรับลำแสง Small Angle X-ray Scattering (SAXS) ที่ Pohang Light Source (PLS) เนื่องจากผลึกตัวแรกดูดซับความร้อนส่วนใหญ่และอาจเกิดการการเปลี่ยนแปลงขนาด (deformation) ซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของลำแสง นักวิจัยได้ใช้โปรแกรม ANSYS ในการคำนวณการกระจาย อุณหภูมิและการการรูปในผลึกตัวแรกและตัวยึดผลึก การวิเคราะห์นี้พิจารณาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง รูปทรงการสัมผัสระหว่างผลึกและตัวยึด ต่อความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดทางความ ร้อน เนื่องจากผลึกตัวแรกสามารถหมุนได้ระหว่าง 8° ถึง 72° เพื่อสแกนพลังงาน การวิเคราะห์จึงดำเนินการในสาม กรณีที่มุมแบร์ริก 8° , 40° และ 72° ตัวยึดผลึกแรกทำจากทองแดงที่มีความบริสุทธิ์สูงและปราศจากออกซิเจน (OFHC) และมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำติดตั้งที่ด้านล่างของผลึก นักวิจัยยังได้เปลี่ยนแปลงจำนวนระบบระบายความร้อนจาก

2 รู เป็น 8 รู เพื่อลดการสั่นสะเทือนของตัวยึดผลึก และพบว่า** 8 รูให้ผลลัพธ์การสั่นสะเทือนที่ดีกว่า** โดยมีการกระจัดในแนวตั้งรวม $0.18\ \mu\text{m}$ เทียบกับ $0.25\ \mu\text{m}$ สำหรับ 2 รู ภาพที่ 1

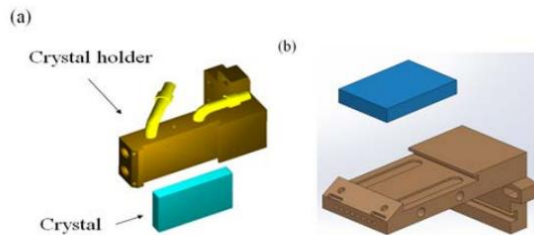


Fig. 2. (Color online) (a) Conceptual design of the first crystal holder and (b) final design of the first crystal holder.

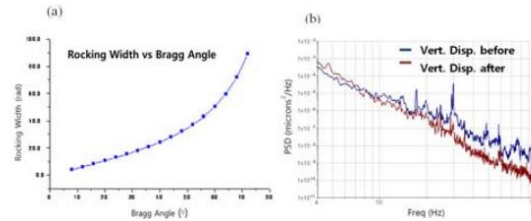
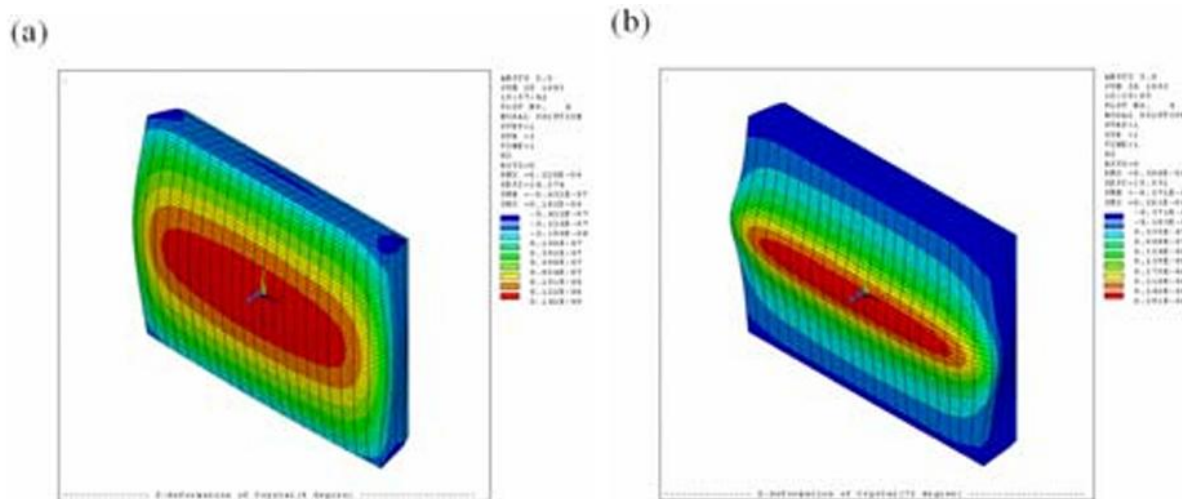


Fig. 3. (Color online) (a) Rocking width vs. Bragg angle and (b) vibration measurement of the crystal holder.

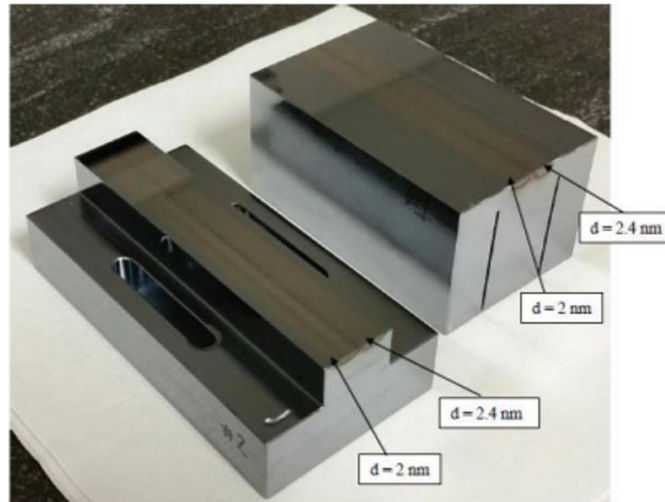
ภาพที่ 1 การออกแบบแนวคิดของตัวยึดผลึก และ ความกว้างของร็อกกิงเทียบกับมุมแบร์ก (Rocking width vs. Bragg angle) และ การวัดการสั่นสะเทือนของตัวยึดผลึก

นอกจากนี้ยังมีการใช้อินเดียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสระหว่างผลึกและตัวยึด การวิเคราะห์ที่ได้มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงขนาดในทิศทาง z ดังแสดงในภาพที่ 2 เนื่องจากมีความสำคัญที่สุดต่อประสิทธิภาพของ DMM นักวิจัยได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและโครงสร้างโดยการเปลี่ยนแปลงรูปทรงการสัมผัส (2D) ระหว่างผลึกและตัวยึด และพบว่าค่า 2D ที่เหมาะสมที่สุดคือ 26 มม. ซึ่งให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวและ rocking width น้อยที่สุด ตามผลลัพธ์นี้ ตัวยึดผลึกได้รับการปรับปรุง



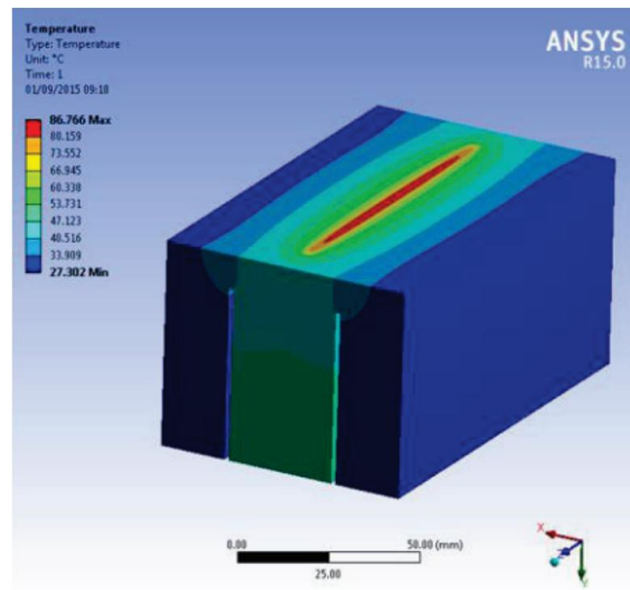
ภาพที่ 2 (a) การเสียรูปในแนวแกน z ของผลึกที่มุม Bragg 8° และ
(b) การเสียรูปในแนวแกน z ของผลึกที่มุม Bragg 72°

ในท้ายที่สุด DMM ที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงแล้วได้ถูกติดตั้งและทดสอบ ที่ลำแสง SAXS การทดสอบเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อนแสดงให้เห็นว่าไม่มีการเลื่อนของ peak การเลี้ยวเบนหรือการบิดเบือนของรูปแบบการกระเจิงอันเนื่องมาจากปัญหาความร้อน ความเข้มของลำแสงสะท้อนที่วัดได้จาก DMM ยังสอดคล้องกับโปรไฟล์ลำแสง ดังนั้น บทความนี้จึงสรุปถึงความสำเร็จในการพัฒนาระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมสำหรับ DMM



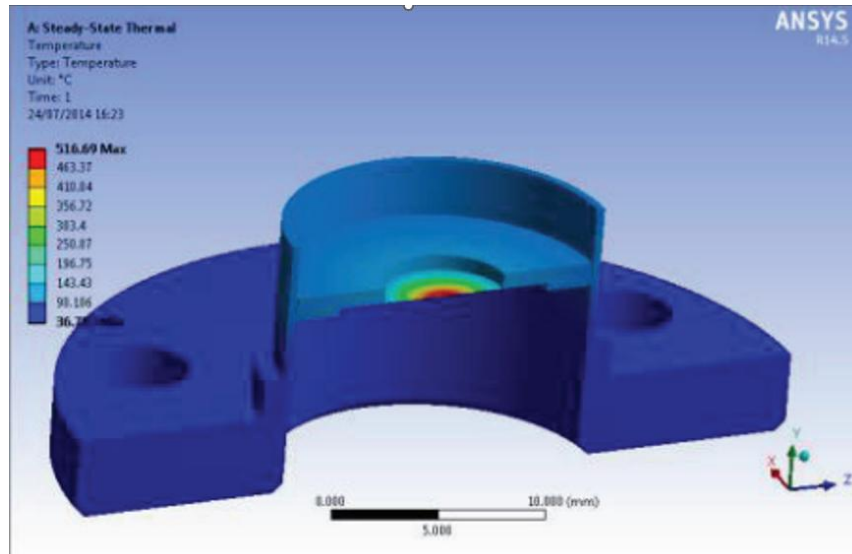
ภาพที่ 3 VMXi DMM Multilayer Optics procured from Rigaku,
1st multilayer on the right shown upside-down

Kelly, Jonathan [3] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบ การสร้าง และการใช้งานของ Double Multilayer Monochromator (DMM) สำหรับลำแสง VMXi ที่ Diamond Light Source ลำแสง VMXi เป็นลำแสงใหม่ที่สร้างขึ้นภายในระบบลำเลียงแสง I02 เดิม และมีแผนที่จะอัพเกรดอุปกรณ์กำเนิดแสง (insertion device - ID) เป็น Cryo-cooled permanent magnet undulator (CPMU) ซึ่งจะเพิ่มฟลักซ์ได้ 3 เท่า DMM ถูกออกแบบและติดตั้งเพื่อให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้นอีก 60 เท่าเมื่อเทียบกับ Si(111) DCM การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์อย่างมากนี้ทำให้ต้องมีการประเมินการจัดการพลังงานภายในลำแสงอย่างละเอียด ความท้าทายหลักในการออกแบบ DMM คือการจัดการความร้อนที่เกิดขึ้นจากลำแสงพลังงานสูงวิธีการระบายความร้อนแบบ **eutectic cooling** โดยใช้อ่างยูเทคติก In/Ga ถูกเลือกใช้เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากความปั่นป่วนของน้ำหล่อเย็นการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ถูกนำมาใช้ในการออกแบบรูปทรงของอุปกรณ์ DMM นี้ถูกออกแบบมาให้ทำงานในช่วงพลังงาน 10 – 25 keV โดยใช้แถบมัลติเลเยอร์สองแถบขนาด 2.0 nm และ 2.4 nm กรณีที่เลวร้ายที่สุดถูกสมมติที่พลังงาน 12 keV ซึ่งเป็นพลังงานที่ ID ให้ฟลักซ์สูงสุด พลังงานที่ถูกดูดกลืนจาก CPMU ในอนาคตที่กระแส 500mA จะอยู่ที่ประมาณ 480W บนพื้นที่ 97.5 x 3.4 มม³ แม้ว่าฟลักซ์ความหนาแน่นนี้จะไม่เป็นปัญหาสำหรับอุปกรณ์ซิลิคอนที่ระบายความร้อนด้วยคริโอ แต่ความกังวลเกี่ยวกับความเสถียรของชั้นเคลือบภายใต้การหดตัวจากความร้อนนำไปสู่การเลือกใช้ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ ในการออกแบบ ได้มีการทำอ่างยูเทคติกสองร่องบนพื้นผิวด้านบนของกระจกเงาชิ้นแรก จุดประสงค์เดิมของการแยกช่องระบายความร้อนโดยการเจาะร่องซิลิคอนคือการจำลองรูปแบบการระบายความร้อนด้านข้างใกล้กับพื้นผิวอบติคัลของ ESRF ร่องเหล่านี้ยังทำหน้าที่เป็นซีโครงเสริมความแข็งแรงที่รักษาอุณหภูมิคงที่ให้กับพื้นผิวอบติคัล



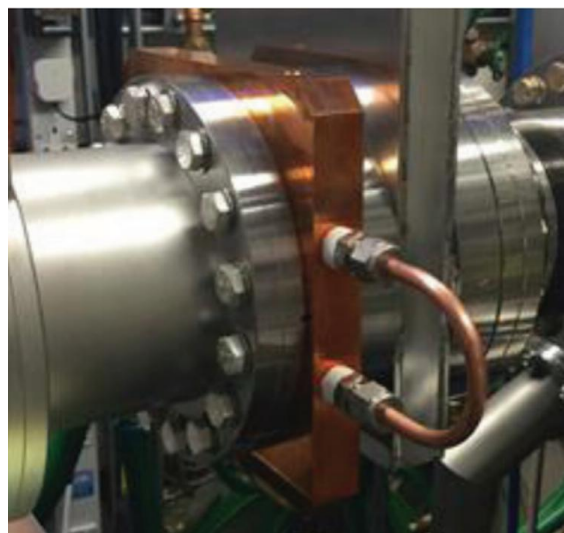
ภาพที่ 4 การกระจายอุณหภูมิของ DMM ที่มีกำลังดูดซับ 480W

การจำลอง FEA ภาพที่ 4 ได้พิจารณาคุณสมบัติความยืดหยุ่นแบบแอนไอโซทรอปิกของซิลิคอน โดยพบว่า ระบายพื้นผิว Si(100) และระบายด้านข้าง Si(010) ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ความลึกของร่องยูเทคติกถูกปรับเปลี่ยนจาก 5 มม. เป็น 10 มม. เนื่องจากการผลิต ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของความชันสัมผัส แต่ทำให้อุปกรณ์มีความแข็งแรงมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (HTC) สำหรับพื้นที่เปียกยูเทคติกถูกเลือกที่ $10,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ผลการวิเคราะห์ FEA พบว่าความลึกของส่วนที่เปียกยูเทคติกที่ต่ำกว่าจะทำให้การบิดเบือนจากความร้อนต่ำกว่า 10 เกณฑ์ การยอมรับสำหรับการศึกษา FEA สำหรับภาระพลังงานสูงสุดที่คาดการณ์ไว้ ได้แก่ อุณหภูมิยูเทคติกต่ำกว่า 100°C และความเค้นในซิลิคอนต่ำกว่า 7 GPa แม้วรัศมีมีความโค้งจะลดลงภายใต้สภาวะพลังงานสูงสุด แต่ลำแสงจะถูกจำกัดให้ผ่านเฉพาะส่วนกลางที่มีความคลาดเคลื่อนของความชันต่ำ นอกจาก DMM แล้ว ยังมีการติดตั้งส่วนประกอบจัดการพลังงานเพิ่มเติม เช่น power filters และ power detector เนื่องจาก DMM ให้ลำแสงที่มีแถบพลังงานกว้างที่มุม Bragg ตื้น ($0.7^\circ - 1.5^\circ$) ออปติคจึงทำหน้าที่เป็นกระจกสะท้อนฮาร์มอนิกพลังงานต่ำด้วย ฮาร์มอนิกแรกพลังงานต่ำมีพลังงานประมาณ 100W ซึ่งอาจทำให้เกิดความร้อน การบิดเบือน และความเสียหายต่ออุปกรณ์ downstream ดังนั้นจึงมีการใช้แผ่นกรองเพชรเพื่อกรองฮาร์มอนิกพลังงานต่ำออก 13 แผ่นกรองเพชรหนา $50 \mu\text{m}$ ถูกออกแบบมาให้ดูดซับพลังงาน 110 W ได้อย่างต่อเนื่อง การวิเคราะห์ FEA ได้ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการออกแบบแผ่นกรองนี้ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การวิเคราะห์ทางความร้อนสำหรับแผ่นกรองเพชรหนา 50 ไมโครเมตร ที่ดูดซับพลังงาน 110 W

Power detector ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจสอบว่าตัวกรองก่อน DMM ยังคงอยู่และไม่เสียหาย และยังป้องกันความเสียหายของตัวตรวจจับในกรณีที่ตัวกรองล้มเหลว อุปกรณ์นี้ติดตั้งอยู่ด้านหน้า End station และใช้แผ่นกรองเพชรหนา 20 μm เคลือบ Ti 100 nm นอกจากนี้ ยังมีกรออกแบบ **water cooled masks** ที่ทำจาก CuCrZr ดังแสดงในรูปที่ 6 เพื่อติดตั้งในตำแหน่งที่อาจมีการสะสมพลังงานสูง เช่น Gas Bremsstrahlung Stop (GBS) และท่อลำเลียง 15 หน้ากากเหล่านี้มีความบางพอที่จะติดตั้งระหว่างส่วนประกอบที่มีอยู่ได้โดยการบีบอัด bellows 15 หน้ากากคงที่สามชิ้นและหน้าฉากเคลื่อนที่/แผ่นเรืองแสงเพชรหนึ่งชิ้นถูกรวมเข้ากับการออกแบบ DMM เพื่อจำกัดมุมตันของรังสีที่ออกมาและอนุญาตให้มีการเปิดรูเพื่อบล็อกลำแสงที่เลี้ยวเบนหรือไม่เลี้ยวเบน



ภาพที่ 6 หน้ากากระบายความร้อนด้วยน้ำทำจากโลหะผสมทองแดง

โดยสรุป DMM ที่ออกแบบภายในองค์กร พร้อมด้วยตัวกรองพลังงานและตัวตรวจจับพลังงาน ได้ถูกสร้าง ติดตั้ง และใช้งานบนลำแสงแล้ว 17 อุปกรณ์เหล่านี้ได้รับการทดสอบเรียบร้อยแล้วด้วยแหล่งกำเนิดแสงและกระแสวิกตอร์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน 17 แม้ว่า จะไม่มีการทดสอบความคลาดเคลื่อนของความชันของออปติกโดยเฉพาะ แต่ DMM ก็ ถูกนำไปใช้ในการแก้ไขโครงสร้างในการทดลองการเลี้ยวเบนด้วยภาวะความร้อนที่ถูกดูดกลืน 91 W โดยวัดฟลักซ์ที่ ตัวอย่างได้ 7.8×10^{13} ph/s และมีความเสถียรของลำแสงที่ดี

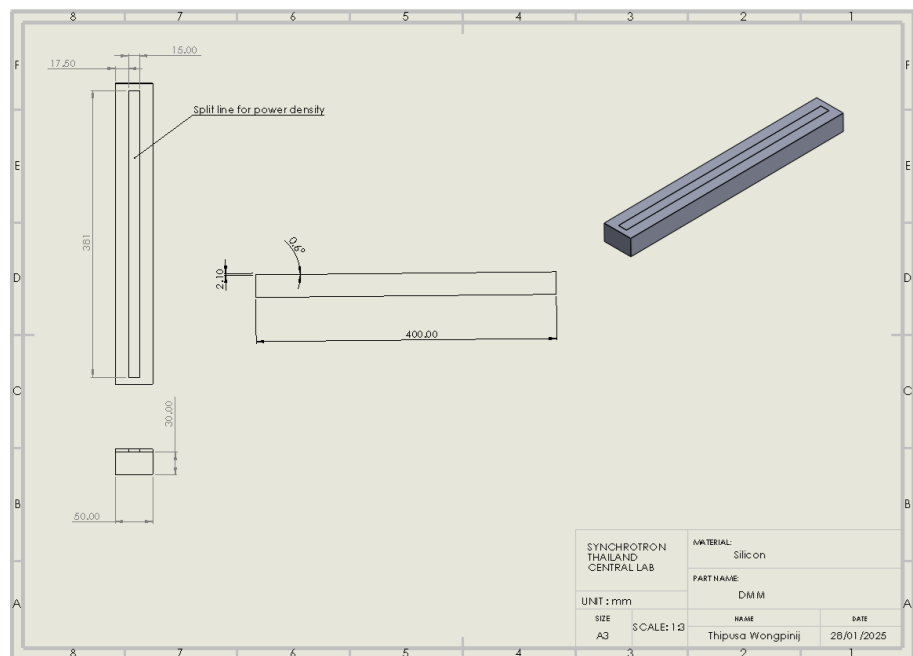
4. วิธีการดำเนินงาน

การดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนและการขยายตัวต่อ Double Multilayer Monochromator (DMM) ที่ได้รับพลังงานจากแสงซินโครตรอนโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis - FEA) มีขั้นตอนหลักดังนี้:

4.1 การสร้างแบบจำลอง 3 แบบ ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2023 แสดงในภาพที่ 7

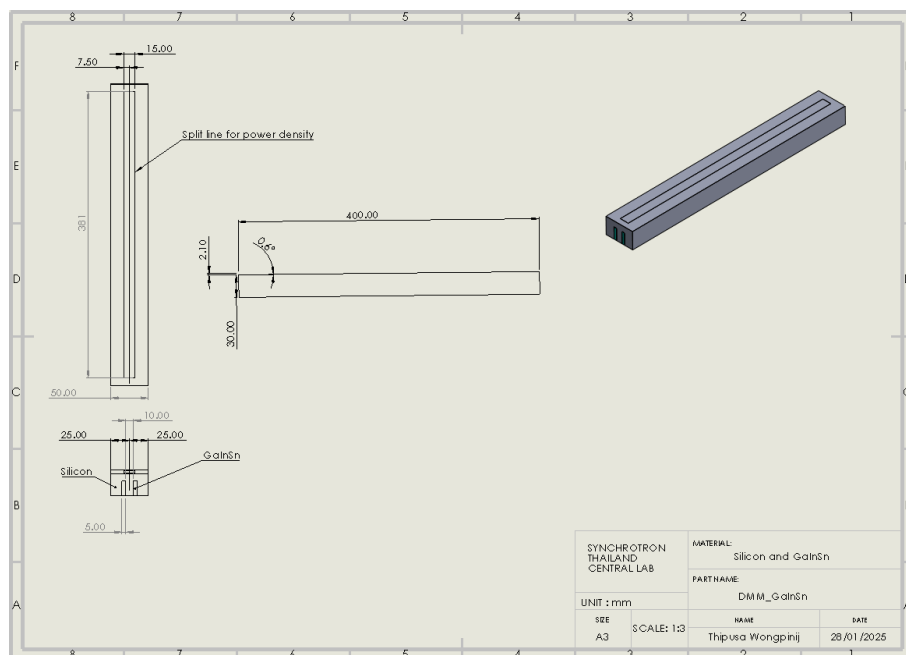
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si



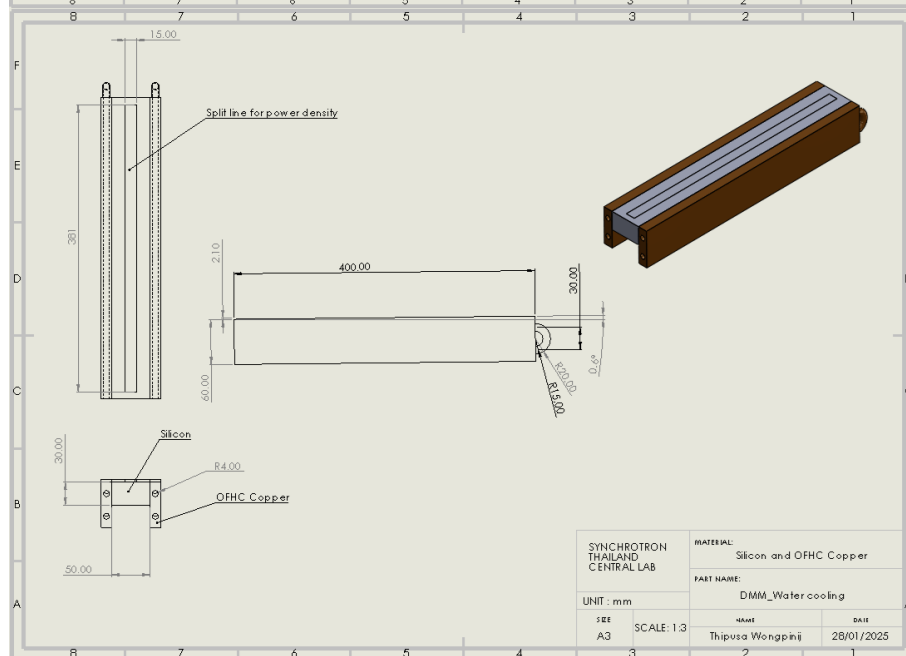
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM



แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบแท่งทองแดงที่มี
ช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน
(bar cooling)



ภาพที่ 7 แบบจำลอง DMM

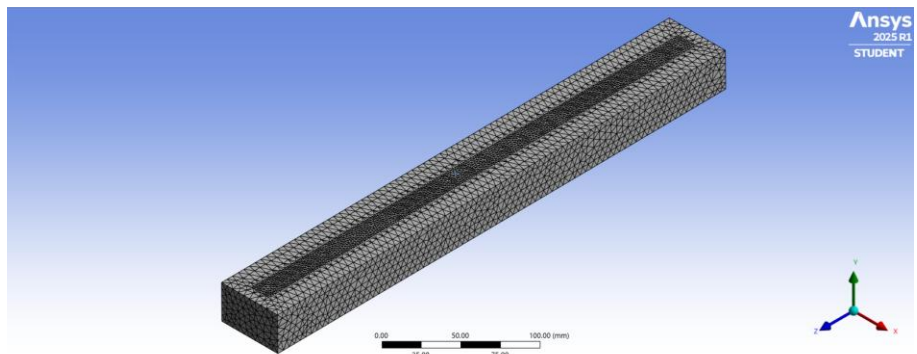
4.2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model)

- กำหนดรูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry): สร้างแบบจำลองทางเรขาคณิตของ DMM ซึ่งรวมถึงส่วนประกอบต่างๆ เช่น ผลึกมัลติเลเยอร์ (multilayer crystal) และฐานรองรับ (crystal holder) รวมถึงอาจพิจารณาถึงขนาดและจำนวนชั้นของมัลติเลเยอร์ และขนาดของฐานรองรับ หรือสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม SolidWorks 2023 ทำการโหลดแบบจำลองเข้าโปรแกรม Ansys

- การแบ่งส่วนย่อย (Meshing): แบ่งแบบจำลองทางเรขาคณิตออกเป็นส่วนย่อย ๆ จำนวนมากที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (elements) การแบ่งส่วนย่อยที่ละเอียดขึ้น (mesh refinement) จะช่วยให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำยิ่งขึ้น การกำหนดขนาด เอลิเมนต์ แสดงดังต่อไปนี้

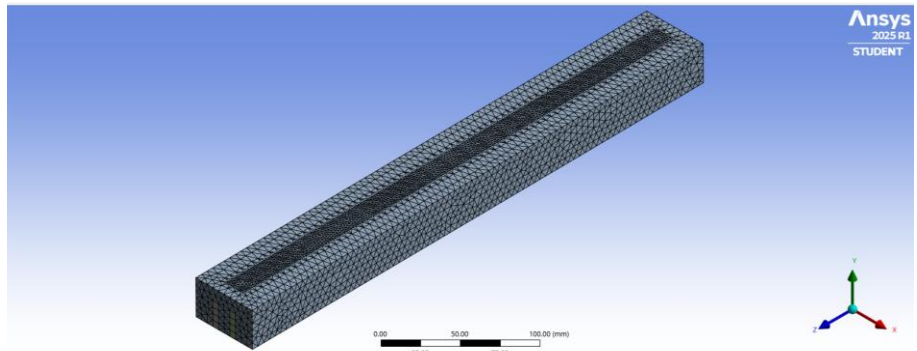
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
(Element size = 5.0 mm)
(Element size of beam footprint area = 2.0 mm)



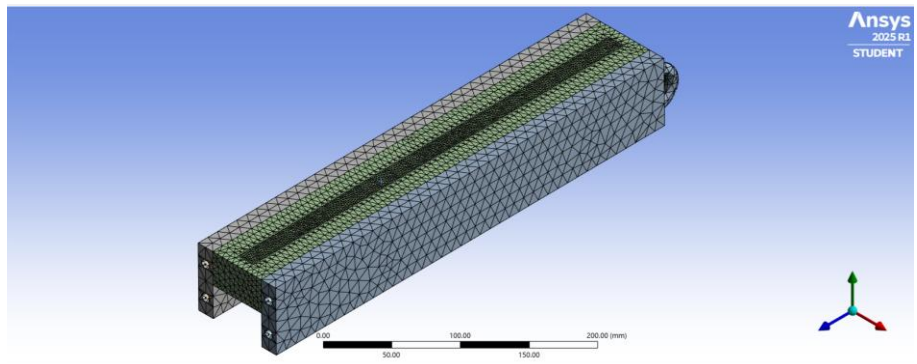
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM (Element size = 5.0 mm)
(Element size of beam footprint area = 2.0 mm)



แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบแท่งทองแดงที่มี
ช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน
(bar cooling) (Element size = 5.0 mm)
(Element size of beam footprint area = 2.0 mm)
(Element size of bar cooling = 10 mm)



ภาพที่ 8 การกำหนดขนาด เอลิเมนต์ (elements)

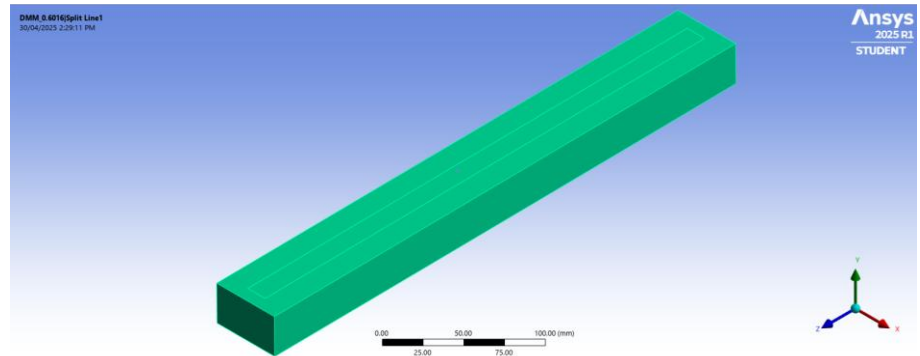
ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ Si, OFHC copper และ GalnSn

คุณสมบัติของวัสดุ	Si	OFHC copper	GalnSn
Density	2330 kg/m ³	8,900 kg/mm ³	ภาคผนวก ข
Tensile strength, Ultimate (MPa)	-	394.38	-
Tensile strength, Yield (MPa)	-	235.00	-
Modulus of elasticity (GPa)		125.00	-
Poisson's ratio		0.31	-
Coefficient of Thermal Expansion (CIE) (°C-1)	แสดงใน ภาคผนวก ข	0.0000177	-
Thermal Conductivity (W/mk)	124 W/m°C	391.00	ภาคผนวก ข
Specific Heat capacity (J/KgK)		390.00	-
thermal expansion α , [x10-6 K-1]			-
Specific Heat Constant Pressure	7.02e+05 mJ/kg°C		365.81 J/kg·K
Viscosity (MPa s)	-	-	ภาคผนวก ข
Melting Temperature (C)			10.5

- กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties): กำหนดคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ใน DMM เช่น ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity), สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (coefficient of thermal expansion - CTE), โมดูลัสยืดหยุ่น (Young's modulus), และอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) โดยคุณสมบัติของฟิล์มบาง (thin film) ในชั้นมัลติเลเยอร์อาจแตกต่างจากคุณสมบัติของวัสดุ bulk และอาจต้องมีการพิจารณาเป็นพิเศษ บางงานวิจัยอาจใช้คุณสมบัติเฉื่อยของวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (anisotropic material properties) สำหรับการจำลอง

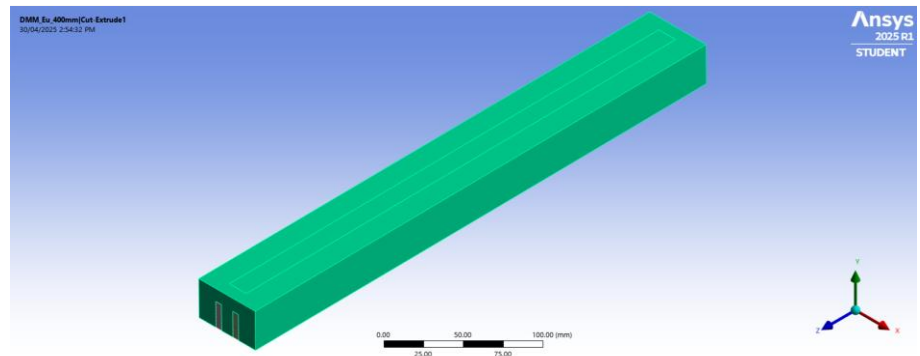
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si



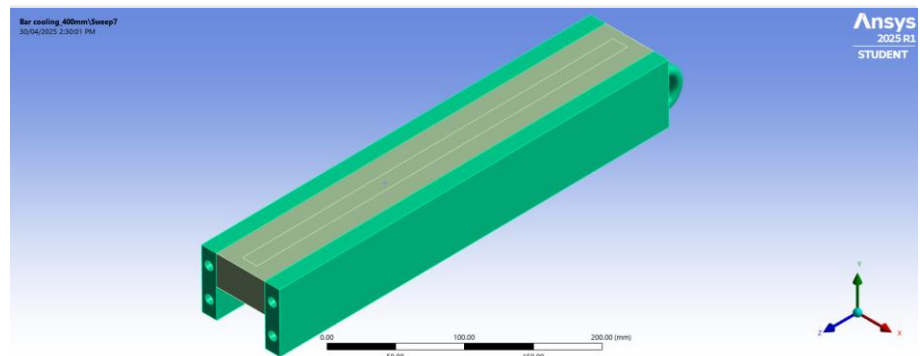
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM



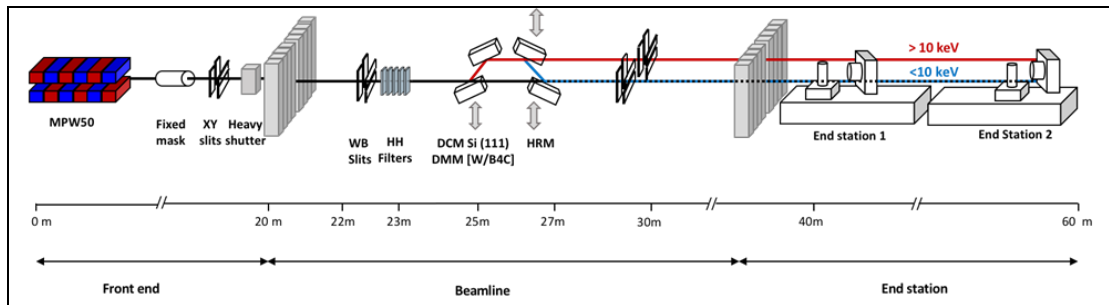
แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบด้วย bar ทำจาก
ทองแดงที่มีช่องให้น้ำไหล
ผ่านภายใน (bar cooling)

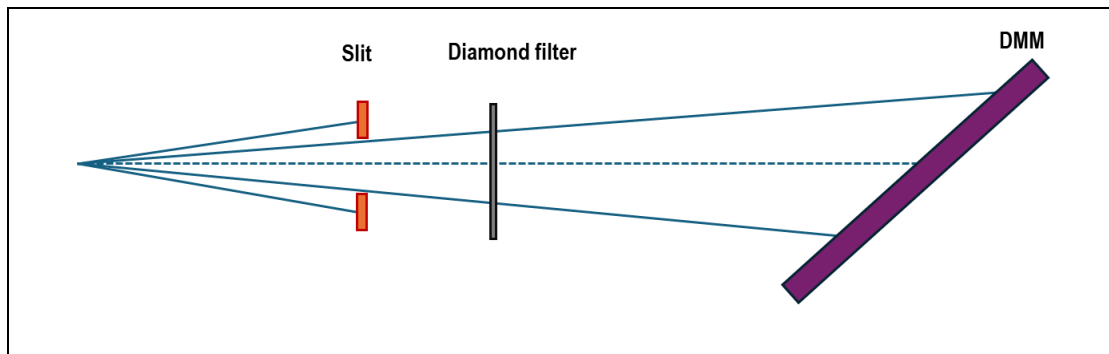


ภาพที่ 9 การกำหนดวัสดุของแบบจ

- ระบบแหล่งความร้อน (Heat Source): กำหนดแหล่งความร้อนจากแสงซินโครตรอนที่ตกกระทบบน DMM ซึ่งอาจกำหนดเป็นค่าความหนาแน่นกำลัง (power density) หรือปริมาณความร้อนที่ดูดกลืน (absorbed power) โดยพิจารณาถึงขนาดของลำแสง (beam footprint) และมุมตกกระทบ (grazing angle หรือ Bragg angle) ซึ่งมีผลต่อพื้นที่ที่แสงตกกระทบบนและความหนาแน่นกำลัง โดยใช้ข้อมูลของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 3 GeV ส่วนระบบลำเลียงแสง X-ray Microtomography (XMCT) beamline การคำนวณความร้อนที่ไหลบน DMM ซึ่งการคำนวณทำหลังแสงผ่านตัวกรองเพชร (CVD Diamond Filter) ของบีมไลน์ XMCT รายละเอียดการคำนวณแสดงที่ ภาคผนวก ก



ภาพที่ 10 แผนผังส่วนประกอบหลักของระบบของระบบลำเลียงแสง XMCT

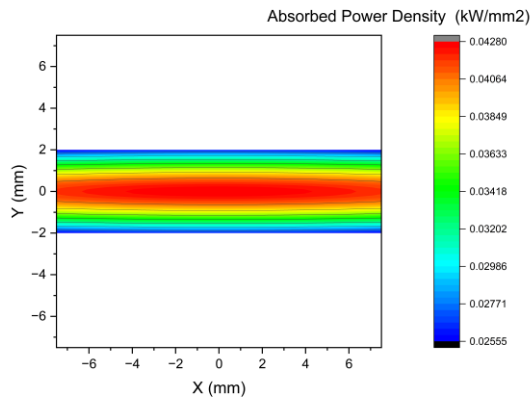


ภาพที่ 11 แบบจำลองของแสงซินโครตรอนบน DMM

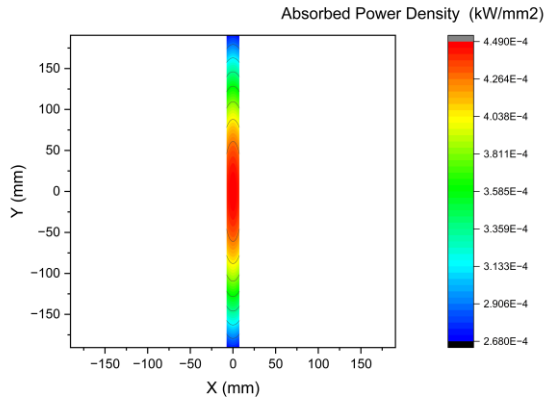
โดยมี Simulation parameters ดังนี้

- Source: IW50 in-vacuum wiggler.
- 50 mm period length
- 5.5 mm gap
- Peak field = 2.1 T
- Regular magnetic length = 2.0 m

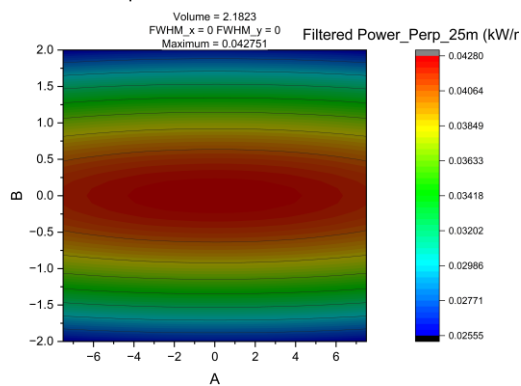
- Ring current = 500 mA
- IWV installed in the ‘long’ straight section



beam footprint ที่ได้จากโปรแกรม SPECTRA



beam footprint บน DMM



Total Power เท่ากับ 2.1823 kW

ภาพที่ 12 ภาพแสดง beam footprint บน DMM และ ค่า Total Power เท่ากับ 2.1823 kW

โดยมี Beamline parameter ดังนี้

- DMM Position : 25 m from source
- Filter Position : 25 m from source
- Incidence angle of multilayer (rad) : 0.0105 (30keV) (spec from DDR)
- Filter : Diamond 0.5 mm of thickness
- Opening angle : ± 0.3 and ± 0.08 mrad (spec from DDR)

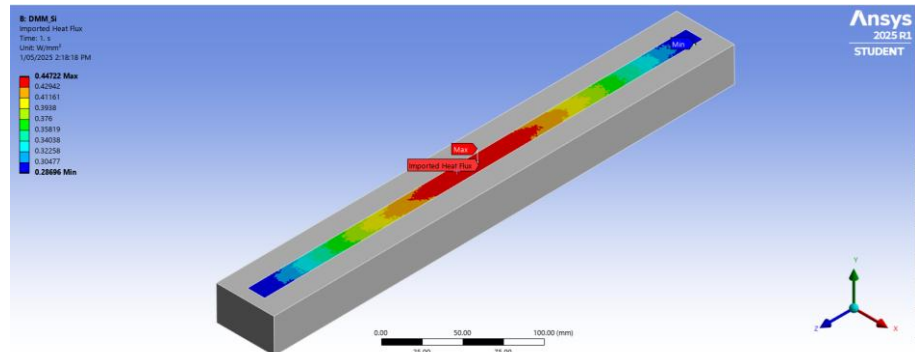
จำลองกระบวนการทางความร้อนของ DMM ด้วยโปรแกรม SPECTRA ได้ beam footprint ขนาด $15 \times 381 \text{ mm}^2$ ดังแสดงในภาพที่ 9 สำหรับงานวิจัยนี้ ค่า Absorbed Power Density สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.490 W/mm^2 และค่า Total Power เท่ากับ 2.1823 kW

4.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions):

- การกำหนดภาระทางความร้อน (Thermal Loads) ลงบน DMM ดังแสดงต่อไปนี้

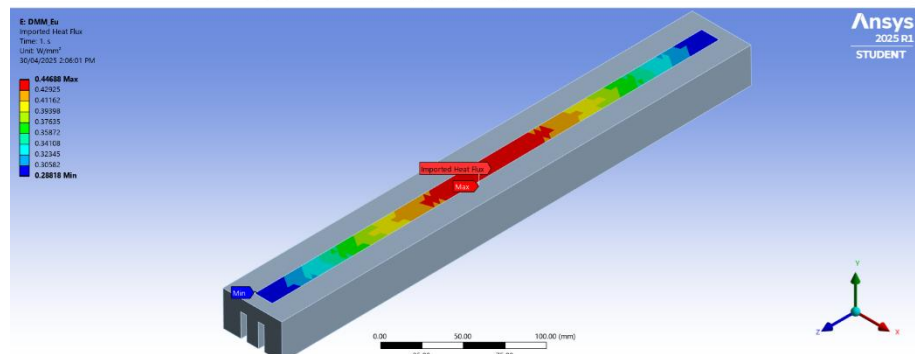
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si



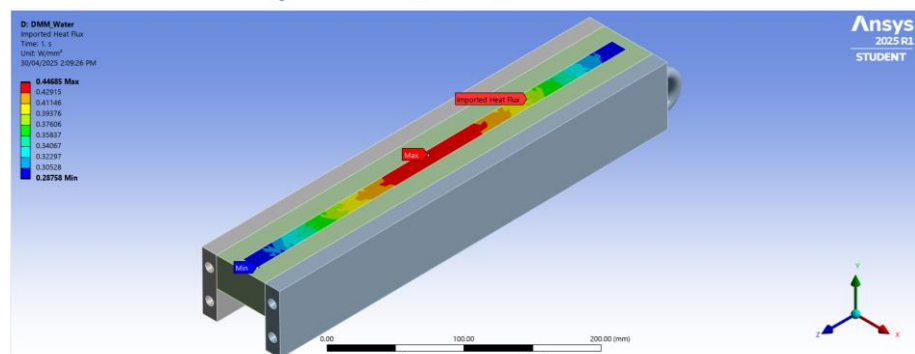
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM



แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบแท่งทองแดงที่มี
ช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน
(bar cooling)



ภาพที่ 13 การกำหนดภาระทางความร้อน (Thermal Loads) ลงบน DMM

- การระบายความร้อน (Cooling): กำหนดวิธีการระบายความร้อนของ DMM เช่น การระบายความร้อนด้วยน้ำ (water cooling) โดยอาจกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective coefficient) หรือการระบายความร้อนด้วยไนโตรเจนเหลว (liquid-nitrogen cooling) การออกแบบระบบระบายความร้อนที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ รวมถึงการใช้สารยูเทกติก (eutectic alloy) เพื่อการระบายความร้อนที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนดการระบายความร้อน แสดงดังต่อไปนี้

แบบที่ 1 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective coefficient): แบบ Stagnant Air simplified case ($5.0 \times 10^{-6} \text{ W/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) แต่ความเป็นจริง ในระบบไม่มี Air แต่ต้องใส่ให้ครบเงื่อนไขจึงจะ Sim ได้ Coefficient Type : 25°C

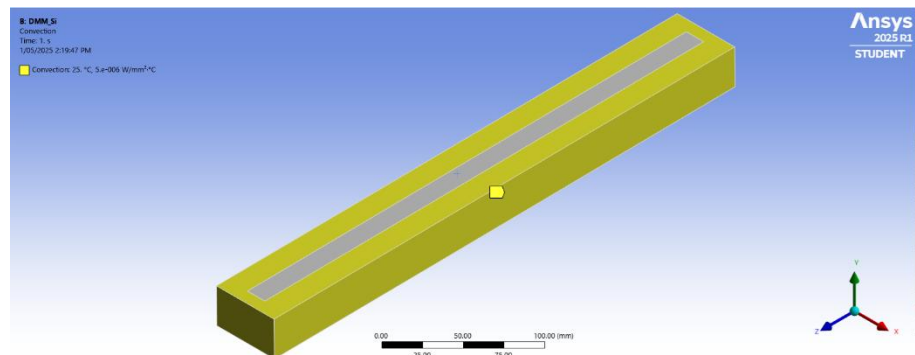
แบบที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของพื้นที่เปียกด้วยสารยูเทกติก (eutectic wetted area heat transfer coefficient หรือ HTC) ที่ $10,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ [3]

Coefficient Type : 25°C

แบบที่ 3 การระบายความร้อนด้วยน้ำ (water cooling) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของพื้นที่เปียกด้วยน้ำ ที่ $10118.59 \text{ W/m}^2\text{K}$ ที่ 25°C

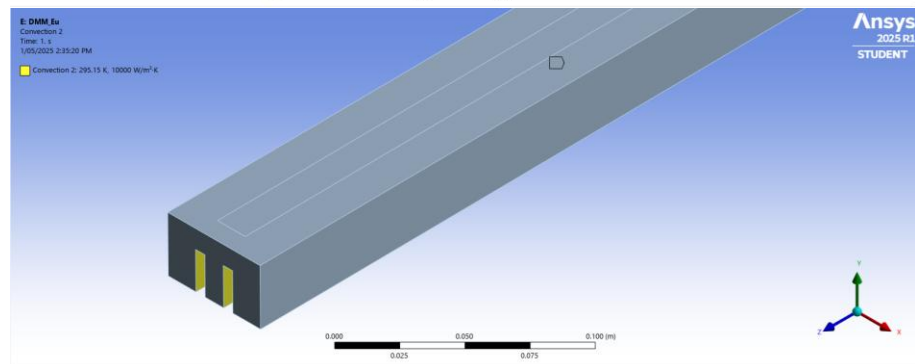
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si



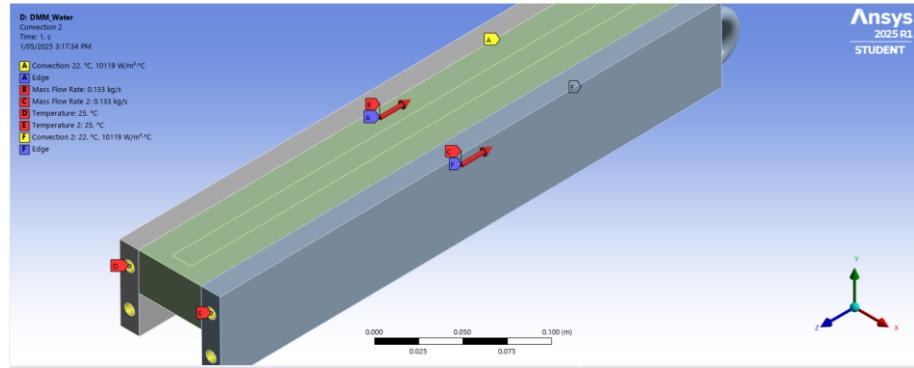
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทกติกด้านล่าง DMM



แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบแท่งทองแดงที่มี
ช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน
(bar cooling)



ภาพที่ 14 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convective coefficient) ของ DMM

- การกำหนดเงื่อนไขและคุณสมบัติของน้ำในระบบหล่อเย็นที่ใช้ในแบบที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกลของน้ำในระบบหล่อเย็น

คุณสมบัติ	
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ	8 มิลลิเมตร
พื้นที่หน้าตัด (Cross-section area) ($A = \pi r^2$)	0.00005024 m ²
ความหนาแน่นของน้ำ	997.1, kg/m ³ ณ 25 องศาเซลเซียส

1. การวัดการไหลเชิงปริมาตร (Volumn flow measurement) คือ กระบวนการวัดปริมาตรของของไหลที่ไหลผ่านท่อหรือช่องทางการไหลใด ๆ ก็ตาม ในหนึ่งหน่วยเวลา พุดง่าย ๆ ก็คือวัดปริมาตรของไหลที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดในแนวตั้งฉากด้วยความเร็วดังแสดงในสมการที่ 1 โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีค่า อัตราการไหลของน้ำ (Q) คือ 8 ลิตรต่อนาที

$$\begin{aligned}
 Q &= v * A & (1) \\
 V &= Q/A \\
 &= 0.13 \text{ (L/s)} / 0.00005024 \text{ (m}^2\text{)} : \text{Convert L to Cubic Meter (m}^3\text{)} \\
 &= 0.00013 \text{ (m}^3\text{/s)} / 0.00005024 \text{ (m}^2\text{)} : 1\text{L} = 0.001 \text{ m}^3 \\
 &= 2.5876 \text{ (m/s)}
 \end{aligned}$$

ความหมายของตัวแปร

Q = อัตราการไหล (Volumn flow rate), ลิตรต่อวินาที

V = คือความเร็ว (Velocity), เมตรต่อวินาที

A = พื้นที่หน้าตัด (Cross-section area) ($A = \pi r^2$), ตารางเมตร

ตารางที่ 3 แสดงอัตราการไหลของน้ำสำหรับงานวิจัยนี้

อัตราการไหล (Volumn flow rate) (ลิตรต่อวินาที)	ค่าความเร็วการไหล, (เมตรต่อวินาที)	อัตราการไหลเชิงมวล (Kg/s)
0.13	2.5876	0.1296

การวัดการไหลเชิงมวล (Mass flow measurement) คือ การวัดมวลของของไหลที่ไหลผ่านเครื่องมือวัดอย่างต่อเนื่องในหนึ่งช่วงเวลา การคำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate) แสดงในสมการที่ 2 สำหรับซึ่งค่า อัตราการไหลเชิงมวล จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ FEA ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate)} = \sigma VA \quad (2)$$

σ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (997.1, kg/m³) ณ 25 องศาเซลเซียส

V คือ ความเร็วของของน้ำ, เมตรต่อวินาที (2.6539, m/s)

A คือ พื้นที่ของหน้าตัดที่ของเหลวไหลผ่าน, ตารางเมตร (0.00005024, m²)

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate)} = 997.1 \text{ (kg/m}^3\text{)} \times 2.6539 \text{ (m/s)} \times 0.00005024 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\text{อัตราการไหลเชิงมวล (Mass Flow Rate)} = 0.1296 \text{ Kg/s}$$

ซึ่งค่าอัตราการไหลเชิงมวลในตารางที่ 5 จะเป็นค่าเงื่อนไขในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) โดยใช้โปรแกรม Ansys

2. การหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำ [7-11]

การหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (Convection Coefficient) ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (h) คือ ค่าที่แสดงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวนั้น โดยหน่วยวัดเป็น วัตต์ต่อตารางเมตรต่อเคลวิน (W/m²K) ทางผู้วิจัยจึงทำการหาค่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (h) ของน้ำที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

$$\text{สูตร } Nu = (h * D) / k \quad \text{คือสูตรสำหรับจำนวน Nusselt (Nusselt Number)} \quad (3)$$

$$h = (Nu*k)/D \quad \text{คือสูตรสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (h)} \quad (4)$$

โดยที่:

Nu คือ จำนวน Nusselt

h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายความร้อน (W/m²K)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

k คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล (W/mK)

จำนวน Nusselt (Nusselt Number, Nu) เป็นจำนวนไม่มีมิติที่ใช้ในการอธิบายการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของวัตถุกับของไหลที่ไหลผ่านพื้นผิวนั้นจำนวน Nusselt ถูกกำหนดเป็นอัตราส่วนของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction) ต่อการถ่ายเทความร้อนโดยการกระจายความร้อน (Convection)

$$Nu = (\text{การถ่ายเทความร้อนโดยการกระจายความร้อน}) / (\text{การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน})$$

หรือสามารถใช้สูตรอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับจำนวน Nusselt เช่น:

$$\text{สูตรของ Dittus-Boelter: } Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^{0.3} \quad (5)$$

โดยที่:

Re คือ จำนวนเรย์นอลด์ (Reynolds Number)

Pr คือ จำนวน Prandtl (Prandtl Number)

การหาค่า Re (จำนวนเรย์นอลด์) สามารถทำได้โดยใช้สูตรต่อไปนี้:

$$Re = (\rho * v * D) / \mu \quad (6)$$

โดยที่:

Re คือ จำนวนเรย์นอลด์ (Reynolds Number)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m³)

v คือ ความเร็วของของไหล (m/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)

μ คือ ค่าความหนืดของของไหล (Pa-s)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทางความร้อนของน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

^o C	k W/mk	Cp (J/(kg K))	ρ (kg/m ³)	μ (Pa-s)	Re	Pr	Nu	H (W/m ² K)
25	0.612	4180.0	997.1	0.89E-3	23787.00	6.08	132.27	10118.59

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่า การไหลมีค่า $Re > 23000$ ดังนั้นการไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ (Turbulent Flow) การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์เป็นการไหลที่มีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว และมีการไหลที่ไม่สม่ำเสมอ การหาค่า Nu จึงใช้สูตรของ Dittus-Boelter ดังแสดงในสมการที่ 5

ค่า Pr (จำนวน Prandtl) คือปริมาณไร้มิติ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของของไหลในการส่งผ่านโมเมนตัมในของไหลเมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล สูตรที่ใช้ในทางวิศวกรรมของ Pr (จำนวน Prandtl) สามารถทำได้โดยใช้สูตรต่อไปนี้:

$$Pr = (\mu * Cp) / k \quad (7)$$

โดยที่:

Pr คือ จำนวน Prandtl (Prandtl Number)

μ คือ ค่าความหนืดของของไหล (Pa·s)

Cp คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหล (J/kg·K)

k คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล (W/m·K)

ดังนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทได้ดีใน Liquid metals เนื่องจากมีค่า Pr น้อยกว่า 1 และถ่ายเทได้ช้าในน้ำมันเนื่องจากมีค่า Pr มากกว่า

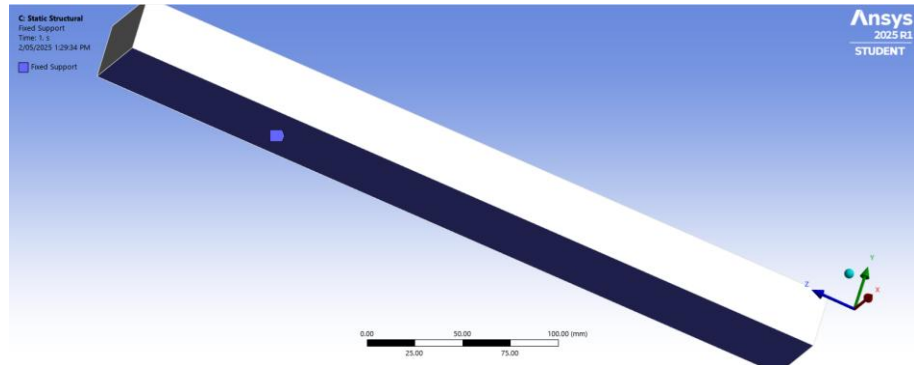
ตารางที่ 5 ช่วงค่าของ Prandtl numbers (Pr) สำหรับของไหลทั่วไป

Fluid	Prandtl numbers (Pr)
Liquid metals	0.004-0.030
Gases	0.7-1.0
Water	1.7-13.7
Light organic fluids	5-50
Oils	50-100,000
Glycerin	2000-100,000

- เงื่อนไขทางโครงสร้าง (Structural Constraints): กำหนดเงื่อนไขทางโครงสร้าง โดยกำหนดพื้นผิวที่มีการยึดตรึง (fixed supports) ของ DMM ทั้ง 3 แสดงดังต่อไปนี้

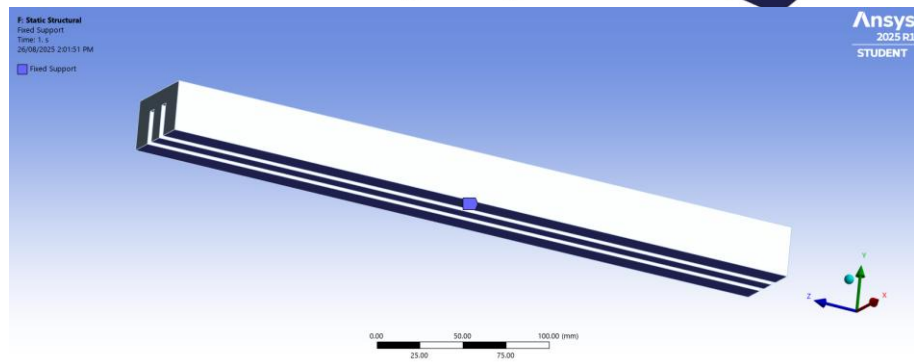
แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si



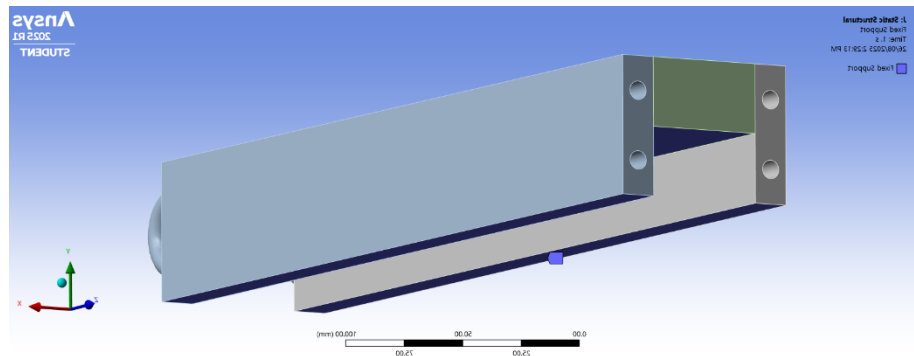
แบบที่ 2

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM



แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อน
ออกด้านข้างของกระจกด้วย
การประกบแท่งทองแดงที่มี
ช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน
(bar cooling)



ภาพที่ 15 การกำหนดพื้นผิวที่มีการยึดตรึง (fixed supports) ของ DMM

5. ผลลัพธ์ และอภิปรายผล

การวิจัยนี้เป็นการนำเสนอถึงผลความร้อนที่ได้จากการจำลอง Double Multilayer Monochromator (DMM) จากข้อมูลของระบบลำแสงแสง XMCT โดยมีการเปรียบเทียบ DMM ทั้ง 3 แบบคือ กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si (แบบที่ 1) กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง DMM (แบบที่ 2) และ กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีการระบายความร้อนออกด้านข้างของกระจกด้วยการประกบแท่งทองแดงที่มีช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน bar cooling (แบบที่ 3) หรับแบบที่ 3 มีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 8 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศา

เซลล์เซียง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) โดยใช้โปรแกรม Ansys ได้ทำการสรุปผลของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดบนอุปกรณ์ DMM ทั้ง 3 แบบ แสดงดังต่อไปนี้

3.1.การวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis):

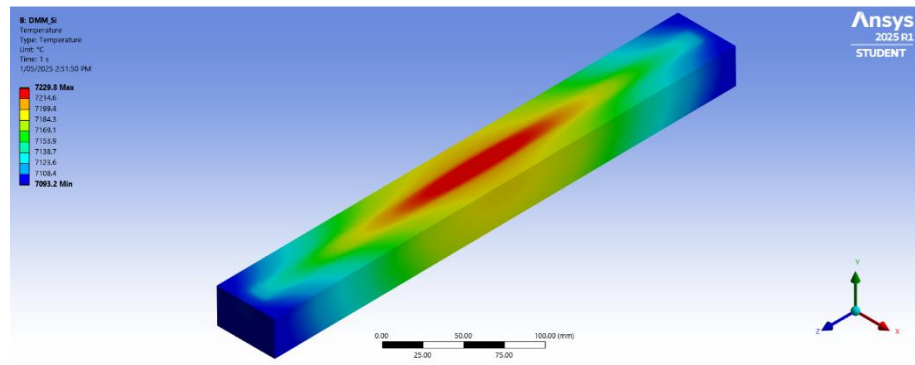
- ใช้ซอฟต์แวร์ FEA (เช่น ANSYS) เพื่อคำนวณการกระจายอุณหภูมิภายใน DMM ภายใต้ภาระทางความร้อนและเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนด โดยอาจพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติวัสดุตามอุณหภูมิ (temperature-dependent material properties)

แบบที่ 1

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si

$T_{Max} = 7259.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{Min} = 7093.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 16 การกระจายอุณหภูมิภายใน DMM แบบที่ 1

แบบที่ 2

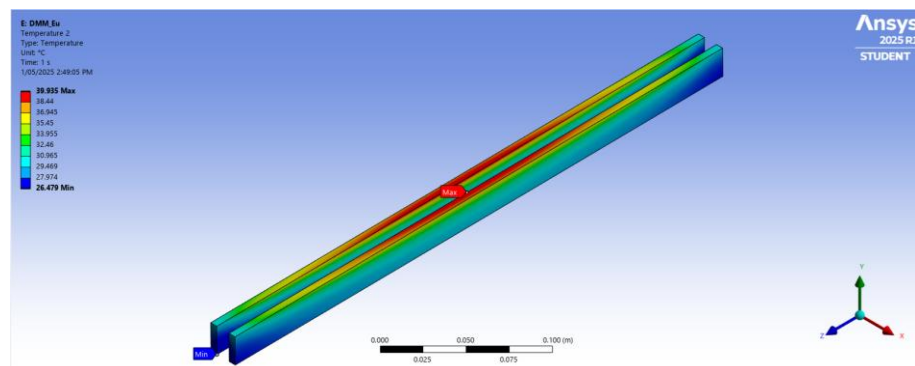
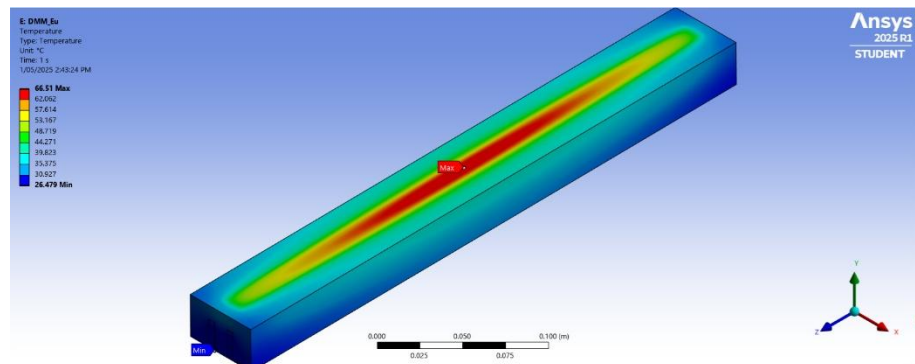
กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง
DMM

$T_{Max} = 66.51 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{Min} = 26.479 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{Max} \text{ of InGaSn} = 39.935 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{Min} \text{ of InGaSn} = 26.479 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 17 การกระจายอุณหภูมิภายใน DMM แบบที่ 2

แบบที่ 3

กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si
และมีการระบายความร้อนออก
ด้านข้างของกระจกด้วยการ
ประกบแท่งทองแดงที่มีช่องให้
น้ำไหลผ่านภายใน (bar
cooling)

การกระจายอุณหภูมิของน้ำหล่อ
เย็น

$$T_{\text{Max}} = 26.949 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Min}} = 25.00 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

การกระจายอุณหภูมิของกระจก
DMM ทำจากวัสดุ Si

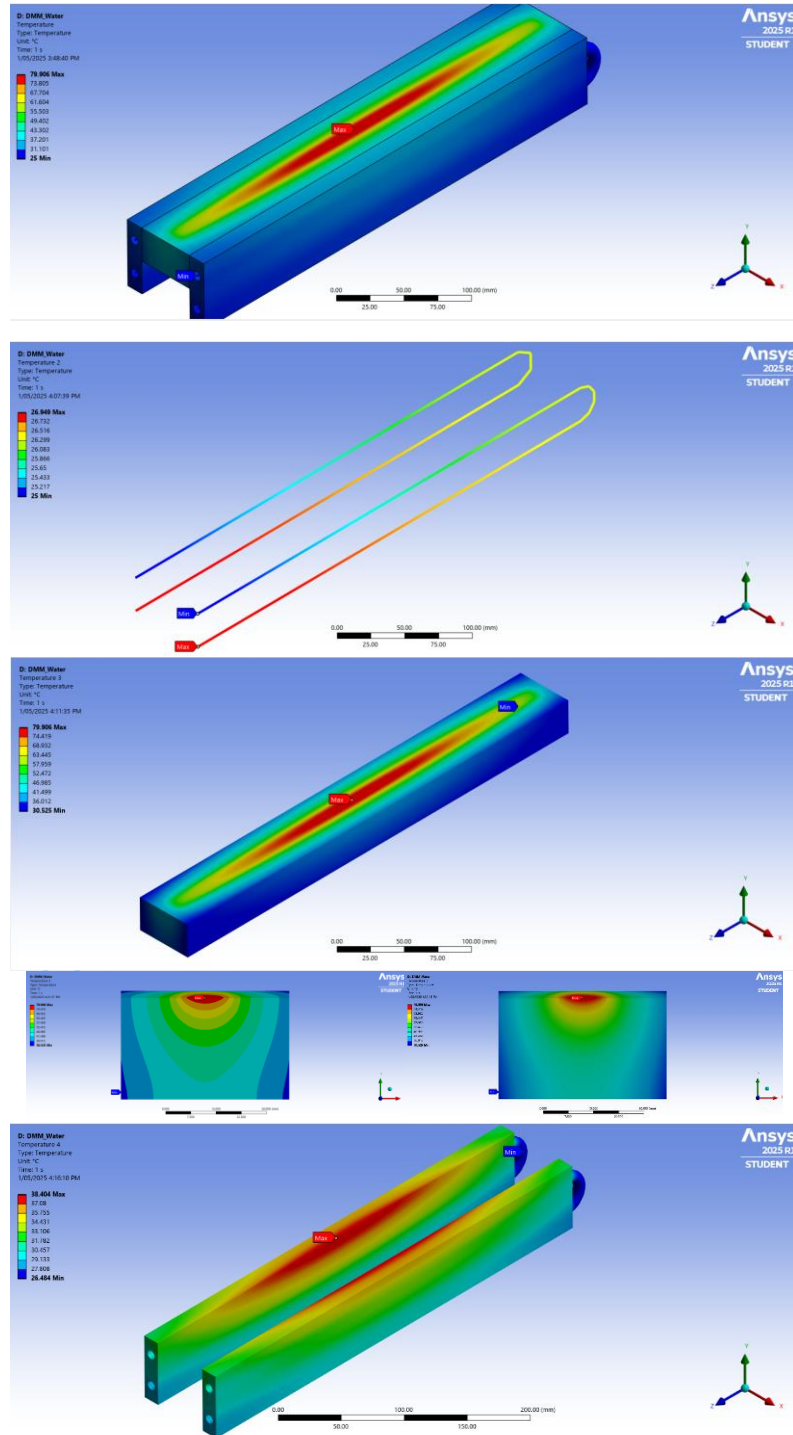
$$T_{\text{Max}} = 79.906 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Min}} = 30.525 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

การกระจายอุณหภูมิของ bar
cooling

$$T_{\text{Max}} = 38.404 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

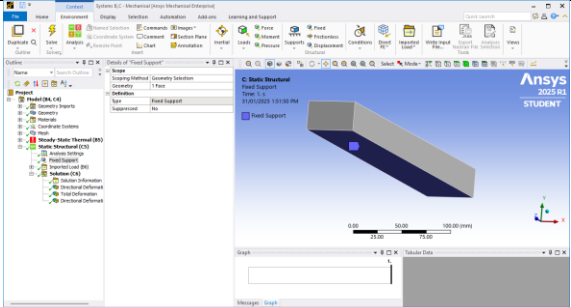
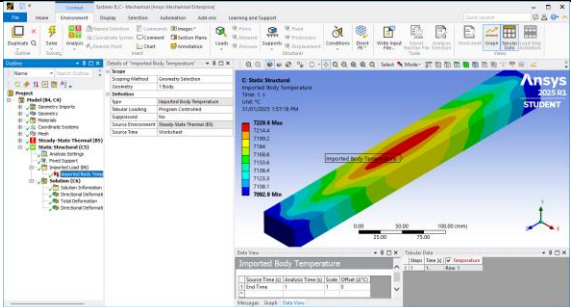
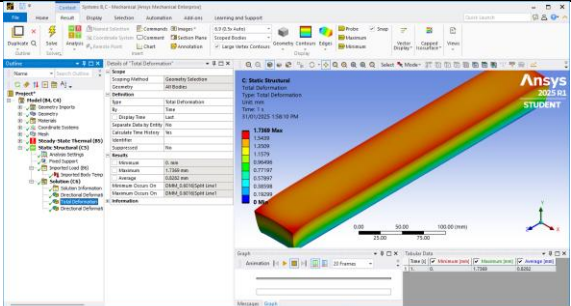
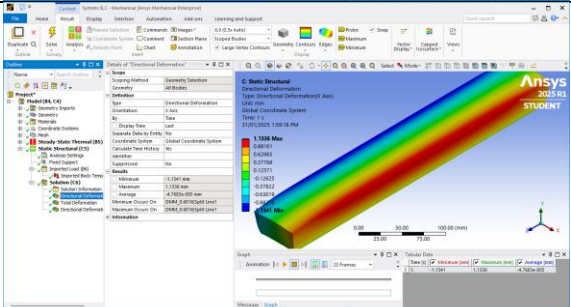
$$T_{\text{Min}} = 26.484 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

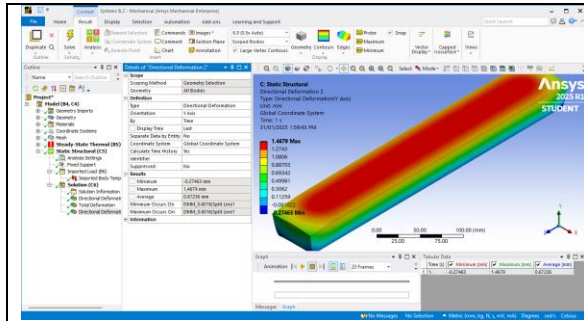


ภาพที่ 18 การกระจายอุณหภูมิภายใน DMM แบบที่ 3

3.2 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural Analysis):

- นำผลลัพธ์การกระจายอุณหภูมิจากการวิเคราะห์ทางความร้อนมาใช้เป็นภาระทางความร้อนในแบบจำลองโครงสร้าง
- คำนวณการเปลี่ยนแปลงรูปทางความร้อน (thermal deformation) เช่น การโก่งตัว (displacement), ความลาดเอียงของพื้นผิว (slope errors), และความเค้นทางความร้อน (thermal stress) ที่เกิดขึ้นใน DMM โดยอาจพิจารณาถึงความเค้นภายใน (intrinsic stress) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตฟิล์มบางด้วย

แบบที่ 1 กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si	Static Structural Analysis
	Fixed Support
	Imported Body Temp from Steady-State Thermal Analysis
	Total deformation Total deformation Max =1.7369 mm Total deformation Min =0 mm
	Directional Deformation (X Axis)

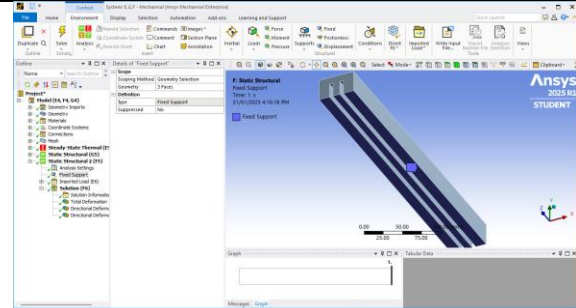


Directional Deformation (Y Axis)

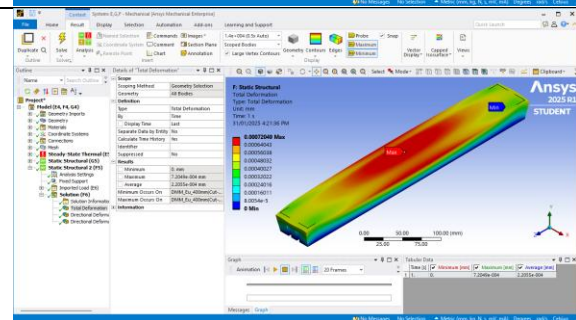
ภาพที่ 19 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural Analysis) ของ DMM แบบที่ 1

แบบที่ 2 กระจาก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีร่องยูเทคติกด้านล่าง DMM

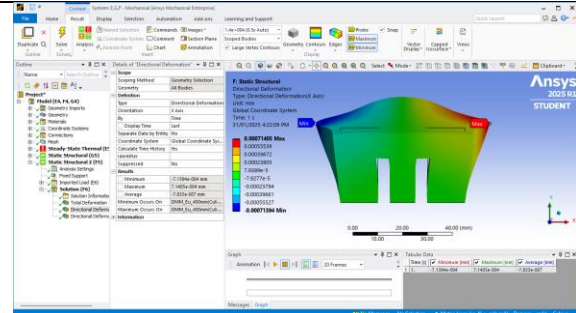
Static Structural Analysis



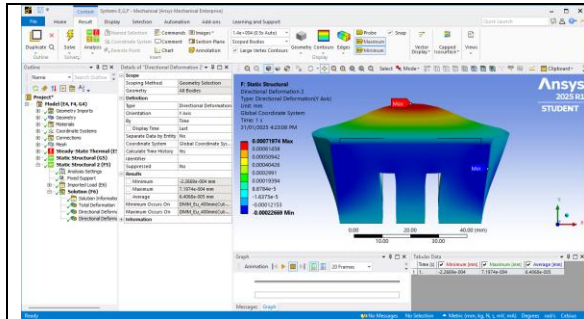
Fixed Support ด้านล่าง



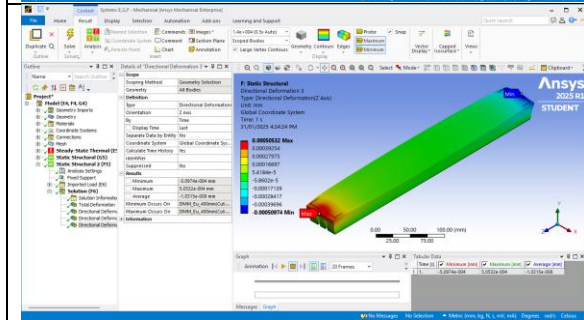
Total deformation
Total deformation Max = 0.00072049 mm
Total deformation Min = 0 mm



Directional Deformation (X Axis)
Directional Deformation (X Axis) $_{Max}$
= 0.00071405 mm
Directional Deformation (X Axis) $_{Min}$ = -0.00071394 mm



Directional Deformation (Y Axis)
 Directional Deformation (Y Axis) $_{Max}$
 =0.00071974 mm
 Directional Deformation (Y Axis) $_{Min}$ =-
 0.00025669 mm

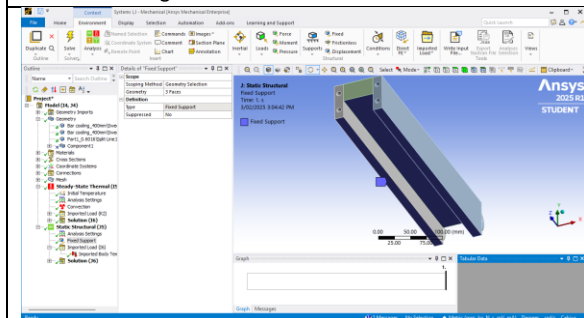


Directional Deformation (Z Axis)
 Directional Deformation (Z Axis) $_{Max}$
 =0.00050532 mm
 Directional Deformation (Z Axis) $_{Min}$ =-
 0.00050974 mm

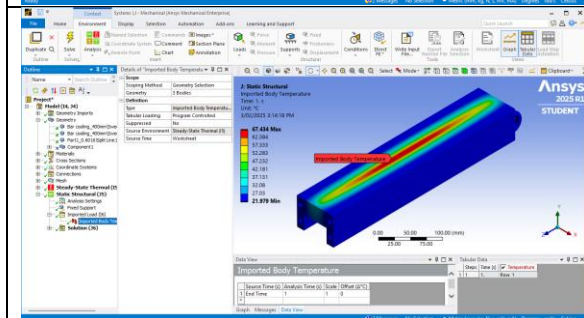
ภาพที่ 20 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural Analysis) ของ DMM แบบที่ 2

แบบที่ 3 กระจก DMM ทำจากวัสดุ Si และมีการระบายความร้อนออกด้านข้างของกระจกด้วยการประกอบแท่งทองแดงที่มีช่องให้น้ำไหลผ่านภายใน (bar cooling)

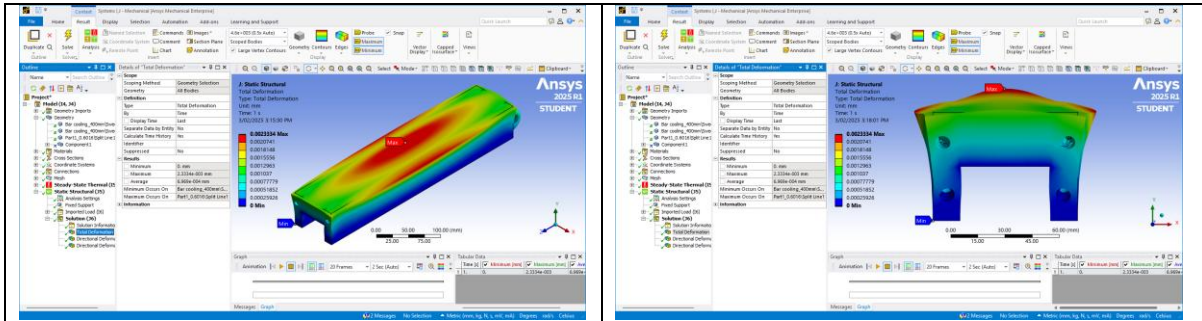
Static Structural Analysis



Fixed Support ด้านล่าง



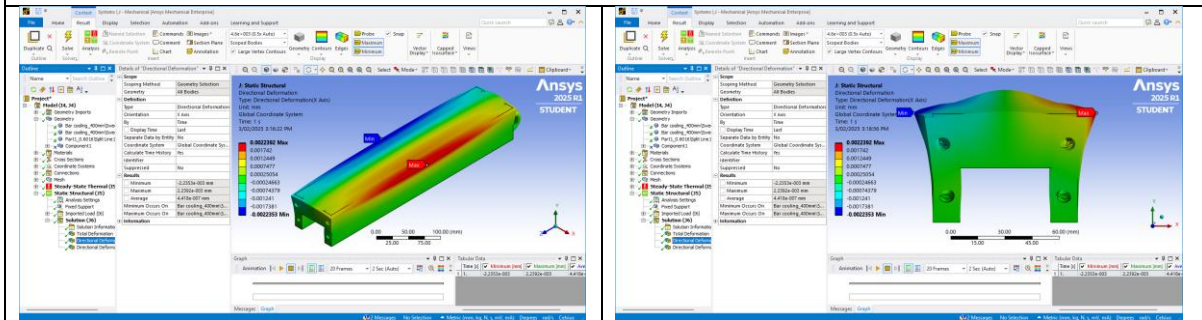
Imported Body Temp from Steady-State Thermal Analysis



Total deformation

Total deformation Max = 0.00233347 mm

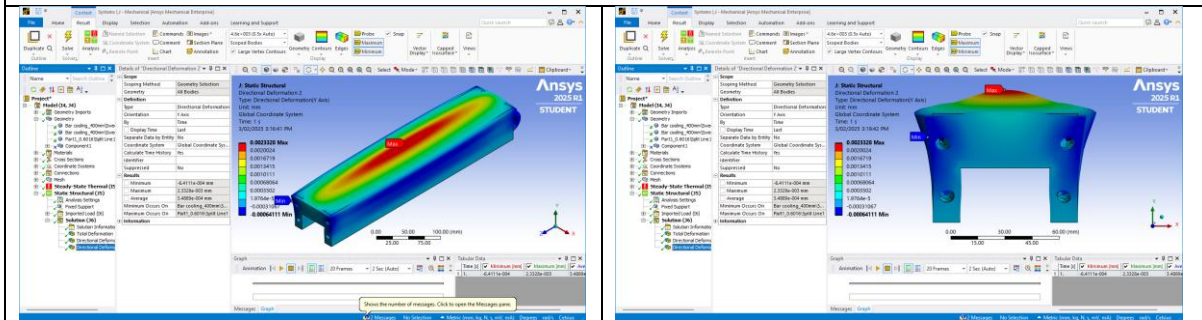
Total deformation Min = 0 mm



Directional Deformation (X Axis)

Directional Deformation (X Axis) Max = 0.0025392 mm

Directional Deformation (X Axis) Min = -0.0025353 mm



Directional Deformation (Y Axis)

Directional Deformation (Y Axis) Max = 0.0023328 mm

Directional Deformation (Y Axis) Min = -0.00064111 mm

ภาพที่ 21 การวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural Analysis) ของ DMM แบบที่ 3

6. สรุปผล

ตารางที่ 6.1 สรุปการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis)

แบบ	วัสดุ/ระบบ	T Max (°C)	T Min (°C)
แบบที่ 1	Si (DMM)	7259.8	7093.2
แบบที่ 2	Si (DMM)	66.51	26.479
แบบที่ 2	InGaSn (Eutectic)	39.935	26.479
แบบที่ 3	น้ำหล่อเย็น	26.949	25.00
แบบที่ 3	Si (DMM)	79.906	30.525
แบบที่ 3	Bar Cooling	38.404	26.484

ตารางที่ 6.2 สรุปการวิเคราะห์ทางโครงสร้าง (Structural Analysis: Total Deformation)

แบบ	รายการ	ค่า (mm)
แบบที่ 1	Total Deformation (Max)	1.7369
แบบที่ 1	Total Deformation (Min)	0
แบบที่ 2	Total Deformation (Max)	0.00072049
แบบที่ 2	Total Deformation (Min)	0
แบบที่ 3	Total Deformation (Max)	0.00233347
แบบที่ 3	Total Deformation (Min)	0

ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการออกแบบ DMM ที่มีระบบระบายความร้อน ไม่ว่าจะเป็นแบบ eutectic cooling (แบบที่ 2) หรือ bar cooling ด้วยน้ำ (แบบที่ 3) สามารถลดอุณหภูมิสูงสุดและการเสียรูปเชิงความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับ DMM ที่ไม่มีระบบระบายความร้อน (แบบที่ 1 ซึ่งมีอุณหภูมิและการเสียรูปสูงมาก) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แบบที่ 2 (eutectic cooling) ให้ค่าการเสียรูปเชิงความร้อนต่ำที่สุด แม้ว่าแบบที่ 3 (bar cooling) จะมีอุณหภูมิสูงสุดบน Si สูงกว่าแบบที่ 2 เล็กน้อย แต่การเสียรูปโดยรวมยังคงต่ำมากเมื่อเทียบกับแบบที่ 1 การศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ในการ ปรับปรุงการออกแบบ DMM เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เสถียรภาพ และความทนทาน ภายใต้สภาวะการทำงานที่ได้รับความร้อนสูงจากแสงซินโครตรอน ซึ่งจะช่วยให้ DMM สามารถผลิตลำแสง X-ray ที่มีคุณภาพสูงและเสถียรสำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับของการศึกษาผลกระทบของความร้อนและการขยายตัวต่อ Double Multilayer Monochromator (DMM) มีดังนี้

- การศึกษาจะช่วยในการประเมินและทำนายการเสียรูปของ DMM เพื่อนำไปสู่การพัฒนาวิธีการลดการเสียรูปเชิงความร้อน เช่น การออกแบบรูปร่างที่เหมาะสม, การเลือกใช้วัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่เหมาะสม, หรือการปรับปรุงระบบระบายความร้อน.

- พัฒนาระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ การศึกษาจะช่วยในการออกแบบและปรับปรุงระบบระบายความร้อนสำหรับ DMM เช่น การใช้น้ำหล่อเย็นหรือนิโตรเจนเหลว เพื่อควบคุมอุณหภูมิและลดการเสียรูปเชิงความร้อนให้เหลือน้อยที่สุด การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนต่างๆ ผ่านการจำลองด้วย Finite Element Analysis (FEA) จะช่วยในการเลือกวิธีการระบายความร้อนที่เหมาะสมที่สุด
- ทำความเข้าใจปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน: การศึกษาเชิงลึกจะช่วยให้เข้าใจถึงกลไกการถ่ายเทความร้อน, การกระจายอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ, และการเกิดความเค้นและความเครียดภายในโครงสร้างของ DMM เมื่อได้รับความร้อน.

โดยสรุป ประโยชน์หลักของการศึกษาผลกระทบของความร้อนและการขยายตัวต่อ DMM คือการพัฒนา DMM ให้มีประสิทธิภาพ เสถียร และทนทานมากขึ้นภายใต้สภาวะการทำงานที่ได้รับความร้อนสูง ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานใน Synchrotron Radiation facilities การศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การออกแบบที่ดีขึ้น การเลือกวัสดุที่เหมาะสม และการพัฒนาระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้ DMM สามารถให้ลำแสง X-ray ที่มีคุณภาพสูงและเสถียรสำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ

7. กลุ่มผู้ใช้ประโยชน์

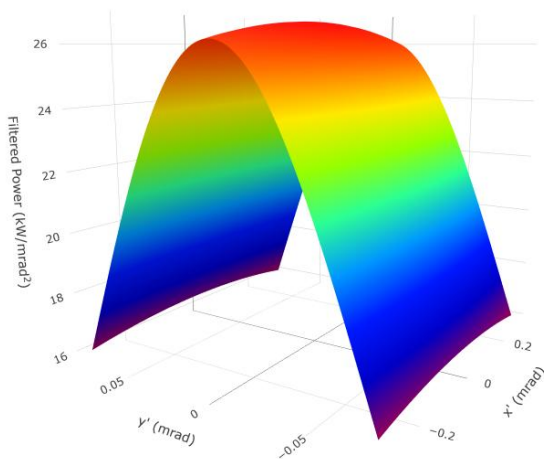
งานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย วิศวกร หน่วยงานซินโครตรอน ภาคอุตสาหกรรม และสถาบันการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kim, Seungnam, et al. (2013). "Optimization of the cooling system in a double multilayer monochromator." Journal of the Korean Physical Society 63: 1724-1727.
- [2] Cheng, Xianchao, et al. (2015). "Thermal stress prediction in mirror and multilayer coatings." Synchrotron Radiation 25.2: 317-327.
- [3] Kelly, Jonathan. (2017). "DMM Thermal Mechanical Design." 9th Edition of the Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation Conference (MEDSI'16), Barcelona, Spain, 11-16 September 2016. JACOW Publishing, Geneva, Switzerland, 2017.
- [4] Cheng, Xianchao. (2014). Thermal stress issues in thin film coatings of X-ray optics under high heat load. Diss. Université de Grenoble.
- [5] Kravchenko, Grygoriy A. (2008). "Crack patterns in thin films and x-ray optics thermal deformations."
- [6] Kazimirov, A., P. Revesz, and Rong Huang. (2008). "Multilayer optics under CHESS A2 wiggler beam." Advances in X-Ray/EUV Optics and Components III. Vol. 7077.
- [7] Bejan, Adrian. Convection heat transfer. John wiley & sons, 2013.
- [8] https://www.engineeringtoolbox.com/water-liquid-gas-thermal-conductivity-temperature-pressure-d_2012.html
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient#Internal_flow,_laminar_flow
- [10] <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/fluid-dynamics/turbulent-flow/>
- [11] <https://www.slideshare.net/slideshow/heat-trans-temperatures-lecture-6-pptx/273028146>

ภาคผนวก ก

How to calculate power loaded on inclined mirror



Authors : Ms.Thipusa Wongpinit, Mr.Dechmongkhon Kaewsuwan

Consultant : Dr.Chanan Euaruksakul, Dr.Pat Potongkam

Version 1.0
January 2025

Beamline and End-station Development Section

SPS-II Technology Development Division

Synchrotron Light Research Institute (organization)

SLRI, Thailand

How to calculate power loaded on inclined mirror

From Total Power

$$\Sigma P_{\text{total}} = P_{\text{density}} \times \text{Area}$$

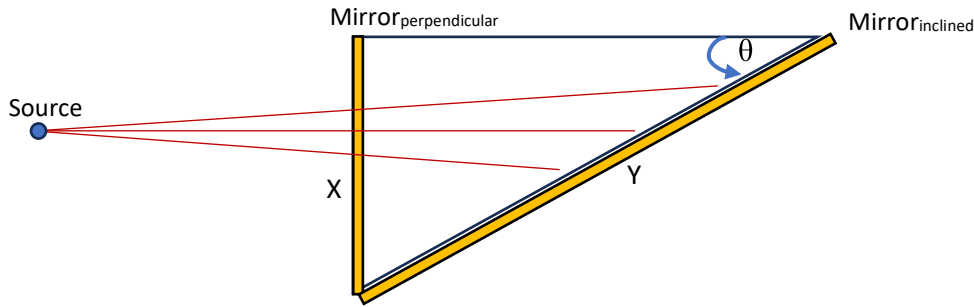
For Perpendicular mirror

$$\Sigma P_{\text{total_Per}} = \Sigma(P_{\text{density}} \times A_{\text{per}})$$

Eq.(1)

For Inclined mirror

the area of the inclined mirror will relate with



$$\sin \theta = \frac{X}{Y}$$

$$Y = \frac{X}{\sin \theta}$$

Where,

X = Perpendicular Area

Y = Inclined Area

θ = Incidence angle of mirror (surface)

We got ; $A_{\text{Inclined}} = \frac{A_{\text{Perpendicular}}}{\sin \theta}$

Eq.(2)

; θ = Incidence angle of mirror (surface)

Therefore, Eq.(1) become

$$\Sigma P_{\text{total_In}} = \Sigma(P_{\text{density}} \times \frac{A_{\text{perpendicular}}}{\sin \theta})$$

Eq.(3)

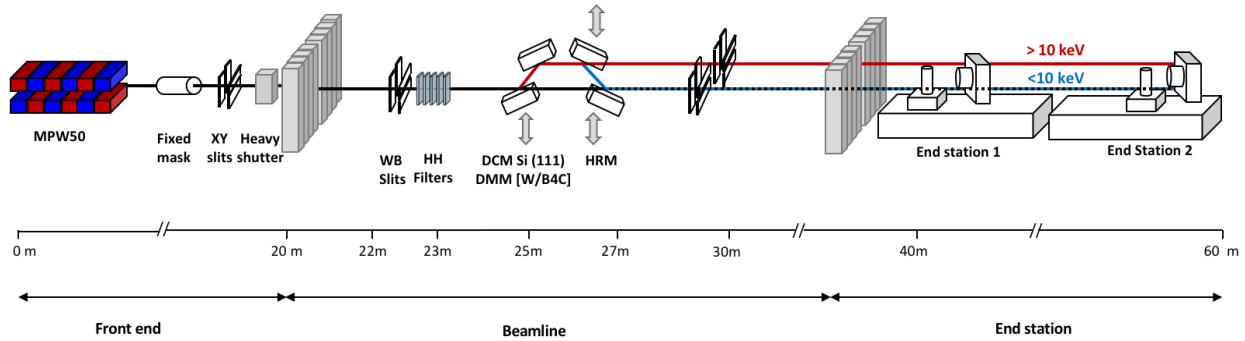
The total power of perpendicular mirror and inclined mirror must be equal, we got

$$\Sigma P_{\text{total_Pen}} = \frac{\Sigma P_{\text{total_In}}}{\sin \theta}$$

$$\Sigma P_{\text{total_In}} = \sin \theta \times \Sigma P_{\text{total_Pen}}$$

Eq.(4)

For example, calculation of heat loaded on multilayer of DMM which allocate after the diamond filter of XMCT beamline

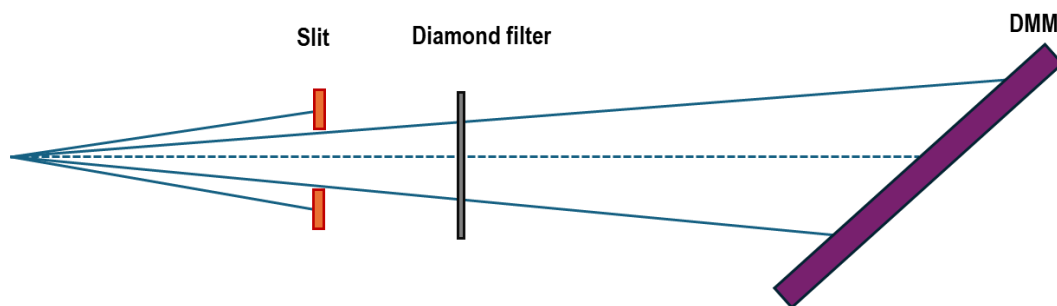


Source parameters

- IVW50 in-vacuum wiggler.
- 50 mm period length
- 5.5 mm gap
- Peak field = 2.1 T
- Regular magnetic length = 2.0 m
- Ring current = 500 mA
- IVW installed in the 'long' straight section

Beamline parameter

- DMM Position : 25 m from source
- Filter Position : 22 m from source
- Incidence angle of multilayer(rad) : 0.0105 (30keV) (spec from DDR)
- Filter : Diamond 0.5 mm of thickness
- Opening angle : ± 0.3 and ± 0.08 mrad (spec from DDR)



Step 1 Calculate and export power profile from “Spectra Program”

SPECTRA 11.2.1 - C:\Users\sln\OneDrive - Synchrotron Light Research Institute\SPS-II\SPS-II

File Select Calculation Run Parameter Set Edit Help

Main Parameters Pre-Processing Post-Processing

Accelerator

Storage Ring

Energy (GeV) 3

Current (mA) 500

Circumference (m) 327.6

Bunches 440

σ_z (mm) 2.903

Nat. Emittance (m.rad) 9.6e-10

Coupling Constant 0.01

Energy Spread 0.00077

$\beta_{x,y}$ (m) 9.99, 1.6

$\alpha_{x,y}$ -7.6e-15, -3.8e-15

$\eta_{x,y}$ (m) 0.0339, 0

$\eta'_{x,y}$ -3.8e-16, 0

Peak Current (A) 51.1593

$\epsilon_{x,y}$ (m.rad) 9.505e-10, 9.505e-12

$\sigma_{x,y}$ (mm) 0.1009, 3.900e-3

$\sigma'_{x,y}$ (mrad) 9.754e-3, 2.437e-3

γ^{-1} (mrad) 0.170333

☐ Zero Emittance

Light Source

Wiggler

B (T) 2.1

λ_u (mm) 50

Device Length (m) 2

Reg. Magnet Length (m) 1.9

of Reg. Periods 38

K value 9.80415

$\sigma_{rx,rx'}$ (mm,mrad) 0.4419, 0.8051

$\sigma_{ry,ry'}$ (mm,mrad) 0.05574, 0.1016

$\Sigma_{xx'}$ (mm,mrad) 0.4533, 0.8051

$\Sigma_{yy'}$ (mm,mrad) 0.05588, 0.1017

ϵ_c (eV) 12569

λ_c (nm) 0.0986431

Total Power (kW) 23.8559

Gap-Field Relation None

Field Structure Antisymmetric

☒ End Correction Magnet

1) Fill the “Accelerator” and “Light source” parameters

SPECTRA 11.2.1 - C:\Users\sln\OneDrive - Synchrotron Light Research Institute\SPS-II\SPS-II_Beamline

File Select Calculation Parameter Set Edit Help

Main Parameters Pre-Processing Post-Processing

Select Calculation

Far Field & Ideal Condition

Near Field

Coherent Radiation

Characterization at the Source

Fixed Point Calculation

Coherent Mode Decomposition

Energy Dependence

Spatial Dependence

K Dependence

Angular Flux Density

Angular Power Density

Resolved Power Density

Volume Power Density

Along Axis

Mesh: x-y

Mesh: r-φ

Bunches 440

σ_z (mm) 2.903

Nat. Emittance (m.rad) 9.6e-10

Coupling Constant 0.01

Energy Spread 0.00077

$\beta_{x,y}$ (m) 9.99, 1.6

$\alpha_{x,y}$ -7.6e-15, -3.8e-15

$\eta_{x,y}$ (m) 0.0339, 0

$\eta'_{x,y}$ -3.8e-16, 0

Peak Current (A) 51.1593

$\epsilon_{x,y}$ (m.rad) 9.505e-10, 9.505e-12

$\sigma_{x,y}$ (mm) 0.1009, 3.900e-3

$\sigma'_{x,y}$ (mrad) 9.754e-3, 2.437e-3

γ^{-1} (mrad) 0.170333

Bunch Profile Gaussian

Injection Condition Automatic

Reg. Magnet Length (m) 1.9

of Reg. Periods 38

K value 9.80415

$\sigma_{rx,rx'}$ (mm,mrad) 0.4419, 0.8051

$\sigma_{ry,ry'}$ (mm,mrad) 0.05574, 0.1016

$\Sigma_{xx'}$ (mm,mrad) 0.4533, 0.8051

$\Sigma_{yy'}$ (mm,mrad) 0.05588, 0.1017

ϵ_c (eV) 12569

λ_c (nm) 0.0986431

Total Power (kW) 23.8559

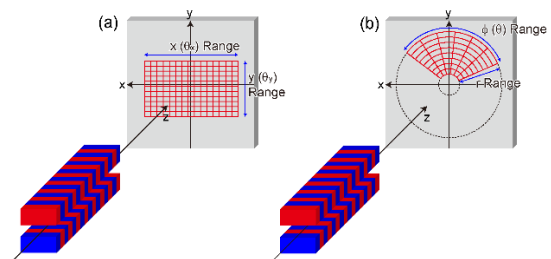
Gap-Field Relation None

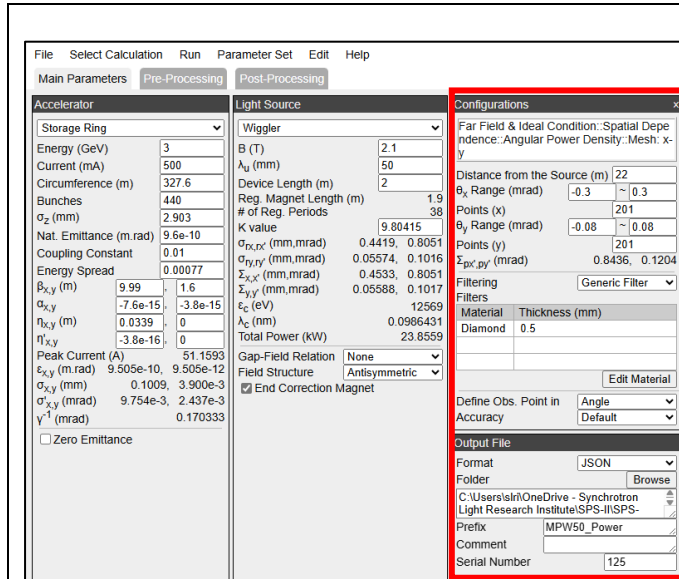
Field Structure Antisymmetric

☒ End Correction Magnet

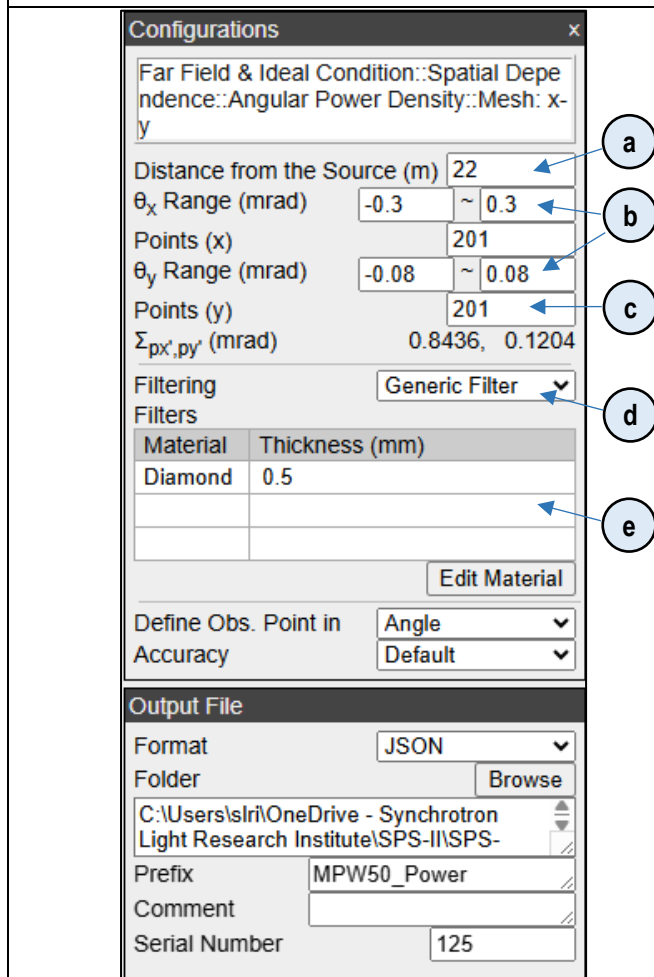
2) Click “Select calculation”
3) Click “Far field & Ideal condition”
Then, click “Spatial dependence” → Angular power density → Mesh X-Y

Note: Mesh x-y and Mesh r-φ
[Ref:spectra manual]





4) The "configuration" window will be shown



5) Fill the Slit and distance parameters

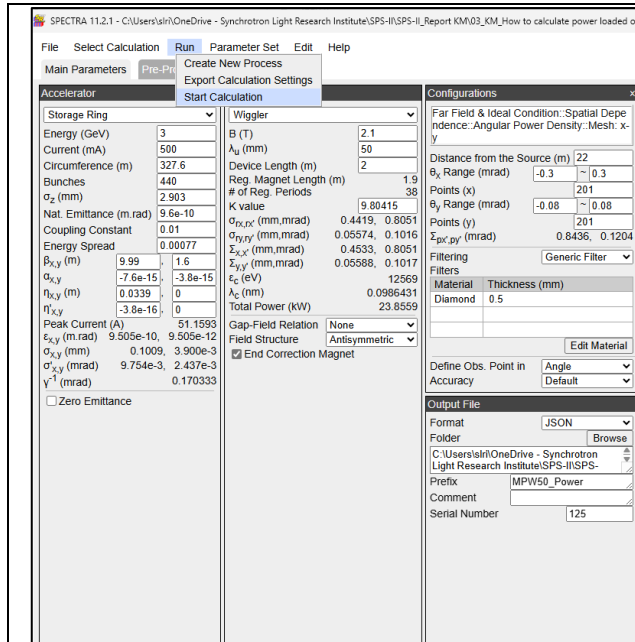
(a) Fill the distance of element form the source
For this case, we would like to calculate the power density of DMM after allocating it behind the Diamond filter. Therefore, we will calculate the power profile after the beam passes though the filter. The distance should be 22 m.

(b) Fill the horizontal(θ_x) and vertical (θ_y) opening angle

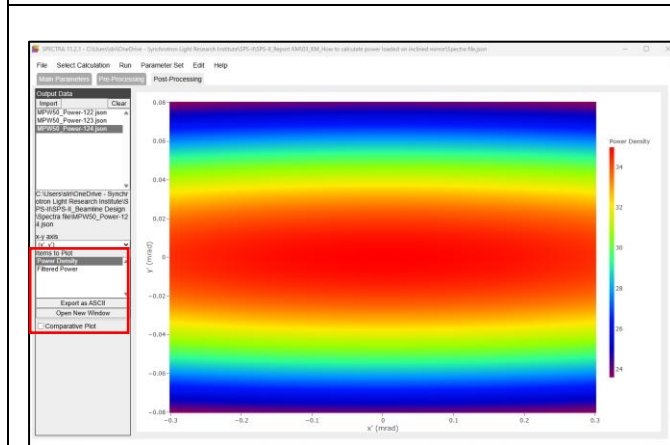
(c) Number of data points

(d) Create the filter

(e) Fill the filter parameter (Diamond 0.5 mm)
You can edit type of materials with "Edit material" bottom



(6) Start calculation



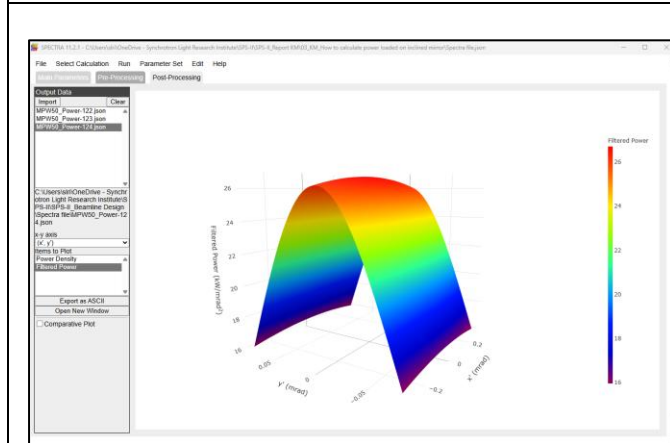
(7) Click "Post processing"

(8) The power density result will be shown

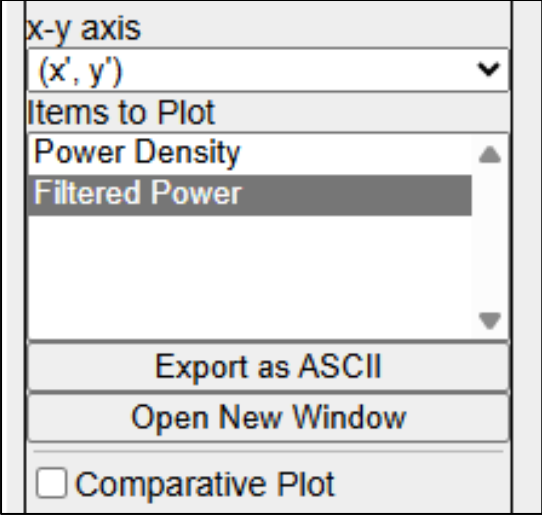
(9) At the "Item to plot" window shows two of calculation file.

"Power density" file will show the power density profile before the beam pass through the diamond filter

"Filter Power" file will show the power density profile after the beam pass through the diamond filter

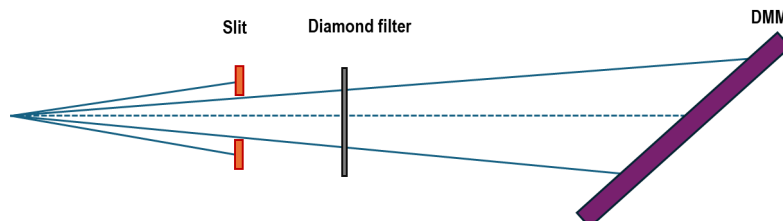


(10) Plot "surface" of power density profile

	(11) Select "Filter Power", then click "Export as ASCII" (12) Create filename and save
---	--

Step 2 Calculate the power profile on inclined DMM

The power density profile file that we exported from a spectra program were calculated based on the source perpendicular on diamond filter. Nevertheless, For DMM, the beams are not perpendicular to DMM. Because the incidence angle of DMM will be related to energy. Therefore, the power density of DMM will change relative to Eq.(4)



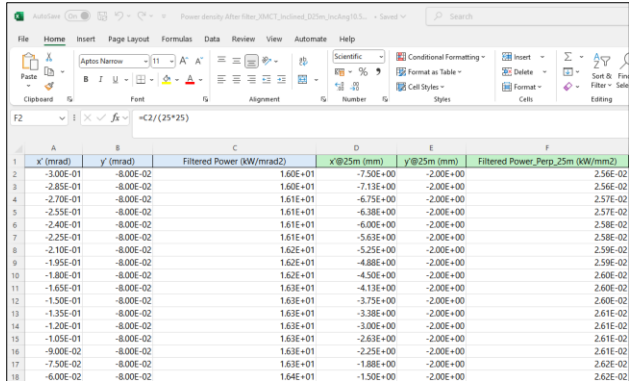
$$\Sigma P_{\text{total_In}} = \sin \theta \times \Sigma P_{\text{total_Pen}}$$

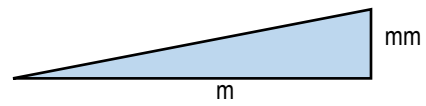
	A	B	C	D	E	F
1	x' (mrad)	y' (mrad)	Power Density (kW/mrad ²)			
2	-3.00E-01	-8.00E-02	2.36E+01			
3	-2.85E-01	-8.00E-02	2.36E+01			
4	-2.70E-01	-8.00E-02	2.37E+01			
5	-2.55E-01	-8.00E-02	2.37E+01			
6	-2.40E-01	-8.00E-02	2.37E+01			
7	-2.25E-01	-8.00E-02	2.38E+01			
8	-2.10E-01	-8.00E-02	2.38E+01			
9	-1.95E-01	-8.00E-02	2.38E+01			
10	-1.80E-01	-8.00E-02	2.39E+01			
11	-1.65E-01	-8.00E-02	2.39E+01			
12	-1.50E-01	-8.00E-02	2.39E+01			
13	-1.35E-01	-8.00E-02	2.39E+01			
14	-1.20E-01	-8.00E-02	2.39E+01			
15	-1.05E-01	-8.00E-02	2.40E+01			
16	-9.00E-02	-8.00E-02	2.40E+01			
17	-7.50E-02	-8.00E-02	2.40E+01			
18	-6.00E-02	-8.00E-02	2.40E+01			

(1) Open the ASCII file from Spectra program with Excel

- (a) Column A : Horizontal opening angle in “mrad” Unit
- (b) Column B : Vertical opening angle in “mrad” Unit
- (c) Column C : Power density after the beam passes through diamond filter (at 22 m) in kW/mrad²

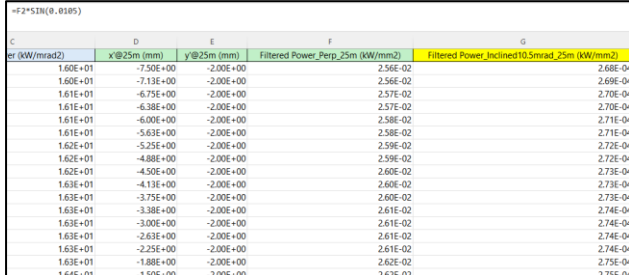
(2) We will change the unit form “mrad” to “mm” from





$$\text{mrad} = \frac{\text{mm}}{\text{m}}$$

(3) The DMM will be allocated at 25 m from source. Therefore, column A and B must be multiple by 25 as shown in column D and E.
For column C, it will be divided by 25^2 as shown in column F.



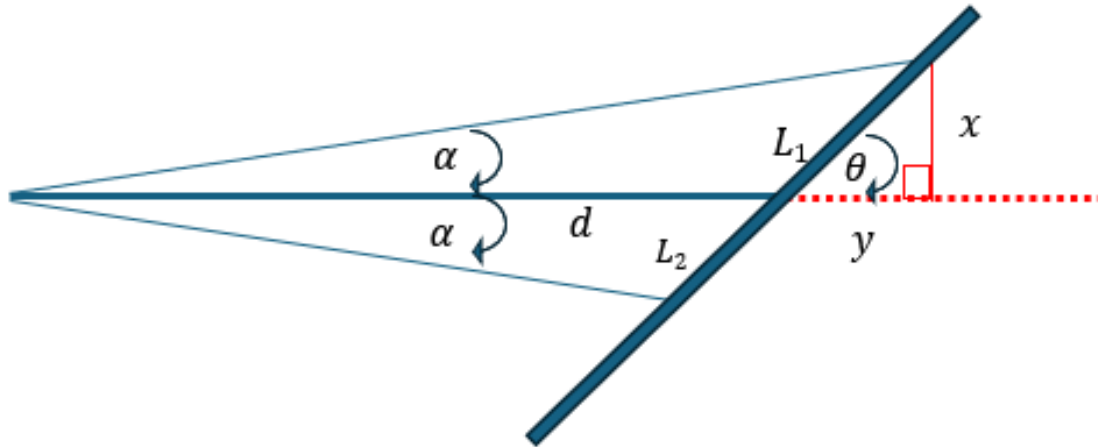
(4) From Eq.(4), we can calculate at the inclined DMM.

$$\Sigma P_{\text{total_In}} = \sin \theta \times \Sigma P_{\text{total_Pen}}$$

(5) For this example, the incidence angle is 10.5 mrad. Therefore, column F will be multiple by $\sin(0.0105)$. The power density of inclined are shown in column G.

(6) Save data

Step 3 Footprint calculations



$$L_1 = d / \left[\frac{\sin \theta}{\tan \alpha} - \cos \theta \right] \quad \text{and} \quad L_2 = d / \left[\frac{\sin \theta}{\tan \alpha} + \cos \theta \right]$$

From $L = L_1 + L_2$

$$L = \frac{2d \left[\frac{\sin \theta}{\tan \alpha} \right]}{\frac{\sin^2 \theta}{\tan^2 \alpha} - \cos^2 \theta}$$

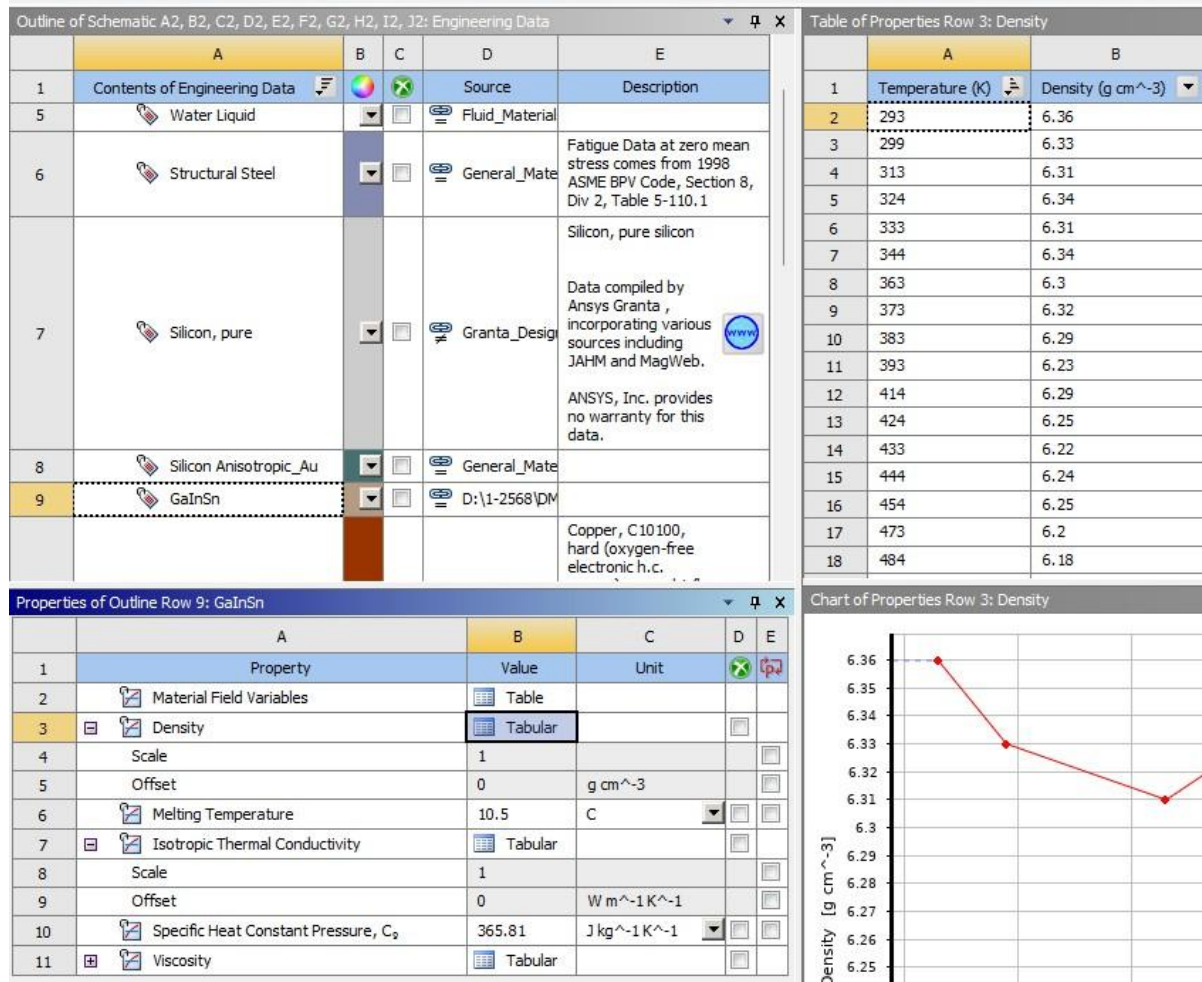
We got the horizontal and vertical beam footprint as $= 15 \times 381 \text{ mm}^2$

ภาคผนวก ข

กำหนดคุณสมบัติวัสดุ (Material Properties):

ตารางที่ 1 Coefficient of Thermal Expansion of Si

Temperature (C)	Coefficient of Thermal Expansion (CIE) (°C-1)
20	2.46E-06
250	3.61E-06
500	4.15E-06
1000	4.44E-06
1500	4.44E-06



ตารางที่ 2 Density of GaInSn

Temperature (K)	Density (g cm ⁻³)
293	6.36
299	6.33
313	6.31
324	6.34
333	6.31
344	6.34
363	6.3
373	6.32
383	6.29
393	6.23
414	6.29
424	6.25
433	6.22
444	6.24
454	6.25
473	6.2
484	6.18

ตารางที่ 3 Thermal Conductivity of GaInSn

Temperature (K)	Thermal Conductivity (W/m·K)
292	23.9
299	24.4
305	24.7
312	25.1
319	25.5
325	25.9
335	26.4
350	27.3
363	27.9

370	28.2
384	29.4
401	29.8
416	30.7
424	31.1
431	31.4
439	32
450	32.2
460	32.4
468	33.5
479	33.6
488	34.1
499	34.4
508	34.9
517	35.2
527	35.5
537	35.9
549	36.2
558	36.5
568	36.8
577	37.2
588	37.5
598	38

ตารางที่ 4 Viscosity of GaInSn

Temperature (K)	Viscosity (MPa s)
299	2.09
307	2.03
313	1.98
324	1.85
339	1.76
354	1.63
369	1.55
386	1.44
404	1.36
424	1.3
443	1.24
464	1.17
487	1.15
509	1.1
533	1.07
555	1.04
577	1
598	0.95