

อุปกรณ์ต้นแบบชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน

นายอภิรักษ์ สุธรรมาภิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2552

**PROTOTYPE OF A MIRROR BENDER FOR  
THE SYNCHROTRON RADIATION BEAMLIN**

**Apirak Suthummapiwat**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the**

**Degree of Master of Engineering in Mechatronics**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2009**



## อุปกรณ์ต้นแบบชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริไธย์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ประยูร ส่งศิริฤทธิกุล)

กรรมการ

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

กรรมการ

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อภิรักษ์ สุธรรมมาภิวัดน์ : อุปกรณ์ต้นแบบชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับระบบลำเลียง  
แสงซินโครตรอน (PROTOTYPE OF A MIRROR BENDER FOR THE  
SYNCHROTRON RADIATION BEAMLINE) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุณศิริวิไลย์, 125 หน้า.

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาออกแบบ และสร้างต้นแบบชุดปรับความโค้งของ  
กระจกสำหรับปรับตำแหน่งโพกัสของแสงในระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน เพื่อปรับขนาดของ  
ลำแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างที่จะศึกษาในสถานีทดลอง ระบบปรับความโค้งของกระจก  
ดังกล่าวมีความซับซ้อน และต้องอาศัยความรู้พื้นฐานวิศวกรรมหลายด้าน และเป็นครั้งแรกที่ระบบ  
ดังกล่าวจะถูกพัฒนาขึ้นในประเทศ ในการศึกษาออกแบบอาศัยโปรแกรม COSMOSWorks เข้าช่วย  
ในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษา และจำลองผลการทำงาน โดยหา  
ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีความโค้งของกระจกที่เปลี่ยนไปต่อแรงกระทำที่ค่าต่าง ๆ โดยวัสดุที่ใช้  
ทำเป็นกระจกที่ศึกษาได้แก่ Al Alloy (6061) และ Zerodur มีขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร x ยาว 300  
มิลลิเมตร x หนา 15 มิลลิเมตร ส่วนโครงสร้างกลไกของชุดปรับความโค้งทั้งหมดออกแบบโดยใช้  
เหล็กกล้าไร้สนิม โดยจำลองการให้แรงกับระบบเพื่อปรับเปลี่ยนรัศมีความโค้งให้ได้ในช่วง 50,000-  
60,000 มิลลิเมตร ตามความต้องการที่จะใช้งานจริงในระบบลำเลียงแสง จากผลการศึกษาพบว่าต้อง  
ใช้แรงในช่วง 120-145 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ 155-195 นิวตัน สำหรับ Zerodur จึงจะ  
ได้ค่ารัศมีความโค้งในช่วงที่ต้องการ และไม่ควรมีแรงเกิน 300 นิวตัน กับระบบ ซึ่งจะทำให้เกิด  
ความเสียหายขึ้นได้ โดยคิดที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของค่าความเค้นคราก และตอนท้ายจะเป็นการทดสอบ  
โครงสร้างที่ออกแบบขึ้นกับวัสดุจริงโดยได้เลือก Al Alloy (6061) เป็นวัสดุแทนกระจกเพื่อนำผลที่  
ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง ผลปรากฏว่าใช้แรงน้อยกว่าผลการจำลอง 70 นิวตัน ซึ่งเป็นข้อดีต่อ  
การลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบ และระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ถือได้ว่าเป็นชุดต้นแบบสำหรับ  
การพัฒนาต่อยอดในอนาคต ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์แล้วว่าเราสามารถออกแบบ และสร้างต้นแบบ  
ชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนได้เองภายในประเทศ ทั้งยังสามารถ  
ช่วยลดต้นทุนการนำเข้าจากต่างประเทศได้ถึง 1 ใน 5 ซึ่งระบบดังกล่าวที่นำเข้าจากต่างประเทศมี  
ราคาประมาณ 2.5 ล้านบาท

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2552

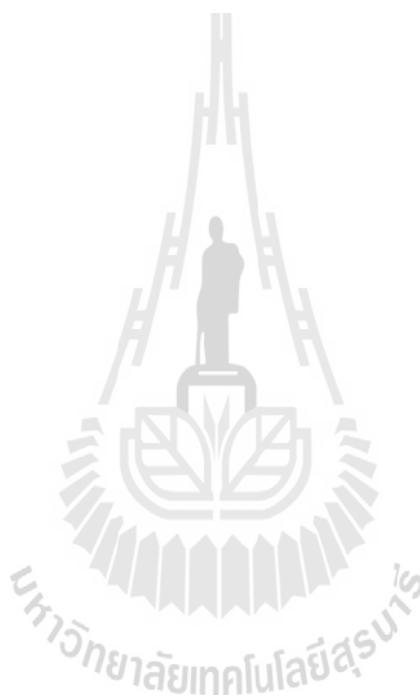
ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม \_\_\_\_\_

APIRAK SUTHUMMAPIWAT : PROTOTYPE OF A MIRROR BENDER  
FOR THE SYNCHROTRON RADIATION BEAMLIN. THESIS  
ADVISOR : ASST. PROF. ANANT OONSIVILAI, Ph.D., 125 PP.

MIRROR BENDER/SYNCHROTRON LIGHT BEAMLIN

This thesis presents the design study and prototype fabrication of a curvature adjustment system of a focusing mirror, or a mirror bender, in a synchrotron light beamline. The mirror is functioned to adjust the beam size pointing on a sample in an experimental station. The curvature adjustment of mirror is complex. Knowledge of various engineering areas is required for this work. This the first time that such a system is developed in the country. Finite element analysis using COSMOSWorks has also been employed to find out the relationship between the radius of curvature of the mirror and the acting force. The materials of the mirror investigated are Al Alloy (6061) and Zerodur. The dimension of the mirror is of 40mm × 300mm × 15mm. The mirror bender is made of stainless steel. A required radius of curvature is in the range of 50,000-60,000 mm. From the simulations, to achieve the required radius of curvature, the applied force of 100-150 Newtons and 150-200 Newtons is required for the mirror made of Al Alloy (6061) and of Zerodur, respectively. It was also found that the applied force over 300 Newtons will reach the maximum yield strength of the mirror bender of 80% and thus will damage the mirror bender. The prototype of the mirror bender was built and tested with an Al Alloy (6061) mirror. It was found that the actual acting force to bend the mirror with a required radius of curvature is 50 Newtons lower than that obtained from simulations that could prevent and help the system from real damage. The prototype may need further development. However this

work has proven that the system for adjusting the radius of curvature of a mirror can be designed and fabricated in the country. The system would cost about 2.5 million baths if one imports from abroad. This work costs only one fifth of a commercially available system.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

Co-Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ อุ่นสิวิไลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในระหว่างการดำเนินการวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ โครตรอน ตลอดจนให้คำแนะนำ และเป็นแบบอย่างที่ดีสำหรับการวางแผนกระบวนการดำเนินงานวิจัย และกรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

คุณเมธิ โสภณ วิศวกร สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้คำปรึกษา แนะนำด้านออกแบบระบบทางกล ตลอดจนให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการติดตั้ง และทดสอบระบบสำหรับงานวิจัย คุณชาญวุฒิ ศรีผึ้ง วิศวกร สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ความช่วยเหลือในการในการตรวจทานข้อมูล และคำแนะนำสำหรับการเขียนรายงานทางวิชาการภาษาอังกฤษ และเพื่อนร่วมงานฝ่ายระบบลำเลียงแสงทุกท่าน ตลอดจนพี่ ๆ น้อง ๆ กลุ่มนักวิจัยของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่มีส่วนช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัย ตลอดจนห้องเครื่องมือกล ที่ช่วยอนุเคราะห์สร้างต้นแบบ และแก้ไขจนได้อุปกรณ์ต้นชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ให้ความรู้วิชาการทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีต และปัจจุบัน ที่สำคัญขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด คุณพ่อสิงห์ทอง-แม่กองพัน สุธรรมมาภิวัดน์ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย อบรมเลี้ยงดู ตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่ง มาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหา และอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา และตลอดไป

อภิรักษ์ สุธรรมมาภิวัดน์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>7</b>
2.1 เทคโนโลยีแสงซินโครตรอน.....	7
2.1.1 เครื่องกำเนิดแสงสยาม.....	7
2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน.....	7
2.2 ระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง (Beamline and End Station).....	10
2.3 เอ็กซ์เรย์โพโตมิคชันอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (X-PEEM).....	11
2.4 การพัฒนาระบบปรับความโค้งกระจก.....	12
<b>3 การออกแบบและพัฒนาชุดปรับความโค้งของกระจกแบบสองแกน</b> .....	<b>15</b>
3.1 ทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1.1 แรงแค้ดล้วน (Pure bending).....	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2 สูตรของแรงค้ำ (The flexural formula).....	15
3.1.3 สมการสำหรับการปรับความโค้งของกระบอก.....	21
3.2 การออกแบบกลไกการขับเคลื่อน.....	25
3.3 การจำลองทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
3.3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks.....	28
3.3.2 การกำหนด Boundary Condition.....	29
3.3.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks.....	36
3.3.4 สรุปผลการจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks.....	41
3.4 การสร้างระบบจริง.....	42
<b>4 การออกแบบระบบควบคุมและโปรแกรมอินเทอร์เฟซ.....</b>	<b>43</b>
4.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์.....	43
4.2 การออกแบบระบบควบคุม.....	45
4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับระบบปรับความโค้งกระบอก.....	45
4.2.2 การกำหนดชุดคำสั่งและสัญญาณต่าง ๆ.....	47
4.3 สเตปปีงมอเตอร์และไดร์เวอร์.....	48
4.3.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์.....	49
4.4 การออกแบบโปรแกรมอินเทอร์เฟซ.....	51
4.4.1 การออกแบบ SubVI สำหรับติดต่อระบบไมโครคอนโทรลเลอร์.....	53
4.4.2 การออกแบบหน้าต่างสำหรับใช้งาน.....	59
<b>5 การประกอบและติดตั้งชุดปรับความโค้งกระบอก.....</b>	<b>61</b>
5.1 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในระบบปรับความโค้งกระบอก.....	61
5.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์โดยทั่วไป.....	63
5.2.1 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดตำแหน่งและการเคลื่อนที่ ไดจิมตริกอินดิเคเตอร์.....	63
5.2.2 เซนเซอร์สำหรับวัดแรงที่ให้กับระบบ สเตรนเกจ.....	66

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 การประกอบติดตั้งระบบขับเคลื่อนและเครื่องมือวัดชุดปรับความโค้ง.....	67
5.4 ระบบปรับความโค้งกระจกที่ติดตั้งแล้วเสร็จ.....	71
<b>6 การวัดและทดสอบระบบ.....</b>	<b>73</b>
6.1 ความหมายของการวัด (Measurement of Meaning).....	73
6.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องมือวัด (Basic Characteristics of Measuring Device).....	74
6.3 การเตรียมระบบก่อนการทดสอบ.....	75
6.4 การทดสอบระบบและเก็บข้อมูล.....	76
6.5 ผลการทดสอบ.....	79
6.5 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบจริง.....	81
<b>7 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>85</b>
7.1 สรุปงานวิจัย.....	85
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
รายงานอ้างอิง.....	88
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	90
ภาคผนวก ข. แบบทางวิศวกรรม ชุดปรับความโค้งกระจกต้นแบบ.....	102
ภาคผนวก ค. ผลการทดลอง และ โปรแกรมแมทแลป (Matlab).....	118
ประวัติผู้เขียน.....	125



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รัศมีความโค้งและความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยใช้ LTP ที่ค่าต่าง ๆ ..... 13
3.1	รายละเอียดคคกลไกของระบบปรับความโค้งแต่ละส่วนที่ออกแบบขึ้น ..... 27
3.2	คุณสมบัติเฉพาะของ Al Alloy (601) ..... 36
3.3	คุณสมบัติเฉพาะของ Zerodur ..... 36
3.4	รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปที่ต่อค่าแรงที่ให้กับระบบระหว่าง Al Alloy (601) และ Zerodur ..... 38
3.5	รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปที่ต่อค่าแรงที่ให้กับระบบระหว่าง Al Alloy (6061) และ Zerodur ในช่วงของแรง 100-150 นิวตันและ 150-200 นิวตัน ตามลำดับ ..... 39
5.1	ชนิดของเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์ที่นิยมใช้ในระบบการวัดทางวิศวกรรม ..... 62
6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากการจำลองเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองจริง ..... 81
6.3	ค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองจริง ..... 83
6.4	แพ็คเกจที่ได้จากการออกแบบชุดปรับความโค้งของกระจกที่พัฒนาขึ้น ..... 84

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงของ BL3.....	2
1.2 การเปลี่ยนขนาดลำแสงบนสารตัวอย่างโดยการปรับเปลี่ยนรัศมีความโค้งของกระจก.....	3
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยาม (SLRI, Thailand).....	8
2.2 แสดงตำแหน่งที่จะติดตั้งระบบลำเลียงแสงจาก Bending magnet.....	10
2.3 แผนภาพหลักการทำงานของ PEEM ที่ BL7.3.1 ของ Advanced Light Source, US.....	11
2.4 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับงานวิจัยด้าน Protein crystallography ของ Taiwan Light Source (TLS).....	14
2.5 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับ White light focusing mirror ที่ National Synchrotron Light Source, USA.....	14
3.1 คานรับแรงตัด.....	16
3.2 คานรับแรงตัดสั้น.....	17
3.3 คานเปลี่ยนรูปเป็นเส้นโค้งของวงกลม.....	18
3.4 การกระจายของแรงเค้นตามแนวแกนของคานภายใต้แรงคัตสั้น.....	19
3.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานเมื่อเกิดความโค้งขึ้น.....	21
3.6 โครงสร้างจำลองของกลไกชุดปรับความโค้ง.....	22
3.7 ตำแหน่งการสะท้อนของแสงเอ็กซ์เรย์.....	23
3.8 โครงสร้างจำลองกลไกระบบปรับความโค้งแบบสองแขนที่ออกแบบขึ้น ด้วยโปรแกรม SOLIDWorks.....	25
3.9 ส่วนประกอบกลไกของระบบปรับความโค้ง.....	26
3.10 ขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks.....	28
3.11 การเตรียมชิ้นงานสำหรับจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks.....	29
3.12 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุทดสอบสำหรับ Al Alloy (6061).....	30
3.13 การกำหนด Fixture ที่ระยะครึ่งหนึ่งของผิวหน้าวัสดุทดสอบ.....	31
3.14 การกำหนด Fixture ที่ผิวด้านข้างของชุดจับยึดทั้งสองด้าน.....	31

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 การกำหนดแรง External Load สำหรับการสวมอัด .....	32
3.16 การกำหนดแรง External Load สำหรับการกดทับ .....	31
3.17 การกำหนดแรง External Load สำหรับแรงโน้มถ่วงของโลก .....	33
3.18 การกำหนดแรง External Load สำหรับแรงดึงที่ให้กับระบบที่ค่าต่าง ๆ .....	33
3.19 การกำหนด Mesh สำหรับการวิเคราะห์ผล .....	34
3.20 ผลการกำหนด Mesh ที่ความละเอียด 3 มิลลิเมตร .....	34
3.21 ตัวอย่างการจำลองผลเบื้องต้นด้วยโปรแกรม COSMOSWorks .....	34
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Al Alloy (6061) กับระยะที่เปลี่ยนแปลงไป .....	37
3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Zerodur กับระยะที่เปลี่ยนแปลงไป .....	37
3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป .....	38
3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ .....	39
3.26 ฐานรองรับโครงสร้างกลไกขับเคลื่อน .....	39
4.1 ระบบควบคุมมอเตอร์ .....	45
4.2 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และตำแหน่งการควบคุมต่าง ๆ .....	46
4.3 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์จริงที่ใช้งาน .....	46
4.4 ชุดคำสั่งทั้งหมดสำหรับการควบคุม .....	47
4.5 มอเตอร์และไดรฟ์เวอร์สำหรับควบคุมระบบ (Oriental Motor, 2004) .....	50
4.6 ตำแหน่งการปรับสเกลการหมุนของมอเตอร์ (Oriental Motor, 2004) .....	50
4.7 ตำแหน่งการปรับกระแสมอเตอร์ RUN-STOP (Oriental Motor, 2004) .....	50
4.8 การต่อสายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ (Oriental Motor, 2004) .....	51
4.9 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมระบบปรับความโค้งที่พัฒนาขึ้นจากแลปวิว .....	52
4.10 ลำดับฟังก์ชันการทำงานของ SubVI .....	53
4.11 หน้าต่างฟังก์ชันการทำงานที่เขียนด้วยแลปวิว .....	54
4.12 การตั้งค่าติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม .....	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 การกำหนดรูปแบบคำสั่งตำแหน่งอ้างอิง.....	55
4.14 การกำหนดรูปแบบคำสั่งเริ่มทำงานหรือหยุดทำงานแบบฉุกเฉิน.....	56
4.15 การกำหนดรูปแบบคำสั่งช่วงเวลา อ่านข้อมูลตอบกลับและปิดคำสั่งโปรแกรม.....	57
4.16 รูปแบบการรวมคำสั่ง.....	57
4.17 การกำหนดความเร็ว.....	58
4.18 การกำหนดตำแหน่งมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม.....	58
4.19 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่.....	59
4.20 การกำหนดจำนวนพัลส์สำหรับการเคลื่อนที่.....	59
4.21 การออกแบบปุ่มใช้งานควบคุมสำหรับติดต่อกับ SubVI.....	60
5.1 เซนเซอร์ตรวจวัดการขัดเชิงเส้น.....	64
5.2 โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ชนิดออฟดิคัล.....	65
5.3 ลิมิตสวิตช์.....	66
5.4 เซนเซอร์วัดแรง.....	67
5.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่สร้างเสร็จก่อนนำไปประกอบเป็นชุดปรับความโค้งกระจก.....	68
5.6 ชุดปรับความโค้งกระจกที่ประกอบแล้วเสร็จ.....	68
5.7 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนการให้แรงกับระบบ.....	69
5.8 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนควบคุมตำแหน่งความโค้ง.....	69
5.9 การติดตั้งชุดวัดแรงที่ให้กับระบบ.....	70
5.10 การติดตั้งคู่อัลเกจ (Dual gauge) สำหรับวัดความโค้ง.....	71
5.11 การปรับระดับสำหรับติดตั้งระบบ.....	71
5.11 ระบบปรับความโค้งที่ประกอบแล้วเสร็จ.....	72
6.1 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับการทดสอบ.....	73
6.2 โปรแกรมอินเตอร์เฟซสำหรับควบคุมระบบ.....	76
6.3 ตำแหน่งการวัดความโค้ง.....	77
6.4 โปรแกรมอินเตอร์เฟซสำหรับควบคุมระบบ.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ณ จุดต่าง ๆ ของ Al Alloy (6061).....	80
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากการทดสอบระบบ.....	80
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากผลการจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่แรง 10–400 นิวตัน.....	82
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากผลการจำลอง เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่แรง 100–350 นิวตัน.....	82



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

X-PEEM	= X-ray Photoemission Electron Microscopy
PES	= Photoemission Spectroscopy
BL3	= Beamline 3
FOV	= Field of View
LIGA	= Lithography and Galvanplating of Electrodeposition
TXM	= Transmission X-ray Microscope
WLS	= Wavelength Shifter
SMW	= Superconducting Multipole Wiggler
PZT	= Piezoelectric Actuator
LTP	= Long Trace Profiler
EXAFS	= X-ray Absorption Fine Structure
TLS	= Taiwan Light Source
Al Alloy	= Aluminum Alloy
PWM	= Pulse Width Modulation
SubVI	= โปรแกรมย่อย
$r$	= ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงถึงมุมตกกระทบ
$r'$	= ระยะห่างจากมุมสะท้อนแสงถึงสารตัวอย่าง
$\alpha$	= มุมตกกระทบซึ่งมีขนาดเท่ากับมุมสะท้อน
$R$	= รัศมีความโค้งของกระจกหรือวัสดุทดสอบ
$\varepsilon$	= ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดแสงถึงมุมตกกระทบ
$\rho$	= ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงระบบผิววัสดุ
$E$	= มอดูลัสของยัง (Young's modulus)
$\sigma$	= แรงเค้นดัด
$M$	= โมเมนต์
$EI$	= ความแข็งแรงต่อการต้านแรงดัด
$I$	= โมเมนต์ความเฉื่อย
$t$	= ความหนาของวัสดุ

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$w$	= ความกว้างของวัสดุ
$h$	= ระยะทางระหว่างแรงที่ให้กับระบบและจุดหมุนของคาน
$F, x$	= แรงที่ให้กับระบบ
$P$	= สัมประสิทธิ์คูลัมรวม



# บทที่ 1

## บทนำ

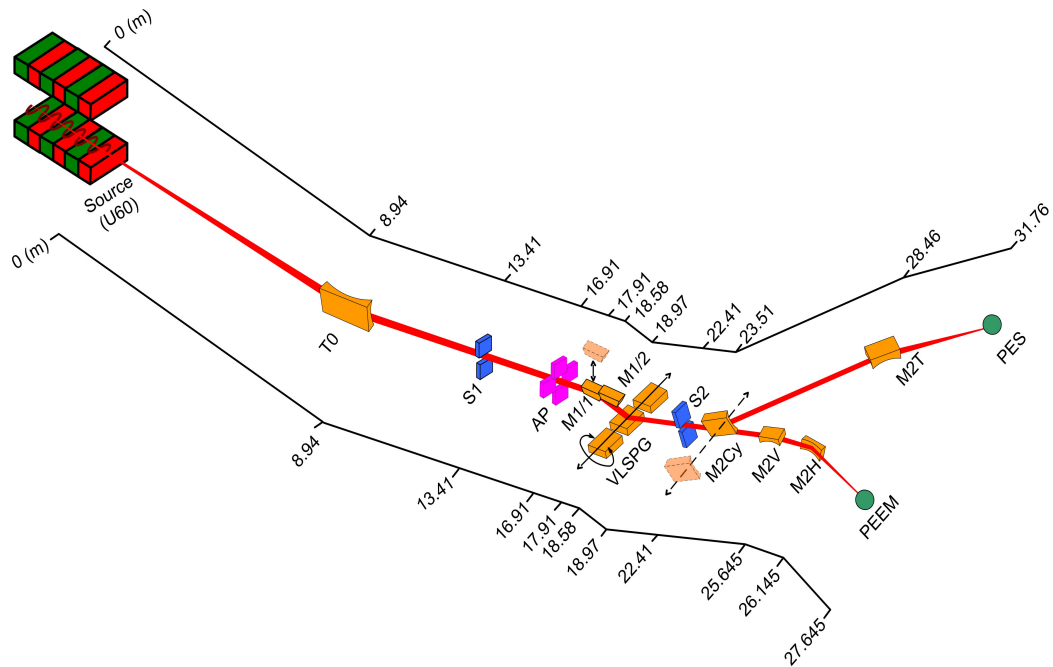
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีการพัฒนาให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วในทุก ๆ ด้าน มีการประดิษฐ์คิดค้นสิ่งต่าง ๆ มากมายเพื่ออำนวยความสะดวกแก่การดำรงชีวิตของมนุษย์ซึ่งการได้มาของเทคโนโลยีต่าง ๆ เหล่านี้ล้วนมาจากการวิจัย และพัฒนาอย่างต่อเนื่องของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและเทคโนโลยีหนึ่ง在那นั่นคือเทคโนโลยีแสงซินโครตรอน ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการวิจัยพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ตลอดทั้งการประยุกต์ใช้งานในภาคอุตสาหกรรม แสงซินโครตรอนเกิดจากอนุภาคที่มีประจุ เมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่งให้มีความเร็วใกล้ความเร็วแสง และถูกบังคับให้เคลื่อนที่ในแนววงกลมภายในสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนโดยปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเรียกว่า แสงซินโครตรอน ซึ่งมีคุณลักษณะพิเศษที่โดดเด่นหลายประการ เช่น มีความสว่างจ้า ความเข้มสูง ลำแสงที่คม และมีความต่อเนื่องของสเปกตรัม โดยให้แสงที่มีความถี่ในย่านอินฟราเรดจนถึงรังสีเอ็กซ์ และเป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวที่สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้งานได้

X-ray Photoemission Electron Microscopy (X-PEEM) เป็นเทคนิคสำคัญเทคนิคหนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน โดยใช้หลักการถ่ายภาพซึ่งมีความสามารถในการแยกแยะขนาดของวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่ากล้องจุลทรรศน์เชิงแสงโดยทั่วไปหรือระดับน้อยกว่า 20 นาโนเมตร และเป็นเครื่องมือสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ที่มีศักยภาพที่สูงสำหรับใช้งานวิจัยพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์ นาโนเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และวิทยาศาสตร์ชีวิต และระบบลำเลียงแสงใหม่ซึ่งกำลังดำเนินการสร้าง ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยามของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนจะนำเอาแสงซินโครตรอนผลิตจากอันคูเลเตอร์ (undulator) ของเครื่องกำเนิดแสงแสงสยาม (P. Songsirithigul, et al., 2007) ไปใช้งานกับเทคนิคการวัดเทคนิค X-PEEM และโฟโตมิชชันสเปกโตรสโคปี (photoemission spectroscopy หรือ PES) โดยระบบลำเลียงแสงดังกล่าวมีแผนผังการจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงดังแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งประกอบด้วยระบบกระจกสำหรับการโฟกัสแสง TO เข้าสู่ช่องเปิดขาเข้า S1 ของโมโนโครเมเตอร์ โมโนโครเมเตอร์เป็นส่วนที่เริ่มจากช่องเปิดขาเข้า S1 จนถึงช่องเปิดขาออก S2 หลังจากโมโนโครเมเตอร์ แสงสามารถนำไปใช้ได้ทางใดทางหนึ่งระหว่างเทคนิค X-PEEM หรือ PES โดยอาศัยการเลื่อนเข้าและ



เคลื่อนออกของกระจก M2Cy ในงานนี้จะมุ่งเน้นในส่วนของระบบการโฟกัสแสงสำหรับการใช้งานเทคนิค X-PEEM เพื่อที่จะทำให้สามารถโฟกัสแสงซินโครตรอนลงบนสารตัวอย่างในบริเวณที่เล็กระดับไมครอน เพื่อให้แสงอยู่ในบริเวณที่มองเห็นของกล้องจุลทรรศน์ X-PEEM ให้มากที่สุดเพื่อที่จะทำให้การวัดมีประสิทธิภาพสูง



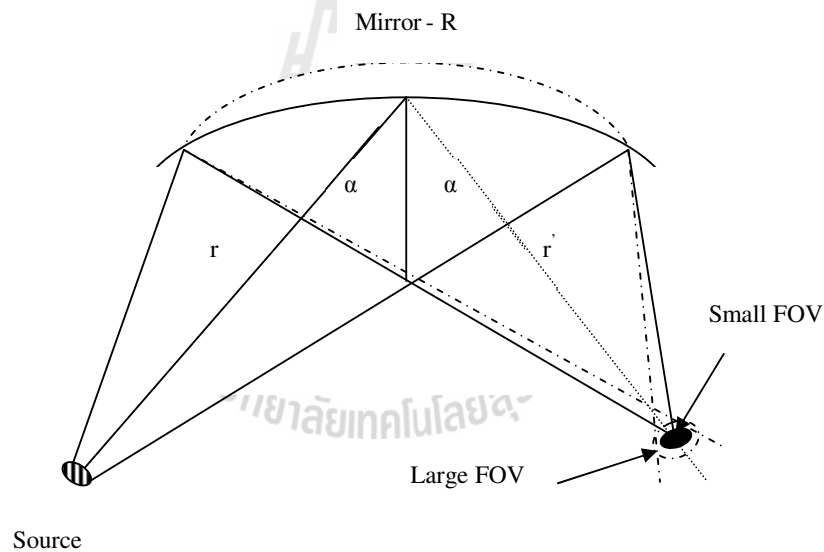
รูปที่ 1.1 การจัดวางอุปกรณ์เชิงแสงของ BL3 (P. Songsiritthigul, et al., 2007)

ระบบการโฟกัสแสงหลังโมโนโครเมเตอร์ประกอบด้วยกระจก M2V และกระจก M2H ซึ่งเป็นกระจกที่มีผิวหน้าเป็นผิวในของทรงกระบอกทำหน้าที่โฟกัสแสงในแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ ในแนวนอนกระจก M2H มีค่ารัศมีความโค้งที่คงที่ ดังนั้นขนาดของลำแสงบนสารตัวอย่างมีค่าคงที่ประมาณ 150 ไมครอน ส่วนในแนวตั้งนั้น การออกแบบต้องการให้กระจก M2V สามารถเปลี่ยนค่ารัศมีความโค้งได้ เพื่อที่จะทำให้ขนาดของลำแสงในแนวตั้งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตาม โดยรัศมีความโค้งที่ต้องการอยู่ในช่วง 50,000-60,000 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้แสงเกือบทั้งหมดตกอยู่ใน FOV (field of view) ของกล้องจุลทรรศน์ X-PEEM (2-150 ไมครอน) ดังนั้นเทคนิค X-PEEM จึงมีความเกี่ยวข้องกับขนาดของลำแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่างซึ่งสัมพันธ์กับกำลังขยายของเทคนิคด้านไมโครสโคปี การปรับขนาดของลำแสงจึงมีความสำคัญซึ่งจะต้องใช้ระบบปรับความโค้งของกระจกเข้าช่วยเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งโฟกัสของลำแสงบนสารตัวอย่างตาม

ตำแหน่งที่ต้องการดังรูปที่ 1.2 ระบบการเปลี่ยนขนาดลำแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง โดยการปรับเปลี่ยนรัศมีความโค้งของกระจกเพื่อให้สอดคล้องกับ FOV ของ X-PEEM และรัศมีความโค้งของกระจกจะสัมพันธ์กับตำแหน่งโฟกัสของแสงแสดงดังสมการที่ 1.1

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \alpha}{r'} = \frac{2 \cos \alpha}{R} \quad (1.1)$$

- โดยที่  $r$  คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิดแสงถึงมุมตกกระทบ  
 $r'$  คือ ระยะทางจากมุมสะท้อนถึงสารตัวอย่าง  
 $\alpha$  คือ มุมตกกระทบซึ่งมีขนาดเท่ากับมุมสะท้อน  
 $R$  คือ รัศมีความโค้งของกระจกที่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 1.2 การเปลี่ยนขนาดลำแสงบนสารตัวอย่าง โดยการปรับเปลี่ยนรัศมีความโค้งของกระจก

จากรูปที่ 1.2 จะเห็นว่าถ้ารัศมีความโค้งของกระจกมีค่าที่ทำให้จุดโฟกัสของแสงอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันกับสารตัวอย่าง จะได้ขนาดลำแสงที่เล็กที่สุด เราสามารถเปลี่ยนขนาดของลำแสงบนสารตัวอย่าง โดยการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดโฟกัสให้อยู่ด้านหน้าหรือด้านหลังของสารตัวอย่าง โดยทั่วไปกระจกสำหรับโฟกัสลำแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตทำจากฐานรองที่เป็นวัสดุ Zerodur, Silicon ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของโลหะที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี เช่น ทองหรือนิกเกิล เป็นต้น

สำหรับกระจก M2V ของระบบลำเลียงแสงที่จะสร้างขึ้นนี้ใช้กระจกที่ทำจากวัสดุ Zerodur ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแก้วและเซรามิก และเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพการขยายตัวที่ต่ำมาก เมื่ออุณหภูมิหรือความร้อนเปลี่ยนแปลงประมาณ  $\pm 0.15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  ที่อุณหภูมิห้อง และการปรับความโค้งดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุนั้น ๆ และลักษณะโครงสร้างกลไกการปรับความโค้งที่ออกแบบขึ้น

ดังนั้นเพื่อเป็นการเริ่มต้นพัฒนาอุปกรณ์สำหรับระบบลำเลียงแสง จึงได้เลือกระบบปรับความโค้งกระจกแบบสองแกนในการพัฒนาต้นแบบเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาในอนาคต ซึ่งอุปกรณ์สำหรับระบบลำเลียงนั้นปัจจุบันเรานำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาค่อนข้างแพง อีกทั้งต้องใช้เวลาในการสั่งสร้าง และเมื่อมีปัญหาที่ต้องส่งกลับหรือขอให้ช่างเทคนิคจากต่างประเทศเข้ามาดำเนินการแก้ไขเนื่องจากเป็นระบบเฉพาะทาง ซึ่งทำให้เสียเวลาและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงทางผู้วิจัยเห็นว่าถ้าเราเริ่มต้นพัฒนา และสามารถผลิตอุปกรณ์สำหรับระบบลำเลียงแสงเองได้ จะทำให้เราสามารถลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และลดค่าใช้จ่ายได้เป็นจำนวนมาก การใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอนสามารถพัฒนางานวิจัยได้หลากหลายสาขา เช่น ด้านฟิสิกส์ เคมี วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมตลอดทั้งพัฒนางานเชิงอุตสาหกรรม เป็นต้น เพื่อรองรับการขยายงานวิจัยด้านแสงซินโครตรอนในอนาคต สำหรับประเทศที่พัฒนาแล้วล้วนมีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นของตนเอง สำหรับประเทศไทยเราถือว่าเป็นโอกาสที่ดีที่ได้มีเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเหมือนประเทศที่พัฒนาแล้ว ซึ่งมีชื่อว่า “เครื่องกำเนิดแสงสยาม” ตั้งอยู่ภายในบริเวณเทคโนโลยี อาคารสุรพัฒน์ 3 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

การพัฒนาอุปกรณ์สำหรับระบบลำเลียงแสงเป็นเรื่องที่ยาก และซับซ้อนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งการออกแบบกลไกต้องอาศัยความรู้พื้นฐานวิศวกรรมหลายด้าน และเป็นครั้งแรกที่ระบบดังกล่าวจะถูกพัฒนาขึ้นภายในประเทศ การพัฒนาจะเริ่มจากการออกแบบทางโครงสร้างทางกลด้วยโปรแกรม SOLODWorks การกำหนดรูปร่างของต้นแบบโดยยึดขนาดของกระจกเป็นส่วนหลัก จากนั้นก็พัฒนากลไกจับยึดและระบบขับเคลื่อนต่าง ๆ เมื่อได้โครงสร้างตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะเป็นการจำลองผลเบื้องต้นเพื่อดูหลักการการทำงานของระบบที่สร้างขึ้น โดยการจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks ซึ่งการประมวลผลใช้หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีขั้นตอนการทำงานคือ เริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติวัสดุ แรงกระทำ และการจับยึด จากนั้นจะเป็นการประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงาน เมื่อได้โครงสร้างกลไกตามแบบที่ต้องการและผลการวิเคราะห์เบื้องต้นต่อไปก็จะนำไปสร้างเป็นระบบจริงและทำการทดลองระบบที่สร้างขึ้น สุดท้ายนำผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการจำลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบและสรุปผลในตอนท้าย

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างต้นแบบชุดปรับความโค้งของกระจกความละเอียดสูงเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับระบบ และรูปร่างของกระจกที่เปลี่ยนไป

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการออกแบบและพัฒนาชุดปรับความโค้งของกระจกดังกล่าว เป็นเรื่องที่ซับซ้อน ซึ่งต้องศึกษาและพัฒนาตั้งแต่เริ่มต้น ดังนั้นการสร้างจะไม่รวมถึงระบบสุญญากาศ และในการวิจัยนี้จะใช้วัสดุตัวอย่างที่ทราบคุณสมบัติแน่นอนแทนกระจกเนื่องจากมีราคาสูง และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ในระหว่างการทดลอง

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบต้นแบบชุดปรับความโค้งของกระจกโดยใช้แท่งอลูมิเนียมขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร x ยาว 300 มิลลิเมตร x หนา 15 มิลลิเมตร แทนกระจกสำหรับการทดลอง โดยให้แรงกับระบบเพื่อปรับรัศมีความโค้งให้ได้ในช่วงประมาณ 50,000-60,000 มิลลิเมตร และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับระบบและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการออกแบบและต้นแบบชุดปรับความโค้งของกระจกความละเอียดสูงเพื่อพัฒนางานวิจัยด้านแสงซินโครตรอนในประเทศไทย

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 7 บท ได้แก่ **บทที่ 1** บทนำกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขต ข้อตกลงเบื้องต้น และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ **บทที่ 2** กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งจะกล่าวถึงเทคนิคการออกแบบ และการทดสอบระบบปรับความโค้งของกระจกสำหรับแสงซินโครตรอนที่ผ่านมา **บทที่ 3** จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาระบบปรับความโค้งของกระจกแบบสองแขน ตั้งแต่การออกแบบกลไกการขับเคลื่อน การจำลองผล และวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยการนำโปรแกรม COSMOSWorks เข้าช่วย จนนำไปสู่กระบวนการสร้างชุดต้นแบบจริง **บทที่ 4** กล่าวถึงการออกแบบวงจรควบคุม และโปรแกรมอินเทอร์เฟซสำหรับ

ควบคุมกลไกการขับเคลื่อนและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการประกอบชิ้นงาน และติดตั้งเครื่องมือวัดเข้ากับชุดปรับความโค้ง บทที่ 6 เป็นการวัดและทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์กลไกการทำงานพร้อมเปรียบเทียบผลการทดลอง และผลจำลองด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ บทที่ 7 เป็นการสรุปงานวิจัย และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้อง



## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีแสงซินโครตรอน

แสงซินโครตรอนคือ แสงที่ได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน โดยเมื่อมีการเร่งอนุภาคที่มีประจุ เช่น การเร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วใกล้ความเร็วแสง และบังคับให้เคลื่อนที่ในแนววงกลมภายในสุญญากาศ อิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนโดยการปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า แสงซินโครตรอน (ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน, 2549) ซึ่งเป็นแสงที่มีคุณลักษณะพิเศษโดดเด่นหลายประการ เช่น มีความเข้มแสงและความคมชัดสูงมาก อีกทั้งมีความถี่ตั้งแต่ย่านอินฟราเรดถึงรังสีเอ็กซ์ ทำให้สามารถเลือกช่วงความยาวคลื่นหรือพลังงานที่ต้องการใช้งานได้

##### 2.1.1 เครื่องกำเนิดแสงสยาม

เครื่องกำเนิดแสงสยามเป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องแรกและเครื่องเดียวของประเทศไทย มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.1

##### 1. เครื่องเร่งอนุภาคในแนวตรง (Linac: Linear Accelerator)

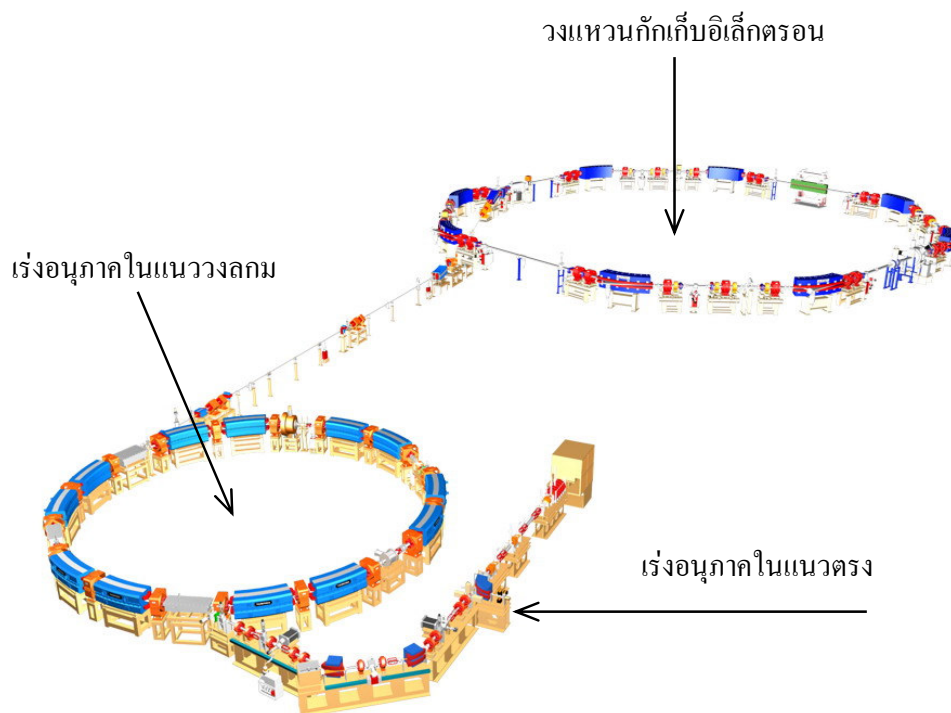
Linac นับเป็นต้นกำเนิดของลำอิเล็กตรอน ภายในระบบนี้อิเล็กตรอนจะถูกผลิตจัดกลุ่ม และถูกเร่งภายในท่อสุญญากาศจนมีพลังงานถึงค่า 40 MeV ซึ่งที่ระดับพลังงานดังกล่าวอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานสูงมากจนมีค่าเกือบเท่าความเร็วแสง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ

##### 2. เครื่องเร่งอนุภาคในแนววงกลม (Booster Synchrotron)

เป็นเครื่องเร่งอนุภาคที่มีลักษณะเป็นวงกลม พลังงานอิเล็กตรอนจะถูกเร่งจาก 40 MeV ให้พลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 1.0 GeV

##### 3. วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring)

ใช้ในการกักเก็บอิเล็กตรอนพลังงานสูงประมาณ 1000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้สนามแม่เหล็กบังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวโค้งเพื่อผลิตแสงซินโครตรอน



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดแสงสยาม (SLRI, Thailand)

### 2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน

สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. การใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยด้านฟิสิกส์ เคมี และวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม แสงซินโครตรอนสามารถใช้งานวิจัยพื้นฐานในการหาคุณสมบัติของอะตอม โมเลกุล และความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในโมเลกุลของสสาร การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุเมื่ออยู่ในสภาวะความดันและอุณหภูมิสูง ๆ การศึกษาคุณสมบัติบางประการของแม่เหล็ก และการศึกษาการจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณพื้นผิวและมลพิษที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ดี เนื่องจากสามารถตรวจวัดสารที่มีปริมาณน้อยมาก (Trace elements) ได้อย่างแม่นยำ ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้แสงซินโครตรอนในงานวิจัยด้านฟิสิกส์ เคมี และวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมได้แก่ Atomic Spectroscopy, Molecular Spectroscopy, Solid State Spectroscopy, Photoelectron Diffraction และ Photoelectron Microscopy เป็นต้น

2. การใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนกับงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ชีวภาพและวิทยาศาสตร์การแพทย์ แสงซินโครตรอน เป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาโครงสร้างของสารชีวโมเลกุลที่มีขนาดเล็กมาก และมีโครงสร้างซับซ้อนซึ่งพบภายในเซลล์สิ่งมีชีวิต เช่น โปรตีน

กรดนิวคลีอิก เป็นต้น การหาข้อมูลทางโครงสร้างสามมิติของสารชีวโมเลกุลด้วยเทคนิค Protein Crystallography ซึ่งผลที่ได้สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม การออกแบบตัวยาสำหรับรักษาโรคได้ และการรักษาโรค เช่น การใช้เทคนิค Coronary Angiography สำหรับตรวจวินิจฉัยหาการตีบตันของเส้นเลือดบริเวณหัวใจ เป็นต้น

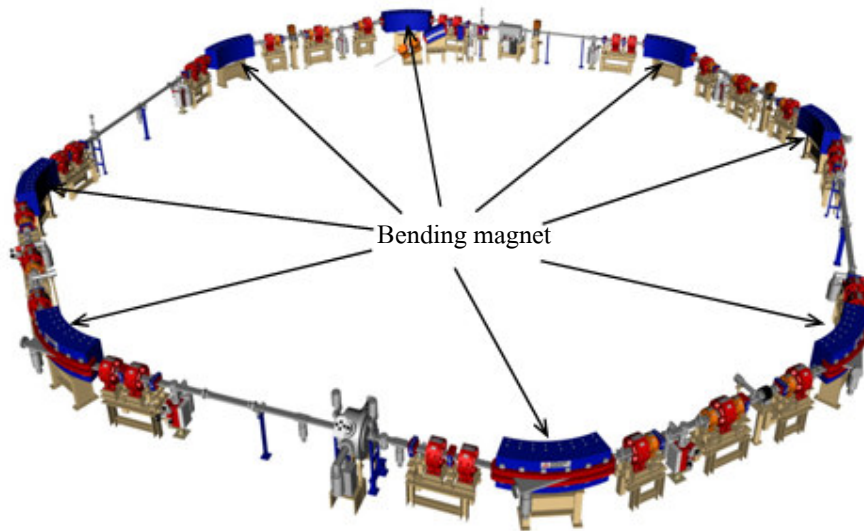
3. การใช้ประโยชน์แสงซินโครตรอนเชิงอุตสาหกรรม แสงซินโครตรอนสามารถใช้ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตแม่แบบสำหรับการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่น ไมโครชิปที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ หรือการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรขนาดจิ๋ว โดยการใช้แสงซินโครตรอนร่วมกับเทคนิคที่เรียกว่า LIGA (Lithography and Galvanoplatting of Electrodeposition) เนื่องจากในกระบวนการผลิตสามารถเลือกใช้แสงซินโครตรอนที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าแสงที่ใช้ในกระบวนการ LIGA ทั่วไป จึงสามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมากในระดับไมครอนหรือต่ำกว่า และมีความคลาดเคลื่อนในแต่ละมิติน้อยมาก

## 2.2 ระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลอง (Beamline and End Station)

ระบบลำเลียงแสงและสถานีทดลองเป็นส่วนประกอบสำคัญที่จะนำเอาแสงซินโครตรอนในช่วงพลังงานเฉพาะต่อเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน เพื่อนำแสงซินโครตรอนออกมาใช้ในงานวิจัยด้านต่าง ๆ ในการรองรับงานวิจัยที่สำคัญและมีศักยภาพในประเทศ การออกแบบดังกล่าวโดยทีมนักวิจัยที่มีความชำนาญทางด้านระบบลำเลียงแสง และสถานีทดลองของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของกลุ่มนักวิจัยผู้ใช้

การติดตั้งระบบลำเลียงแสงจะอยู่ในแนวสัมผัสกับวงโคจรของอิเล็กตรอนใน bending magnet แสดงตำแหน่งดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นแสงซินโครตรอนที่ได้จากจุดต่าง ๆ เหล่านั้นคือตำแหน่งที่จะนำแสงไปใช้ในงานวิจัย จากการติดตั้งอุปกรณ์ที่เป็น undulator (U60) ในการผลิตแสง VUV & soft x-ray เพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้าน photoelectron emission microscopy (PEEM) และ transmission x-ray microscope (TXM) การติดตั้ง wavelength shifter (WLS) ในการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงเพื่อใช้ประโยชน์ทางด้าน lithography, micromachining และ metrology และการติดตั้ง superconducting multipole wiggler (SMW) ในการผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงที่ความเข้มสูงเพื่อใช้ในงานวิจัยทางด้าน x-ray absorption spectroscopy และ protein crystallography เป็นต้น (ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน, 2549)



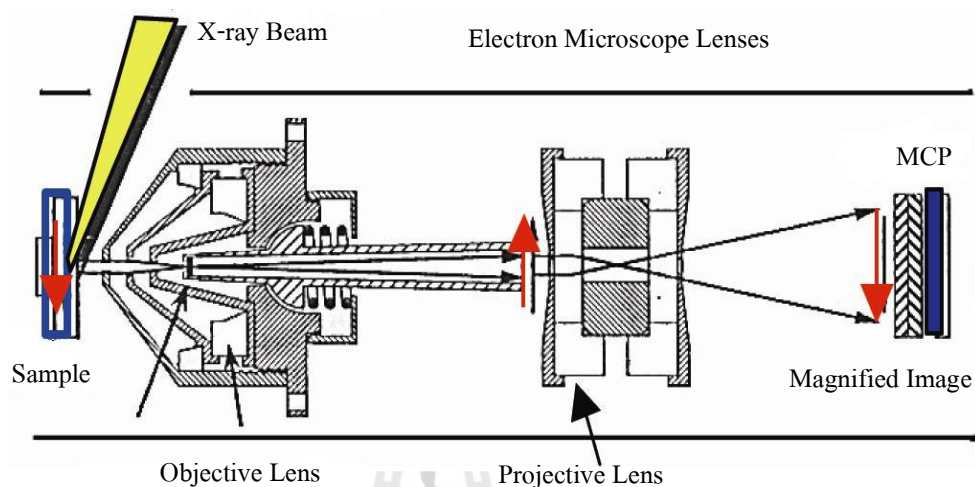


รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งที่จะติดตั้งระบบลำเลียงแสงจาก Bending magnet

### 2.3 เอ็กซ์เรย์โฟโตอิมิตชันอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (X-PEEM)

X-ray Photoemission Electron Microscopy (X-PEEM) เป็นเทคนิคสำคัญเทคนิคหนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน โดยใช้หลักการถ่ายภาพซึ่งมีความสามารถในการแยกแยะขนาดของวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่ากล้องจุลทรรศน์เชิงแสงโดยทั่วไปหรือระดับน้อยกว่า 20 นาโนเมตร และเป็นเครื่องมือสำคัญทางด้านวิทยาศาสตร์ที่มีศักยภาพที่สูงสำหรับใช้งานวิจัยและพัฒนาทางด้านวัสดุศาสตร์ นาโนเทคโนโลยี วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมและวิทยาศาสตร์ชีวิต หลักการทำงานของ X-PEEM เริ่มจากการนำเอารังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (soft X-rays) หรือรังสีย่านอัลตราไวโอเล็ตสุญญากาศ (vacuum ultraviolet หรืออาจจะเรียกว่า extreme UV) ที่มีค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสมไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมของสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษาให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับระดับชั้นพลังงานในอะตอม ชนิดอะตอมและความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ที่ใช้กระตุ้น โฟโตอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกมาบริเวณที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 2-100 ไมครอนจะถูกรวบรวม และนำไปขยายโดยอุปกรณ์สำหรับการลำเลียงอิเล็กตรอนและขยายลำอิเล็กตรอนที่มีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์ที่ใช้ลำเลียงอิเล็กตรอนและขยายลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์ SEM ลำของอิเล็กตรอนที่ถูกขยายจะนำไปสร้างภาพบนฉากรับคั้งแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้เราสามารถทำการวิเคราะห์เชิงเคมีบริเวณเล็ก ๆ (<100 นาโนเมตร) ระดับความเข้มหรือความมืด-สว่างของภาพ

ที่เกิดได้จากลักษณะผิว ชนิดของอะตอม ค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของวัสดุ และลักษณะของโดเมนแม่เหล็ก



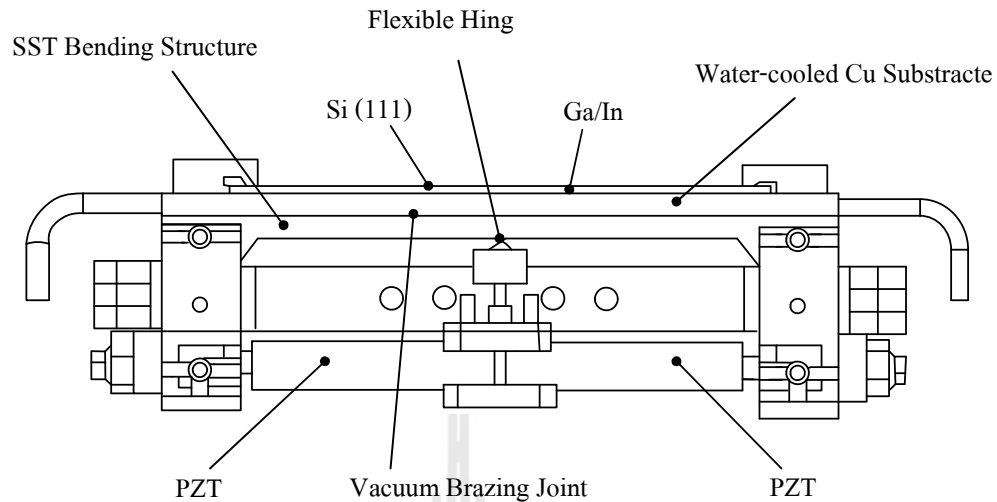
รูปที่ 2.3 แผนภาพหลักการทำงานของ PEEM ที่ BL7.3.1 ของ Advanced Light Source, US

#### 2.4 การพัฒนาระบบปรับความโค้งกระจก

ระบบปรับความโค้งของกระจกเป็นส่วนประกอบสำคัญอันหนึ่งของระบบลำเลียงแสง ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับจุดโฟกัสหรือขนาดลำแสงให้ได้ตามที่ต้องการ เพื่อประยุกต์ใช้งานด้านเทคนิคต่าง ๆ ในงานวิจัยด้านแสงซินโครตรอน อุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองต่อค่าพลังงานตามที่ต้องการ และสามารถใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนไปของอณูมิจากแสงที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่าง (Zhang et al., 1997) ซึ่งกลไกสำหรับการปรับความโค้งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับวัตถุประสงค์ดังกล่าว การเปลี่ยนรูปร่างของกระจกแบบต่าง ๆ เช่น ทรงกระบอก (cylindrical shape) โดยใช้กลไกทางกลหรือระบบนิวเมตริกส์ (Carl Zeiss, D-7082 Oberkochen, Germany) โดยการให้โมเมนต์ที่ปลายทั้งสองด้านของกระจกหรือให้แรงเท่ากันที่ปลายทั้งสองด้านของขอบคริสตอล (Müllender et al., 1995, 1997) หรือการปรับเปลี่ยนความหนาของกระจก เป็นต้น และได้มีการปรับเปลี่ยนรูปร่างของกระจกแบบวงรี (Elliptical bending) เพื่อสะท้อนแสงซินโครตรอนย่านรังสีเอ็กซ์ โดยการให้โมเมนต์ที่ปลายทั้งสองด้านตามความกว้างของกระจก (Padmore et al., 1996) หรือการเปลี่ยนความหนาวัสดุ (Howells and Lunt, 1993) โดยใช้ Piezoelectric bimorph mirror (Susini et al., 1994; Zhang et al., 1994) สำหรับการพัฒนาปรับความโค้งเพื่อสะท้อนแสงซินโครตรอน (Signorato et al., 1998)

ได้มีการพัฒนาวิธี Flexural hinges ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบโครงสร้างที่มีขนาดเล็กและเป็นโครงสร้างเดี่ยวทั้งระบบ ออกแบบขึ้นสำหรับปรับความโค้งของคริสตอลบาง (Henins, 1987) และได้มีการพัฒนาสำหรับปรับความโค้งของกระจกหนา (Ziegler, 1995; Ziegler et al., 1996) โดยมีการใช้โครงสร้างแบบเสาในการออกแบบหลักของระบบ (Howells and Lunt, 1993) มีการพัฒนาระบบปรับความโค้งสำหรับรังสีเอ็กซ์โดยพัฒนาต่อจาก Tayama (J. Tanase, et al., 1997) และนำมาใช้งานที่ Spring-8 (T. Uruga, et al., 2001) ณ ประเทศญี่ปุ่น ได้ทำทดสอบระบบโดยใช้ LTP II (Long Trace Profilometer) วัดการเปลี่ยนแปลงของความโค้งที่เกิดขึ้น ได้มีการทดลองเพื่อนำผลต่าง ๆ มาวิเคราะห์ เช่น การวัดความโค้งซ้ำค่าเดิม ผลกระทบจากการเปลี่ยนไปของอุณหภูมิ และผลจากแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นต้น พบว่าระบบดังกล่าวให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ก็ยังมีข้อเสียคือเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายจากการประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบที่สร้างขึ้น (N. Kamachi, et al., 2002) ต่อมาได้มีการพัฒนาสำหรับโพกัสรังสีเอ็กซ์ย่านพลังงานต่ำ โดยใช้กระจกที่มีผิวหน้าเป็นลักษณะความโค้งแบบวงรี (Elliptical bender) ด้วยวิธี “Arm method” และใช้สเตปป์มอเตอร์ในการส่งผ่านแรงสำหรับปรับความโค้ง จากการทดสอบพบว่าผลการทำงานให้ประสิทธิภาพ 49% และค่าความคลาดเคลื่อนจะขึ้นอยู่กับขนาดของลำแสง (beam size) และการออกแบบระบบที่สร้างขึ้นสำหรับงานนั้น ๆ (N. Kabonu, et al., 2006)

ระบบปรับความโค้งได้มีการประยุกต์และพัฒนาใช้กับเทคนิคการทดลองต่าง ๆ ทั้งในย่านรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (soft X-ray) และรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง (hard X-ray) สำหรับย่านพลังงานสูงนั้นได้มีการนำมาใช้ในงานวิจัยทางด้าน Protein crystallography แสดงดังรูปที่ 2.4 จากระบบปรับความโค้งกระจกจะเห็นว่าใช้ PZT (Piezoelectric actuator) ในการส่งผ่านแรงเพื่อปรับความโค้งของคริสตอลที่ทำขึ้นจากวัสดุ Si (111) ซึ่งได้ผลการทดลองโดยใช้ LTP ในการวัดผล แสดงดังตารางที่ 2.1 (NSRRC Activity Report, 2003, 2004) จากตารางจะเห็นว่าเมื่อรัศมีความโค้งมีค่าลดลงจะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น ในประเทศอินเดียได้มีการพัฒนาระบบสำหรับเทคนิคทางด้าน X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) โดยใช้สเตปป์มอเตอร์ในการส่งผ่านแรง ได้มีการติดตั้งและทดลองที่ INDUS-II Synchrotron Source



รูปที่ 2.4 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับงานวิจัยด้าน Protein crystallography  
ของ Taiwan Light Source (TLS), Japan

ตารางที่ 2.1 รัศมีความโค้งและความคลาดเคลื่อนจากการวัดโดยใช้ LTP ที่ค่าต่าง ๆ

	รัศมีความโค้ง (m)	ค่าความคลาดเคลื่อน (urad)
ก่อนปรับความโค้ง	104.3	16.3
R1	68.9	19.0
R2	58.7	19.7
R3	45.2	20.5
R4	30.2	21.0

ต่อมาในปี 2006 Eric Johnson และคณะ ได้พัฒนาระบบสำหรับโฟกัส White Light (white light focusing mirror) ที่ National Synchrotron Light Source ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับสถานีทดลอง NSLS X28C white light beamline ระบบดังกล่าวดังรูปที่ 2.5 โดยโครงสร้างทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และออกแบบสำหรับใช้งานในระบบสุญญากาศโดยสามารถควบคุมการปรับความโค้งได้ 5 แกนอิสระ การส่งผ่านแรงสำหรับขับเคลื่อนชุดปรับความโค้งออกแบบโดยใช้ DC Servo Motor จากผลการทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบประมาณ 2 urad แต่ก็เป็นที่น่าพอใจสำหรับการใช้งานสำหรับเทคนิคดังกล่าว (E. Johnson, et al., 2006)

การปรับจูนโฟกัสของลำแสงเล็ก ๆ ตามที่ต่องการนั้นเป็นเรื่องที่ซับซ้อน และยากสำหรับการให้โมเมนต์หรือแรงที่มีความเที่ยงตรงสูง (Padmore et al., 1996) จากการศึกษาระบบปรับความโค้งแบบต่าง ๆ ที่ผ่านมา พบว่าได้มีการพัฒนาและนำมาใช้สำหรับเทคนิคต่าง ๆ มากมายในงานวิจัย



รูปที่ 2.5 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับ White light focusing mirror  
ที่ National Synchrotron Light Source, USA

ด้านแสงซินโครตรอน ซึ่งวัสดุกระจกที่ใช้ในการสะท้อนแสงขึ้นอยู่กับการออกแบบสำหรับเทคนิค นั้น ๆ โดยเฉพาะ เช่น สถานีทดลองทางด้าน X-PEEM ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ในส่วนของ M2V จะใช้กระจกที่ทำขึ้นจาก Zerodur ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแก้วและเซรามิก ที่มีการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่น้อยมาก โดยกระจกดังกล่าวจะถูกขัดผิวหน้าให้เรียบในลักษณะทรงกระบอกเพื่อโฟกัสแสงซินโครตรอน

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าระบบปรับความโค้งของกระจกนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับระบบลำแสงและสถานีทดลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เลือกวิธีปรับความโค้งกระจกแบบสองแกน เพื่อเป็นกรณีศึกษากระบวนการต่าง ๆ ในการออกแบบระบบและเป็นครั้งแรกที่ระบบดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นภายในประเทศ โดยเริ่มตั้งแต่การออกแบบกลไกการขับเคลื่อน การจำลองและวิเคราะห์ผลทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จนนำไปสร้างเป็นชุดปรับความโค้งต้นแบบ และการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับระบบและรูปร่างของกระจกที่เปลี่ยนไป เพื่อนำผลที่ได้ไปพัฒนาต่อยอดและเป็นข้อมูลอ้างอิงของระบบต่อไป โดยชิ้นส่วนต่าง ๆ จะผลิตขึ้นภายในประเทศที่ โรงเครื่องมือกล สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

## บทที่ 3

### การออกแบบและพัฒนาชุดปรับความโค้งของกระจกแบบสองแขน

การออกแบบและพัฒนาชุดปรับความโค้งของกระจกแบบสองแขนพัฒนาขึ้น โดยอาศัยโปรแกรม SOLIDWorks เข้าช่วย โดยการออกแบบโครงสร้างจะแยกทีละส่วนจากนั้นค่อยนำมาประกอบกันตามแบบทางวิศวกรรมซึ่งจะทำให้สามารถแก้ไขได้ง่าย เมื่อได้โครงสร้างกลไกของระบบทั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบหลักการทำงานเบื้องต้น โดยการจำลองผลเมื่อให้แรงกับระบบ และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้วัสดุทดสอบแทนกระจก สำหรับงานวิจัยนี้คือ Al Alloy (6061) เปรียบเทียบกับ Zerodur และพิจารณาผลของแรงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับส่วนต่าง ๆ ด้วยระเบียบวิธีวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยอาศัยโปรแกรม COSMOSWorks ในการจำลอง สุดท้ายเป็นการสรุปผลเพื่อหาขนาดของระบบที่เหมาะสม และกำหนดรายละเอียดของต้นแบบเพื่อนำไปสร้างระบบจริงต่อไป

#### 3.1 ทฤษฎีและการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

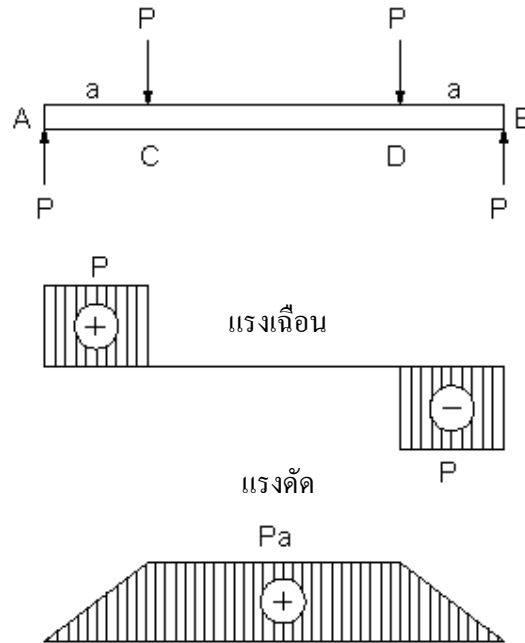
##### 3.1.1 แรงดัดล้วน (Pure bending)

สำหรับคานหรือส่วนของคานที่ถูกกระทำด้วยแรงคู่ควบหรือโมเมนต์ดัดที่ปลายทั้งสองโดยไม่มีแรงอื่นเลย เราเรียกว่าคานนั้นถูกกระทำด้วยแรงดัดล้วน ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเค้นตามแนวแกนที่เรียกว่า แรงเค้นดัด (bending stress) เพียงอย่างเดียวในคาน โดยไม่มีแรงเฉือนเลย

สำหรับคานที่รับน้ำหนักในแนวตั้งฉากกับแนวแกนของคานเราเรียกว่า คานถูกกระทำด้วยแรงดัด หรือ แรงดัดธรรมดา (ordinary bending) ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดทั้งแรงดัดและแรงเฉือนในคาน ยกตัวอย่างคาน AB ในรูปที่ 3.1 ถือว่าถูกกระทำด้วยแรงดัดธรรมดาเพราะมีแรงที่ C และ D ทำให้เกิดแรงเฉือนและแรงดัด (โมเมนต์ดัด) ในคาน และส่วนของคานเฉพาะช่วง CD ถือว่าถูกกระทำด้วยแรงดัดล้วนเพราะมีแรงดัดเพียงอย่างเดียว

##### 3.1.2 สูตรของแรงดัด (The flexural formula)

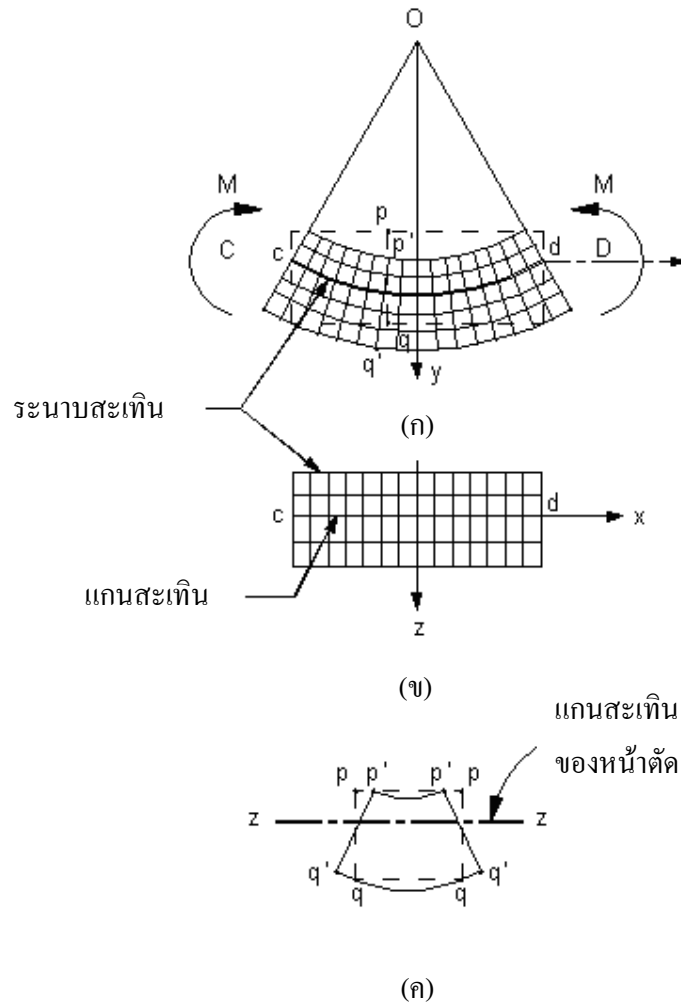
ลักษณะการกระจายที่แท้จริงของแรงเค้นที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดใด ๆ ของคานเมื่อรับน้ำหนัก เป็นเรื่องที่ยากยุ่งยากและสลับซับซ้อน แต่อย่างไรก็ตามเราก็สามารถนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ให้เหมาะสมกับการคำนวณทางวิศวกรรมศาสตร์โดยอาศัยสมมุติฐานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 คานรับแรงดัด

1. คานจะต้องมีลักษณะตรงก่อนรับน้ำหนักบรรทุก และจะต้องมีพื้นที่หน้าตัดสม่ำเสมอตลอดทั้งคาน
2. แรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำจะต้องผ่านระนาบสมมาตรตามแนวแกน (plane of symmetry) ของคาน
3. คานจะต้องทำด้วยวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด
4. แรงหรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนคานจะต้องไม่เกินขีดจำกัดยืดหยุ่นของวัสดุของคาน นั่นคือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุค (Hooke's Law)
5. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นในการรับแรงดึงและแรงอัดของวัสดุจะต้องเท่ากัน
6. ระนาบตัดขวาง (Plane section) ของคานก่อนรับน้ำหนักบรรทุกจะต้องเป็นระนาบเหมือนเดิมภายหลังรับน้ำหนักบรรทุก จากรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) ระนาบ  $ppqq$  เปลี่ยนเป็น  $p'p'q'q'$  แต่ยังคงอยู่ในระนาบเดิม จากการทดลองพบว่า ผลที่ได้ใกล้เคียงกับสมมุติฐานต่าง ๆ เหล่านี้มาก

พิจารณาช่วง CD ของคานในรูปที่ 3.1 ซึ่งถูกกระทำด้วยแรงดัดล้วน สมมุติให้คานประกอบขึ้นด้วยส่วนเล็ก ๆ รูปลูกบาศก์จำนวนมากดังรูปที่ 3.2 จากสมมุติฐานข้างต้น CD



รูปที่ 3.2 คานรับแรงดัดล้วน (ก) ระนาบสมมาตรตามแนวแกน (ข) ระนาบแปลนของนาบสะเทิน (ค) การเปลี่ยนแปลงรูปของหน้าตัด

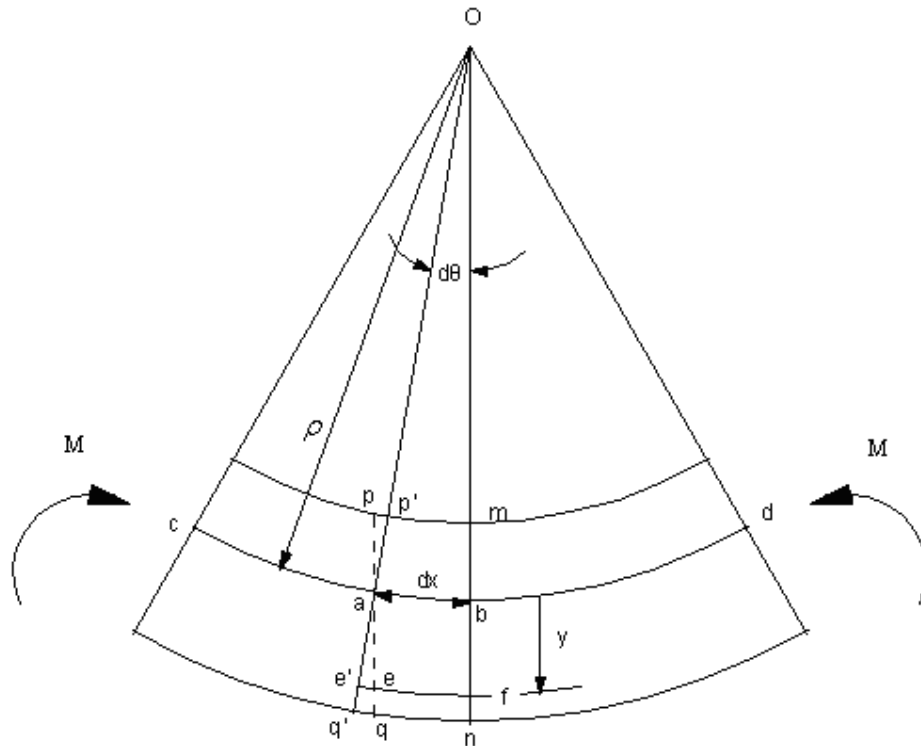
จะเปลี่ยนรูปร่างอย่างสม่ำเสมอเป็นเส้นโค้งของวงกลม เส้นใย (fibers) ตามแนวแกนด้านบนของคานจะหดตัวแสดงว่า รูปร่างสม่ำเสมอเป็นเส้นโค้งของวงกลม เส้นใย (fibers) ตามแนวแกนด้านล่างของคานจะหดตัว แสดงว่ารับแรงอัด เส้นใยด้านล่างของคานจะยืดตัว แสดงว่ารับแรงดึง มีเส้นใยกลุ่มหนึ่งที่อยู่ระหว่างส่วนบนและส่วนล่างจะมีความยาวคงที่ เนื่องจากแรงเป็นศูนย์เรียกว่า แผ่นสะเทิน หรือ ระนาบสะเทิน (neutral surface or neutral plane) ดังรูปที่ 3.2 (ข)

ส่วนที่ตัดกันระหว่างระนาบสะเทินและระนาบสมมาตรตามแนวแกนเรียกว่า แกนสะเทิน (neutral axis) ของคานคือ เส้น  $cd$  ในรูปที่ 3.2 (ก) และ (ข)



ส่วนที่ตัดกันระหว่างระนาบสะเทินกับระนาบของหน้าตัดใด ๆ ของคานาเรียกว่า “แกนสะเทินของหน้าตัด” คือ แกน  $z$  ในรูปที่ 3.2 (ค)

เมื่อคานาเปลี่ยนรูปเป็นเส้นโค้งของวงกลม สมมุติให้รัศมีความโค้งของแกนสะเทินคือ  $\rho$  โดยมีจุดศูนย์กลางของวงกลมที่  $O$  ดังรูปที่ 3.3 พิจารณาหน้าตัด  $pq$  และ  $mn$  ซึ่งเดิมอยู่ห่างกันเป็นระยะ  $dx$  เมื่อเปลี่ยนรูปแล้ว  $pq$  จะเปลี่ยนเป็น  $p'q'$  ส่วน  $mn$  ซึ่งเป็นหน้าตัดกึ่งกลางระหว่าง  $cd$  ของคานาจะคงเดิม ระยะ  $ab$  บนแกนสะเทินจะเท่ากับ  $dx$  เหมือนเดิม



รูปที่ 3.3 คานาเปลี่ยนรูปเป็นเส้นโค้งของวงกลม

มุมที่ศูนย์กลาง  $O$  รองรับโดย  $ab$  คือ  $d\theta = \frac{dx}{\rho}$  เส้นใย  $ef$  ใดๆ ที่อยู่ได้แกนสะเทินเป็นระยะทาง  $y$  จะยืดเป็น

ความยาวใหม่  $e'f'$  นั่นคือ ส่วนยืดของ  $ef = ee' = yd\theta = \frac{ydx}{\rho}$  ดังนั้น ความเครียดใน  $ef$  คือ

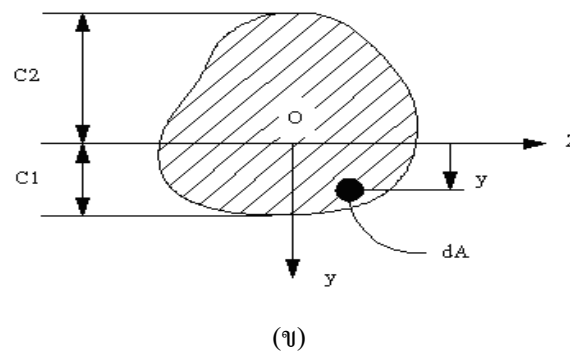
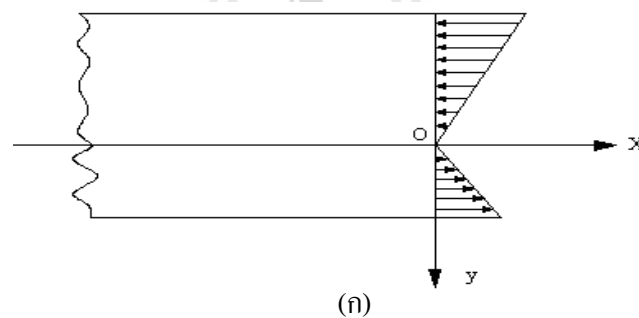
$$\epsilon_x = \frac{ee'}{ef} = \frac{ydx}{\rho dx} = \frac{y}{\rho} \quad (3.1)$$

จากสมการ 3.1 จะเห็นว่าความเครียดตามแนวแกนแปรตามระยะ  $y$  เส้นใยใด ๆ ที่อยู่ใต้แกนสะเทินจะยืดตัว ( $y$  เป็น +) เส้นใยใด ๆ ที่อยู่บนแกนสะเทินจะหดตัว ( $y$  เป็น -) การยืดหดจะมากที่สุดที่เส้นใยนอกสุดคือ เมื่อ  $y$  มีค่ามากที่สุด และที่แกนสะเทิน ( $y=0$ ) จะไม่มีการยืดหดจากกฎของฮุก  $\sigma_x = E\varepsilon_x$  ดังนั้น

$$\sigma_x = \frac{Ey}{\rho} \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_x}{yE} \quad (3.3)$$

แสดงว่าการกระจายของแรงเค้นตามแนวแกนของคานภายใต้แรงค้ำส่วนจะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 (ก) การกระจายของแรงเค้นตามแนวแกนของคานภายใต้แรงค้ำส่วน  
(ข) การกระจายของแรงเค้นภายใต้แรงค้ำส่วนเมื่อพิจารณาพื้นที่เล็ก ๆ

พิจารณาพื้นที่  $dA$  ขนาดเล็ก ๆ บนหน้าตัดใด ๆ ของคานาซึ่งอยู่ห่างจากแกนสะเทินของหน้าตัดเท่ากับ  $y$  ดังรูปที่ 3.4 (ข) แรงในแนวแกนบน  $dA$  คือ  $dF = \sigma_x dA = \frac{E}{\rho} y dA$  เนื่องจากคานารับแรงดัดล้วน ไม่มีแรงภายนอกกระทำต่อคานาตามแนวแกน ดังนั้น  $F = \frac{E}{\rho} \int_A y dA = 0$  เพราะว่า  $\frac{E}{\rho}$  เป็นค่าคงที่  $\neq 0$  ดังนั้น  $\int_A y dA = 0 = A \bar{y}$  โดยที่  $A =$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของคานา,  $\bar{y} =$  ระยะจากแกนสะเทินของหน้าตัดไปยังจุดเซนทรอยด์ แต่  $A \neq 0$  ดังนั้น  $\bar{y} = 0$

แสดงว่าแกนสะเทินของหน้าตัดใด ๆ ต้องผ่านจุดเซนทรอยด์ของหน้าตัดนั้นแรง  $dF$  บนพื้นที่  $dA$  ก่อให้เกิดโมเมนต์ของแรงรอบแกนสะเทินเท่ากับ  $dM$  ดังนั้น  $dM = y dF = y \sigma_x dA$  ผลบวกของโมเมนต์เหล่านี้ทั้งหมดบนหน้าตัดต้องเท่ากับค่าโมเมนต์ดัด  $M$  บนหน้าตัดนั้น

$$M = \int_A y \sigma_x dA = \frac{E}{\rho} \int_A y^2 dA$$
 แทนค่า  $I = \int_A y^2 dA =$  โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนสะเทินของหน้าตัด

จะได้ 
$$M = \frac{EI}{\rho} \quad (3.4)$$

หรือ 
$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (3.5)$$

สมการ 3.5 แสดงว่าความโค้ง  $1/\rho$  ของแกนสะเทินของคานาเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับค่าโมเมนต์ดัด แต่แปรผกผันกับค่า  $EI$  แทนค่าสมการ 3.5 ในสมการ 3.3

จะได้ 
$$\sigma_x = \frac{My}{I} \quad (3.6)$$

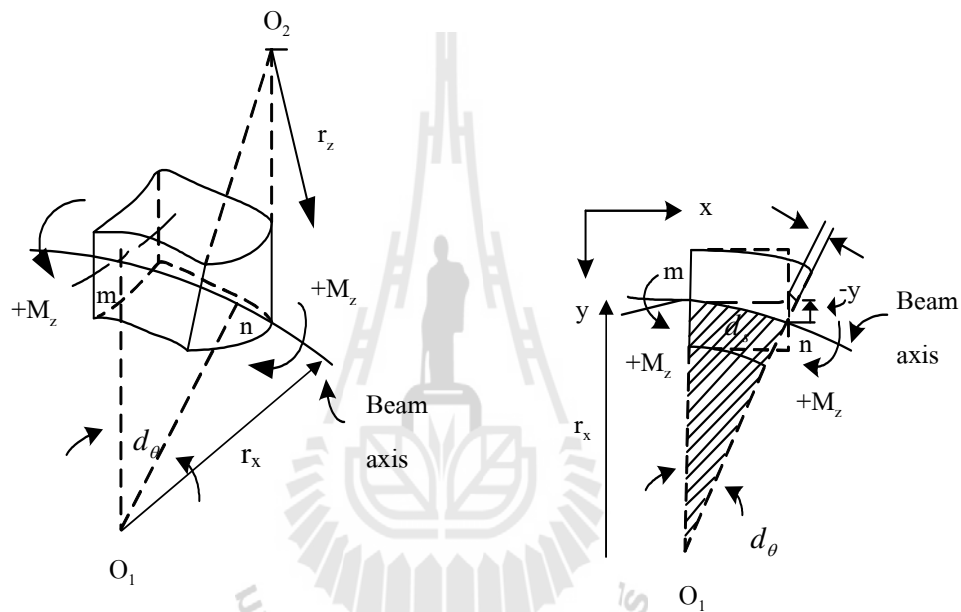
สมการ 3.6 เรียกว่า สูตรแรงดัด ค่า  $\sigma_x$  เป็นค่าแรงเค้นดัด (bending stress) ที่เกิดขึ้นในแนวแกนของคานาที่จุดใด ๆ บนหน้าตัดที่ห่างจากแกนสะเทินเป็นระยะ  $y$

เมื่อพิจารณาระบบของคานามีการเคลื่อนที่ จากกฎของฮุกและสมการ 3.6

จะได้ว่า 
$$\epsilon_x = -\frac{M_z y}{EI_z}, \epsilon_x = \epsilon_z = v \frac{M_z y}{EI_z} \quad (3.7)$$

โดยที่  $EI_z$  คือ ความแข็งแรงต่อการต้านแรงคดตามแนวแกน  $Z$

จากรูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของคานตามแนวแกนต่าง ๆ โดยให้ค่าที่อยู่ในแนวแกนมีค่าเป็นศูนย์ จากรูปเป็นการแสดงค่าเริ่มต้นเมื่อคานมีรูปร่างตรงและรูปร่างของคานที่เปลี่ยนแปลงไป เพราะคานเป็นส่วนสำคัญในการปรับความโค้งพื้นฐานและรูปร่างที่จะเกิดขึ้นเมื่อมีการให้โมเมนต์ ซึ่งส่วนของอิเลเมนต์เล็ก ๆ ตามแนวแกนจะแสดงถึงรูปร่างของคานที่เกิดขึ้น



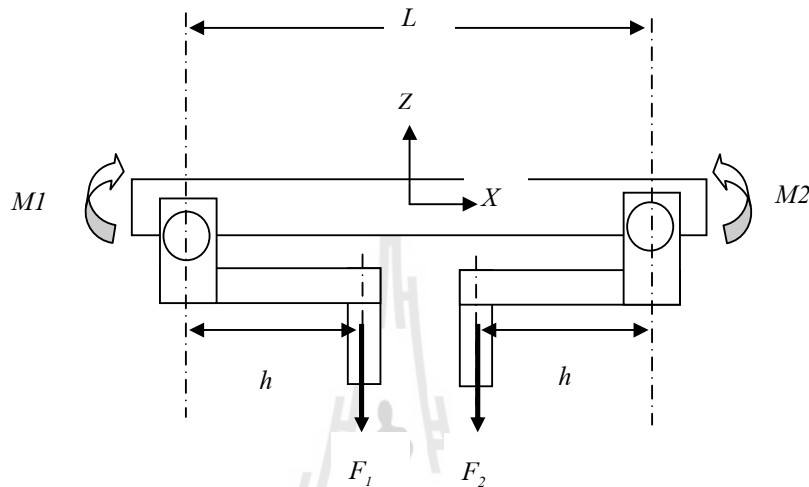
รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของคานเมื่อเกิดความโค้งขึ้น

การวิเคราะห์เพื่อหาสูตรแรงคดข้างต้นนี้ ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่คานรับแรงคดล้วนหรือมีเฉพาะโมเมนต์คดเกิดขึ้นเท่านั้น ในกรณีที่มีแรงเฉือนเกิดขึ้นบนคานด้วยหรือที่เรียกว่า แรงคดธรรมดา นั้น หน้าตัดของคานจะบิดเบี้ยวไปเนื่องจากแรงเฉือนด้วย จนทำให้ระนาบตัดขวางของคานไม่คงระนาบเดิมหลังรับแรง อย่างไรก็ตามในการคำนวณ ค่าแรงคดตามแนวแกนของคานที่รับแรงคดโดยทั่วไปก็คือว่า สูตรแรงคดให้คำตอบที่ถูกต้องที่น่าพอใจโดยไม่ถือว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดมีผลต่อค่าแรงคดตามแนวแกนแต่อย่างใด

### 3.1.3 สมการสำหรับการปรับความโค้งของกระงะจก

สมการทั่วไปสำหรับการให้โมเมนต์ที่ปลายทั้งสองด้านของชุดจับยึดกระงะจก คือ  $M_1 = hF_1$  และ  $M_2 = hF_2$  ดังรูปที่ 3.6 การปรับรัศมีความโค้งของกระงะจกสามารถวิเคราะห์โดย

ใช้ทฤษฎีบทของคานและได้มีการนำเสนอความถูกต้องสำหรับการวิเคราะห์โดย Roark (Young, 1989) รูปร่างของคานที่เปลี่ยนไปภายใต้การให้โมเมนต์  $M_1$  และ  $M_2$  สามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 3.8 ตามสมการอนุพันธ์อันดับสอง (Ugural and Fenster, 1995)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างจำลองของกลไกชุดปรับความโค้ง

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \left( \frac{h}{EI} \right) \left[ \frac{F_1 + F_2}{2} + \left( \frac{F_2 - F_1}{L} \right) x \right] \quad (3.8)$$

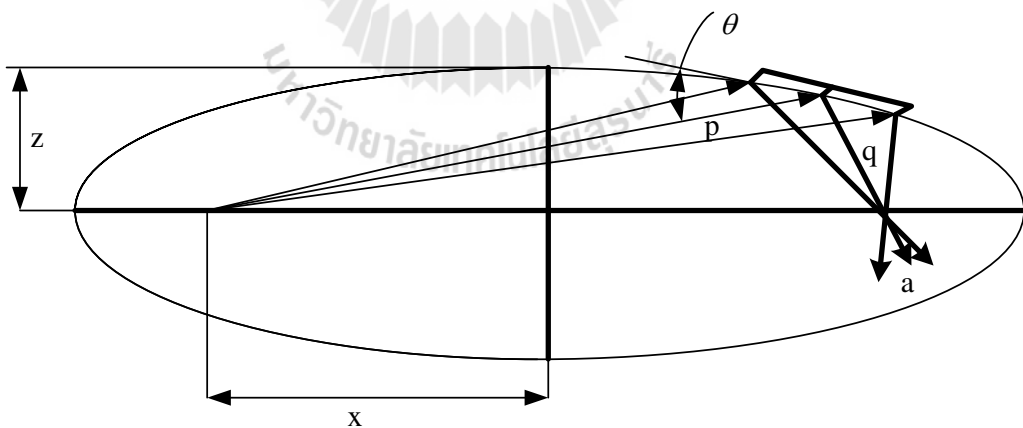
- โดยที่  $E$  คือ ค่ายังมอร์คูลัสของวัสดุ  
 $h$  คือ ระยะระหว่างแรงที่ให้กับระบบและจุดหมุนของคาน  
 $I$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย เมื่อ  $t$  คือ ความหนาและ  $w$  คือ ความกว้าง โดยที่  
 $I = t^3(w/12)$   
 $L$  คือ ความยาวของกระจก  
 $z$  คือ ระยะตามแนวแกนของความโค้งที่เปลี่ยนไป  
 $x$  คือ ระยะตามแนวแกนของความยาวกระจก

คุณสมบัติการปรับความโค้งกระจกหน้าโดยการให้แรงที่ปลายทั้งสองด้านของกระจกถึงแม้ว่าตอนแรกยังไม่ให้แรงกระทำต่อกับระบบแต่อาจมีแรงจากผลการประกอบระบบ (constants represent bending-loss factors of the mirror bender assembly) ทำให้ค่ารัศมีเริ่มต้นมีค่าไม่เป็นศูนย์

หรือจุดศูนย์กลางอาจเปลี่ยนไป ซึ่งมีผลมาจากความยาวและความหนาที่ปลายทั้งสองด้านของกระจกเปลี่ยนไป (Zieglere et al., 1996) การเปลี่ยนแปลงรัศมีความโค้งของกระจก ( $R$ ) สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ 3.9 ซึ่งในระหว่างการให้โมเมนต์ทั้งสองด้านอาจทำให้จุดศูนย์กลางของระบบเปลี่ยนไปหรือแกนหมุนไม่เท่ากันดังนั้นจะต้องมีค่าแฟคเตอร์เพิ่มเข้ามาในสมการคือค่าเสียดสภาพความโค้ง (Bending-loss factor) ดังนั้นสมการที่ 3.8 จะเปลี่ยนไปโดยมีค่าแฟคเตอร์เสียดสภาพความโค้งเป็นตัวคูณรวมในสมการซึ่งเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับารออกแบบระบบและสามารถหาได้จากการทดลอง

$$R \approx \left( \frac{1}{d^2 z / dx^2} \right) \approx \frac{EI}{hF} \quad (3.9)$$

ถ้าตำแหน่งของกระจกแสดงดังรูปที่ 3.7 ที่ระยะทาง  $p$  จากแหล่งกำเนิดแสงเอ็กซ์เรย์  $s$  กับมุมตกกระทบ  $\theta$  และได้ตำแหน่งโฟกัสที่จุด  $a$  เป็นระยะทาง  $q$  ที่ด้านล่างของกระจก การประมาณค่าแบบวงรีในอุดมคติสามารถหาตำแหน่งของ  $x$  และ  $z$  ได้พร้อมกัน (Susini, 1992; Padmore et al., 1996) คือ  $z = \alpha x^2 (1 + \beta x + \gamma x^2 + \dots)$



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการสะท้อนของแสงเอ็กซ์เรย์

จะได้รัศมีความโค้ง  $R(x)$  คือ

$$\frac{1}{R(x)} \approx \frac{d^2 z}{dx^2} = 2\alpha(1+3\beta+6\gamma x^2 + \dots) \quad (3.10)$$

$$\text{โดยที่ } \alpha = \frac{\sin \theta}{4p} \left(1 + \frac{p}{q}\right), \beta = \frac{\cos \theta}{2p} \left(\frac{p}{q} - 1\right), \gamma = \frac{1}{4pq} + \frac{5\beta^2}{4}$$

สำหรับกระจกค่าคงที่ภาคตัดขวาง (Constant cross section) รูปทรงลูกบาศก์ (cubic) สามารถประมาณค่ารูปร่างแบบวงรีสำหรับระบบ flexure bender สามารถหาค่าแรงที่ให้กับระบบ  $F_1$  และ  $F_2$  ได้โดย

$$F_1 = \left(\frac{EI}{h}\right) \left[ \frac{2}{1-\delta} - \frac{3\beta L}{1-\delta_x} \right] \alpha \quad (3.11)$$

$$F_2 = \left(\frac{EI}{h}\right) \left[ \frac{2}{1-\delta} + \frac{3\beta L}{1-\delta_x} \right] \alpha \quad (3.12)$$

การประมาณค่าสำหรับรูปทรงลูกบาศก์บางครั้งอาจจะไม่เพียงพอ และการเปลี่ยนภาคตัดขวางของกระจกเป็นที่ยอมรับมากกว่าสำหรับรูปร่างแบบวงรี โดยการเปลี่ยนค่าความหนา  $t$  และความกว้าง  $w$  ของกระจกตามสมการ

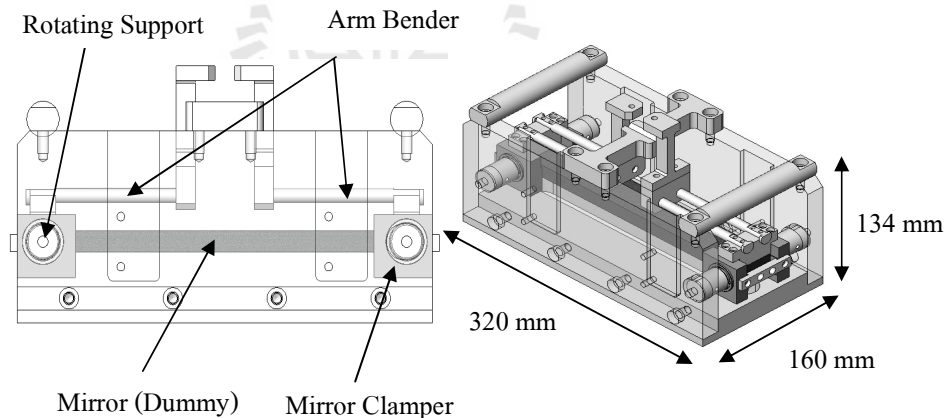
$$t^3 w = \frac{(1+3\beta x)t_0^3 w_0}{1+3\beta x+6\gamma x^2 + \dots} \quad (3.13)$$

โดยที่  $t_0$  และ  $w_0$  คือ ค่าความหนาเริ่มต้น (initial thickness) และค่าความกว้างเริ่มต้น (initial width) ของกระจก ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณค่าแรงสำหรับการปรับความโค้งได้โดยสมการ 3.11 และ 3.12 โดยการเปลี่ยนค่า  $t$  หรือ  $w$  เพียงตัวใดตัวหนึ่ง ค่า  $t$  หรือ  $w$  ก็คือค่าจำกัดความทน (tolerance limit) ที่เกิดจากการประกอบและการให้แรงพลักของกระจกและการเปลี่ยนความกว้างเป็นที่ยอมรับมากกว่าสำหรับการเปลี่ยนภาคตัดขวางของกระจก (Padmore et al., 1996)

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนภาคตัดขวางถึงแม้จะยอมรับรูปร่างแบบวงรีสำหรับลำแสงเดี่ยวแต่ไม่รวมการปรับเปลี่ยนค่าพลังงาน

### 3.2 การออกแบบกลไกขับเคลื่อน

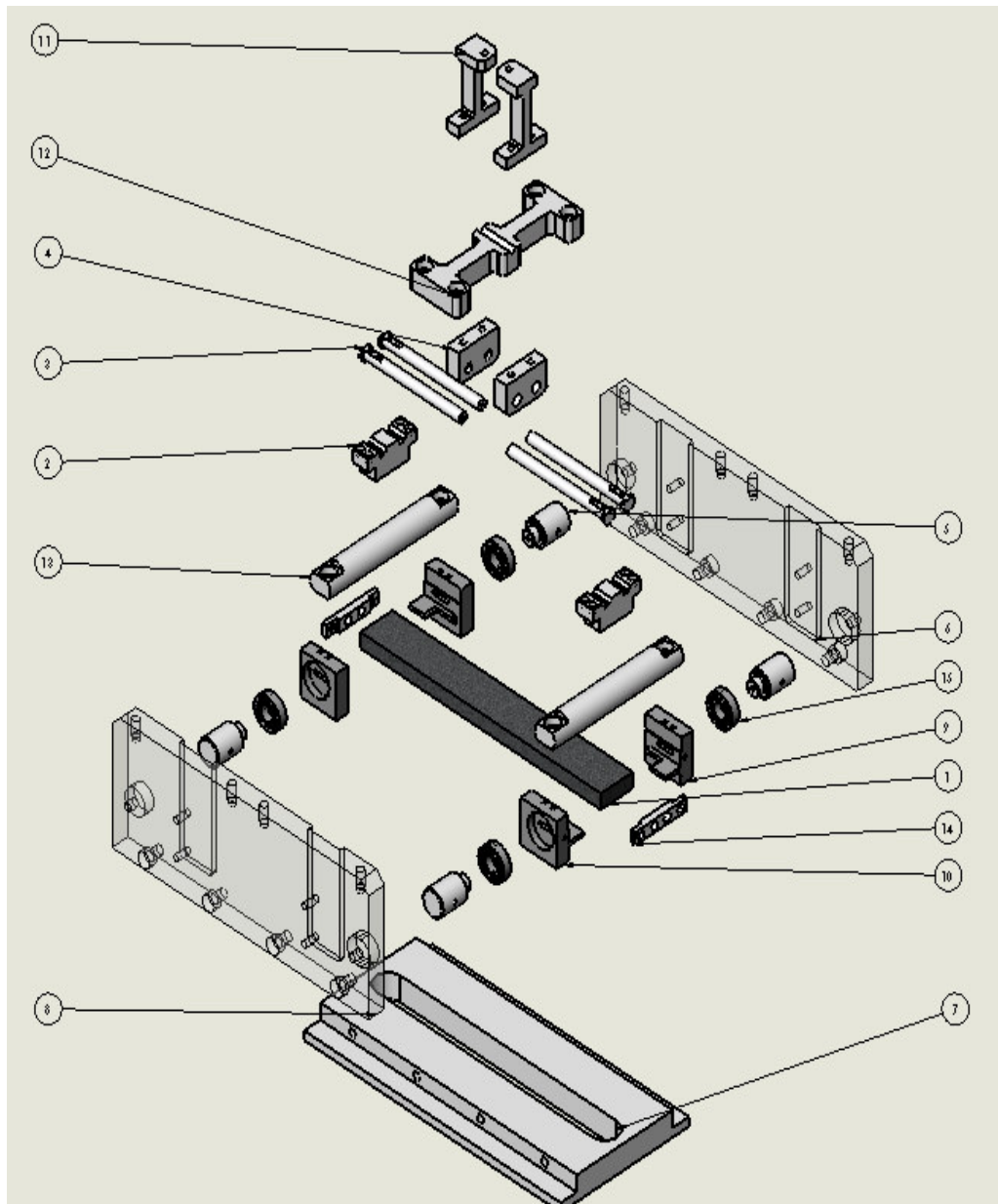
จากการศึกษาระบบกลไกการปรับความโค้งของกระจกสำหรับประยุกต์ใช้ในงานวิจัยด้านแสงซินโครตรอน ที่ผ่านมามีการนำเสนอหลายวิธี เช่น การปรับความโค้งโดยใช้ลูกเบี้ยว การออกแบบระบบทั้งหมดเป็นแบบโครงสร้างเดี่ยวโดยใช้ไวท์คัท เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยนี้ได้เลือกระบบการปรับความโค้งแบบสองแขนเพื่อสร้างต้นแบบ มีขนาดกว้าง 320 มิลลิเมตร x ยาว 160 มิลลิเมตร x สูง 134 มิลลิเมตร การออกแบบโครงสร้างเน้นวัสดุที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ ข้อดีของการออกแบบระบบปรับความโค้งแบบสองแขนคือ สามารถให้แรงกับระบบได้อย่างอิสระในกรณีจุดศูนย์กลางของระบบเปลี่ยนแปลงไป โดยการออกแบบได้นำโปรแกรม SOLIDWorks เข้าช่วย ซึ่งการปรับความโค้งของกระจกสามารถทำได้โดยการให้โมเมนต์ที่ปลายขอบทั้งสองด้านของกระจก ด้วยวิธีการผ่านแรงมายังแขนทั้งสองด้านที่ยึดติดกับจุดหมุนของชุดจับยึด และการออกแบบโครงสร้าง 3 มิติ ที่สมบูรณ์แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โครงสร้างจำลองกลไกระบบปรับความโค้งแบบสองแขนที่ออกแบบขึ้นด้วยโปรแกรม SOLIDWorks

ระบบกลไกต่าง ๆ ที่ประกอบเป็นโครงสร้างระบบปรับความโค้งกระจกแบบสองแขนสามารถจำแนกออกเป็นส่วน ๆ ดังรูปที่ 3.9 และตารางที่ 3.1





รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบกลไกของระบบปรับความโค้ง

จากการออกแบบพบว่าขนาดของโครงสร้างระบบมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สำหรับการนำไปสร้างระบบจริงเนื่องจากโครงสร้างของระบบส่วนใหญ่สามารถผลิตได้เองที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ง่ายเมื่อมีการพัฒนาต่อยอดหรือออกแบบเพิ่มเติมในภายหลัง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดคodelistของระบบปรับความโค้งแต่ละส่วนที่ออกแบบขึ้น

ส่วนที่	ชื่อเรียก
1	Mirror
2	Top clamber
3	Arm bender
4	Arm combiner
5	Shaft
6	Right plate for bender
7	Base plate for bender
8	Left plate for clamber
9	Right Mirror clamber
10	Left Mirror clamber
11	Pulling up bar
12	I bridge
13	Bender handle
14	Bracket for SP
15	BS 6267 RBB-1015-Full,DE ,AC,Full_68

จากการออกแบบพบว่าขนาดของโครงสร้างระบบมีความเหมาะสม และมีความเป็นไปได้สำหรับการนำไปสร้างระบบจริงเนื่องจากโครงสร้างของระบบส่วนใหญ่สามารถผลิตได้เองที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้ง่ายเมื่อมีการพัฒนาต่อยอดหรือออกแบบเพิ่มเติมในภายหลัง

### 3.3 การจำลองผลทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการประกอบส่วนต่าง ๆ ของระบบและได้ชุดต้นแบบระบบปรับความโค้งของกระจกแล้วนั้น เพื่อเป็นการจำลองผลการทำงานเบื้องต้นของกลไกที่ออกแบบขึ้น โดยวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัยโปรแกรม COSMOSWorks ซึ่งเป็นการทดสอบเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ค่าต่าง ๆ ที่ให้กับระบบต่อการเปลี่ยนไปของรัศมีความโค้งของกระจกที่เกิดขึ้น และพิจารณาขอบเขตของแรงที่จะให้กับระบบเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้าง

โดยการกำหนดเงื่อนไขคุณสมบัติของวัสดุและผลจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks มีรายละเอียดดังนี้

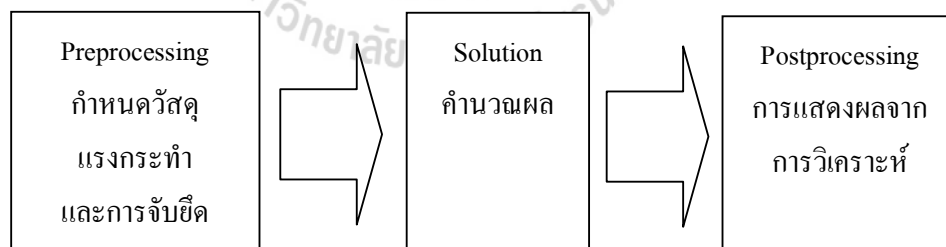
### 3.3.1 การจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

โปรแกรม COSMOSWorks เป็นโปรแกรมทางวิศวกรรม ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยเทคนิคการคำนวณที่เรียกว่า “Finite Element Analysis” หรือเรียกย่อ ๆ ว่า “FEA” เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรง ความแข็งแกร่ง และความโค้งงอของกระบอกจากแรงกระทำต่อระบบ ซึ่งโปรแกรม SolidWorks และ COSMOSWorks จะเชื่อมโยงข้อมูลด้วยกัน โดยนำชิ้นงานที่สร้างจาก SolidWorks แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย COSMOSWorks กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการสร้างชิ้นงานแล้วแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนเล็ก ๆ (mesh) โดยมีรูปทรงง่าย ๆ (สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม) เราเรียกว่า “elements (อิลิเมนต์)” และชิ้นเล็ก ๆ จะต่อเชื่อมโยงกันทั้งชิ้น การทำงานด้วยการแบ่งอิลิเมนต์ FEA จะแก้สมการด้วยการประมาณค่าในแต่ละอิลิเมนต์ จนกว่าจะครบทุกชิ้นส่วน แล้วนำมาประมาณผลรวมกัน ขั้นตอนการคำนวณจะแยกตามส่วนของโปรแกรมซึ่งมี 3 ขั้นตอนดังนี้

Preprocessing เป็นขั้นตอนการเตรียมข้อมูลเพื่อการคำนวณ โดยข้อมูลมาตรฐาน จะมีทั้งคุณสมบัติวัสดุ (material properties) แรงกระทำ (loads) และการจับยึด (restraints) เป็นต้น

Solution การคำนวณหาผลเฉลย (solution) หรือการหาคำตอบ

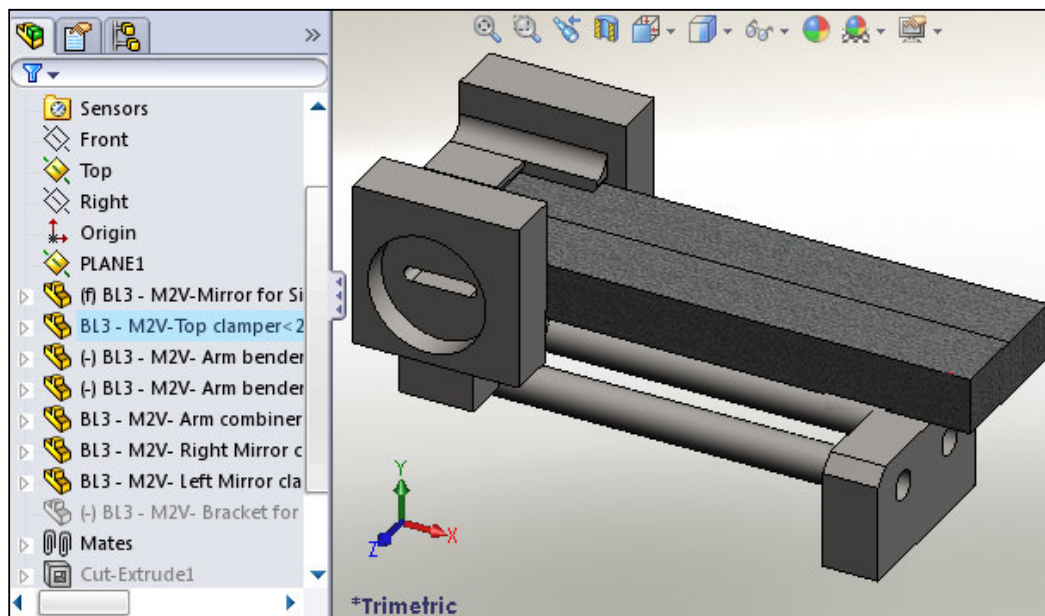
Postprocessing การแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณในรูปแบบชิ้นงาน หรือกราฟ เป็นต้น



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

### 3.3.2 การกำหนด Boundary condition

1. การจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks เริ่มจากการเตรียมชิ้นงานสำหรับจำลองซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนจับยึดและรูปร่างของวัสดุทดสอบที่เปลี่ยนไป โดยจำลองผลที่ครั้งหนึ่งของความยาววัสดุทดสอบ เนื่องจากระบบมีความสมมาตรเพื่อลดเวลาในการคำนวณของโปรแกรม แสดงหน้าต่างการเตรียมชิ้นงานดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเตรียมชิ้นงานสำหรับจำลองผลด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

2. กำหนดคุณสมบัติของวัสดุทดสอบสำหรับ Al Alloy(6061) แสดงดังรูปที่ 3.12 ส่วนโครงสร้างกลไกการขับเคลื่อนกำหนดเป็น Stainless steel (AISI 304)

3. กำหนดจุดจับยึด (Fixture) สำหรับเป็นแกนหมุนหรือระนาบสำหรับการให้โมเมนต์กับระบบ ซึ่งจะกำหนดสองที่ คือที่ระยะครึ่งหนึ่งของผิวหน้าวัสดุทดสอบและผิวด้านข้างของชุดจับยึดทั้งสองด้าน แสดงดังรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14

4. กำหนดแรงภายนอก (External Loads) ที่กระทำกับระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 4 แรงคือ (1) แรงที่เกิดจากการสวมอัด (2) แรงที่เกิดจากการกดทับ (3) แรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก และ (4) แรงดึงที่ให้กับระบบสำหรับการทดสอบที่ค่าต่าง ๆ ซึ่งแรงในข้อ 1-3 เป็นค่าคงที่ ที่กำหนดไว้เหมือนกันตลอดการทดลอง ส่วนแรงในข้อ 4 จะเปลี่ยนไปตามการทดลองซึ่งจะเริ่มจาก 0-350 นิวตัน การกำหนดพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.15-3.18

5. การกำหนด Mesh สำหรับเตรียมวิเคราะห์ผล ในที่นี้ใช้ Mesh ความละเอียดขนาด 5 มิลลิเมตร เนื่องจากผลที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับการกำหนด Mesh ที่ความละเอียด 1-5 มิลลิเมตรและยังช่วยลดเวลาในการประมวลผลของโปรแกรมอีกด้วย การกำหนด Mesh และผลการรันแสดงดังรูปที่ 3.19 และ รูปที่ 3.20

Material properties

Model Type:

For sliding friction treat as:

Units:   N/mm<sup>2</sup> (MPa)

Category:

Name:

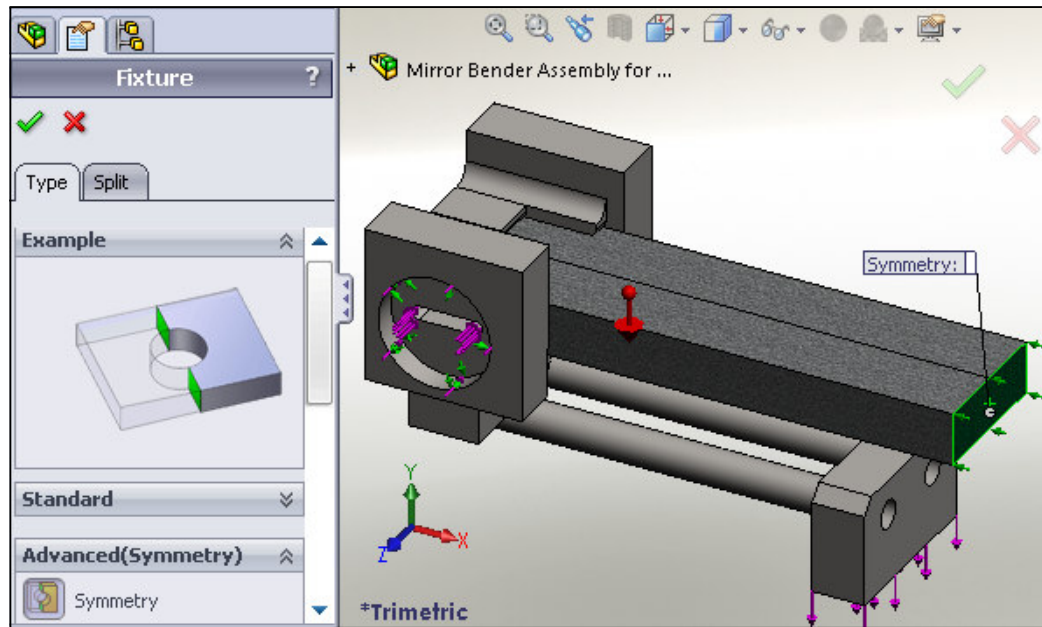
Description:

Source:

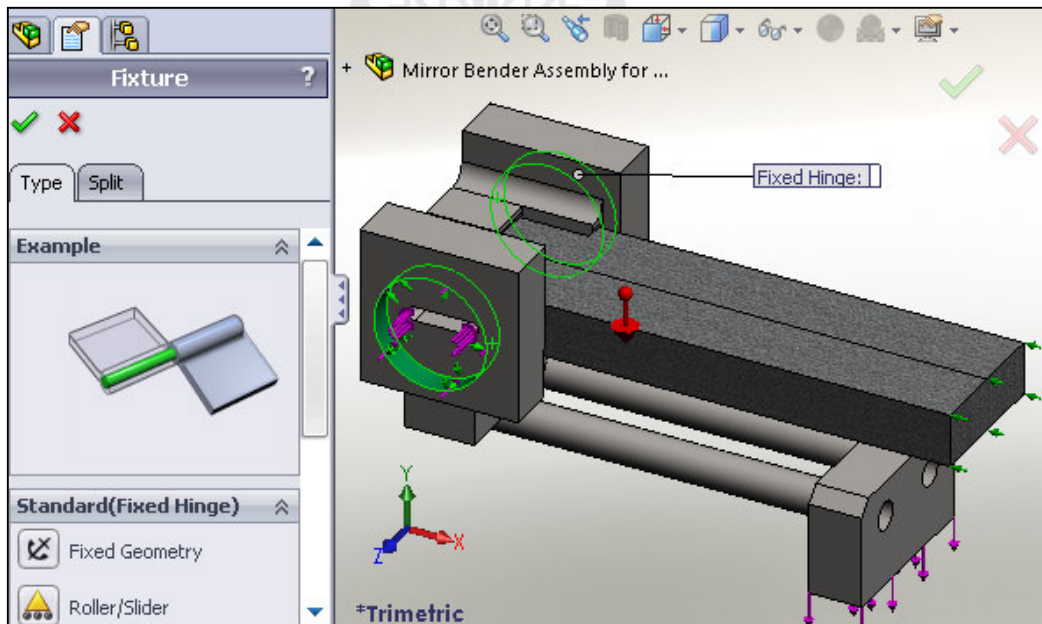
Default failure criterion:

Property	Value	Units	Temp Dependency
Elastic modulus	1.9e+011	N/m <sup>2</sup>	Constant
Poisson's ratio	0.29	NA	Constant
Shear modulus	7.5e+010	N/m <sup>2</sup>	Constant
Mass density	8000	kg/m <sup>3</sup>	Constant
Tensile strength	517017000	N/m <sup>2</sup>	Constant
Compressive strength		N/m <sup>2</sup>	Constant
Yield strength	206807000	N/m <sup>2</sup>	Constant
Thermal expansion coefficient	1.8e-005	/Kelvin	Constant
Thermal conductivity	16	W/(m.K)	Constant
Specific heat	500	J/(kg.K)	Constant
Material damping ratio		NA	Constant

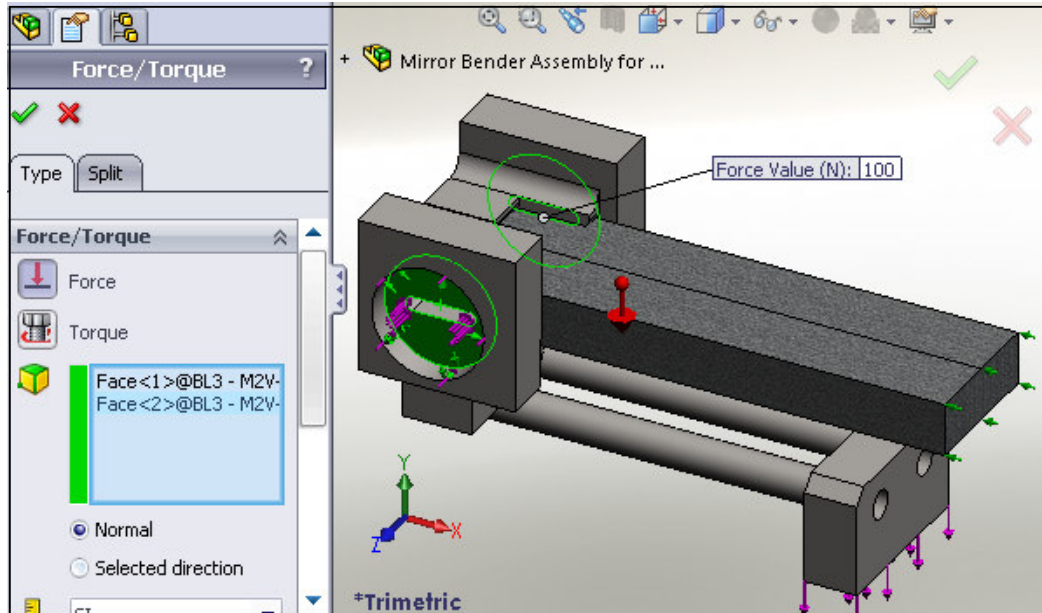
รูปที่ 3.12 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุทดสอบสำหรับ Al Alloy (6061)



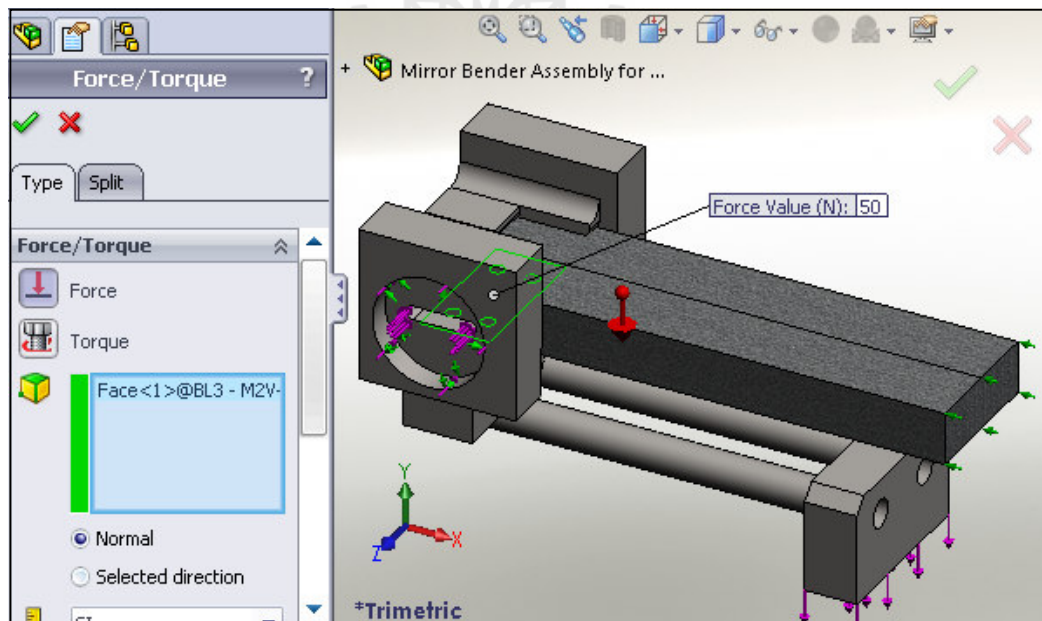
รูปที่ 3.13 การกำหนด Fixture ที่ระยะครึ่งหนึ่งของผิวหน้าวัสดุทดสอบ



รูปที่ 3.14 การกำหนด Fixture ที่ผิวด้านข้างของชุดจับยึดทั้งสองด้าน

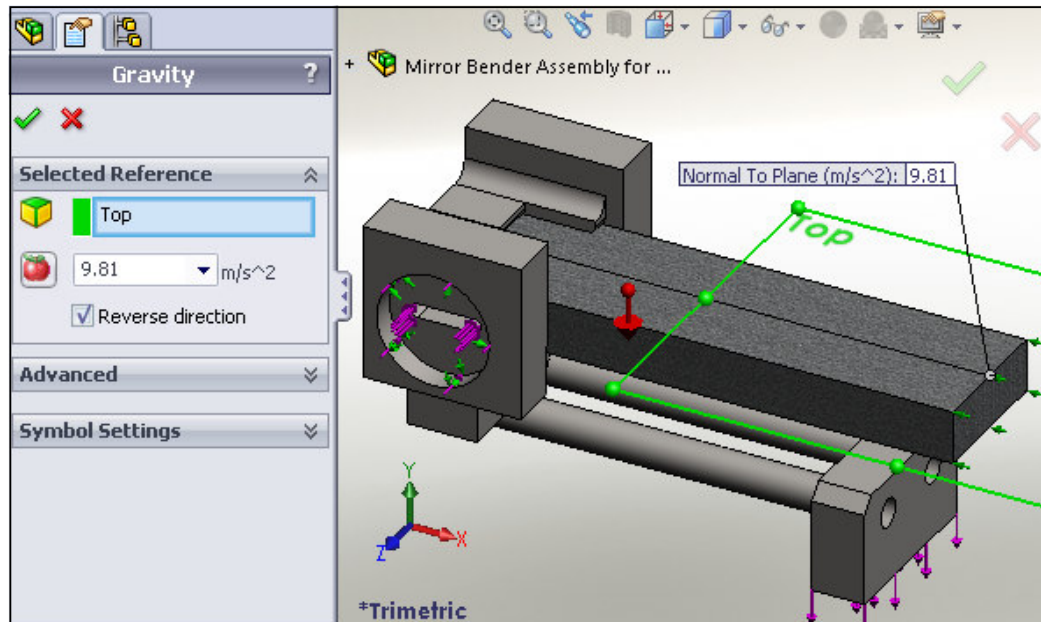


รูปที่ 3.15 การกำหนดแรง External Load สำหรับการสวมอัด

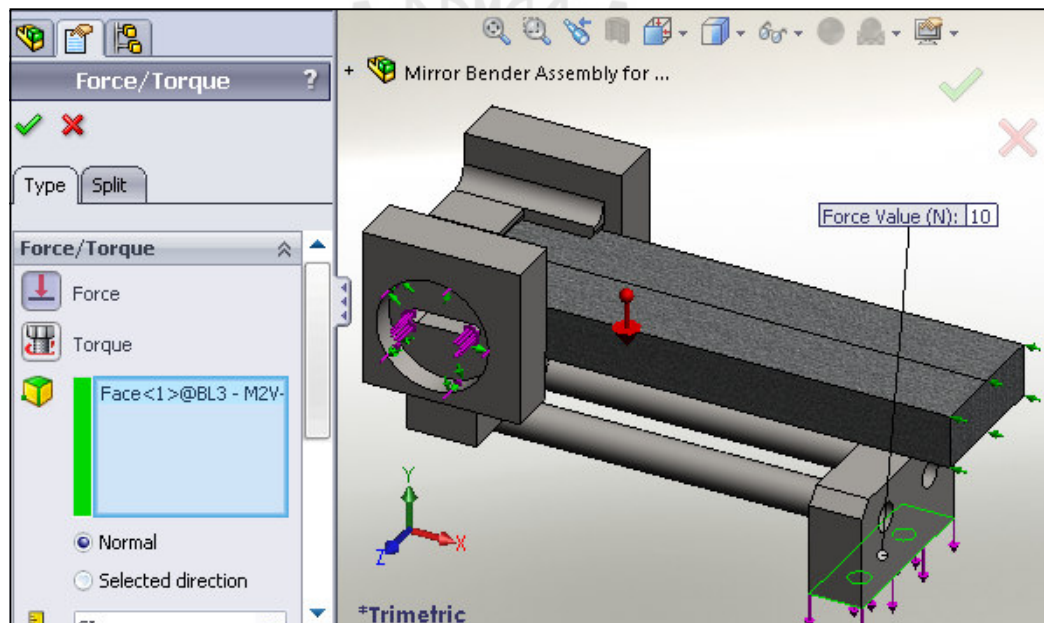


รูปที่ 3.16 การกำหนดแรง External Load สำหรับการกดทับ



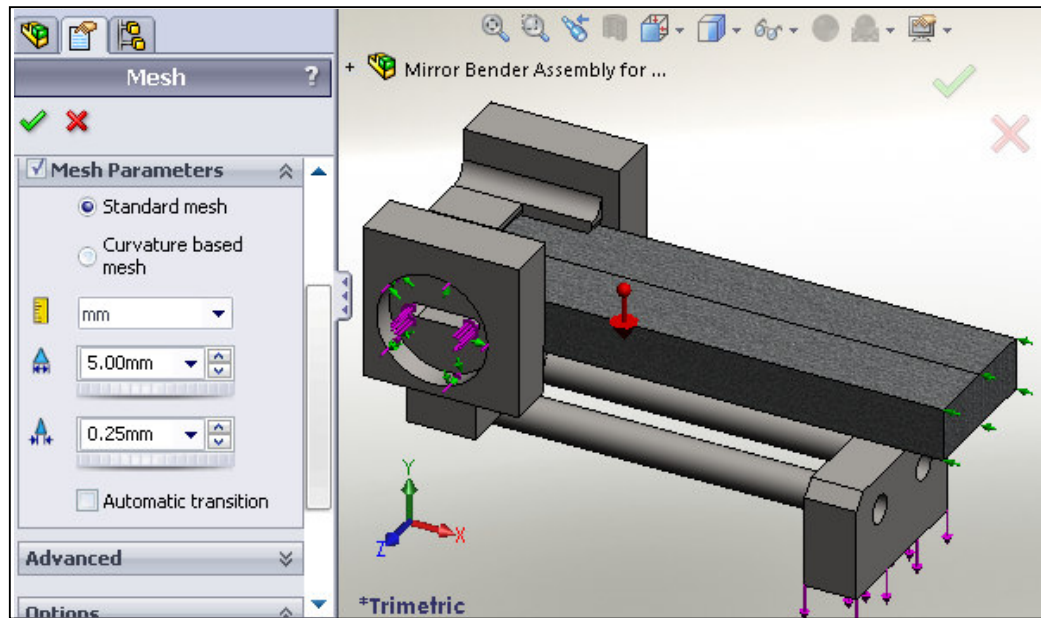


รูปที่ 3.17 การกำหนดแรง External Load สำหรับแรงโน้มถ่วงของโลก

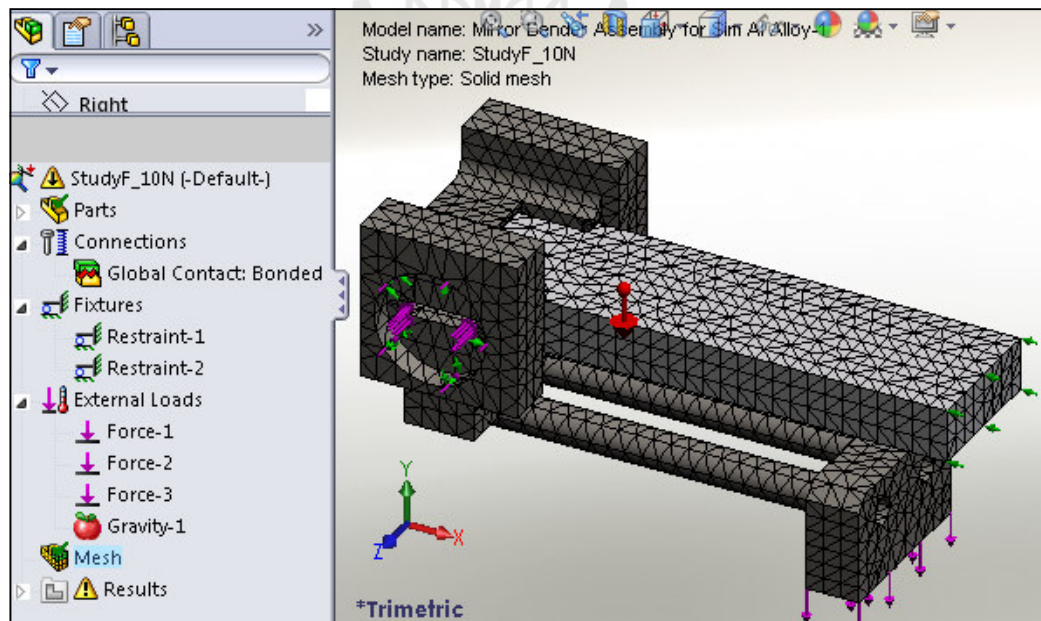


รูปที่ 3.18 การกำหนดแรง External Load สำหรับแรงดึงที่ให้กับระบบที่ค่าต่าง ๆ



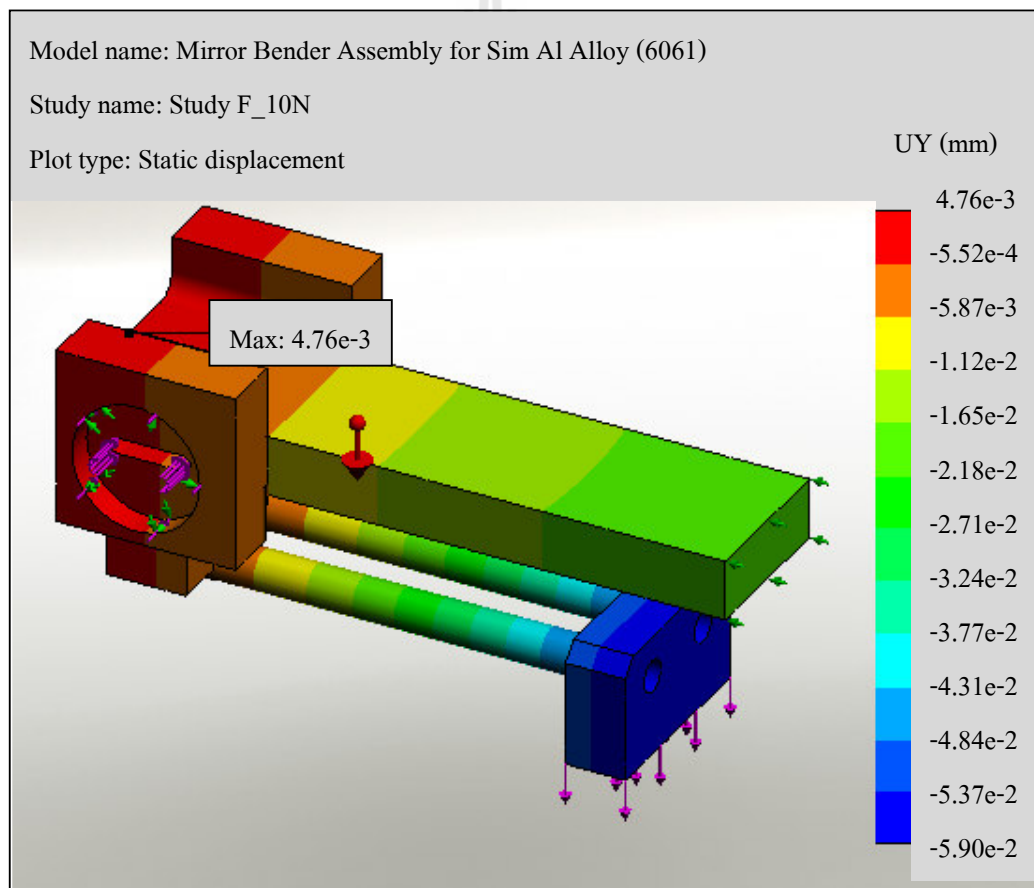


รูปที่ 3.19 การกำหนด Mesh สำหรับเตรียมการวิเคราะห์ผล



รูปที่ 3.20 ผลการกำหนด Mesh ที่ความละเอียด 5 มิลลิเมตร

จากการจำลองผลทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยนำโปรแกรม COSMOSWorks เข้าช่วยและกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแทนกระจกที่ทดสอบ สำหรับงานวิจัยนี้คือ AlAlloy(6061)และ Zerodur คุณสมบัติเฉพาะแสดงดังตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ ซึ่ง Zerodur เป็นกระจกจริงที่ใช้ในระบบลำเลียงแสงมีขนาดยาว 300 มิลลิเมตร x กว้าง 40 มิลลิเมตร x หนา 15 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลของแรงที่ให้กับระบบต่อค่ารัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวอย่างการจำลองผลทางวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.21 ซึ่งแถบสีต่าง ๆ จะแสดงถึงค่า stress ที่เกิดขึ้นกับระบบ จากรูปจะเห็นว่าแถบสีต่าง ๆ ที่เรียงจากด้านบนลงมาด้านล่างจะแสดงถึงค่า stress ที่มีค่ามากและน้อยลงตามลำดับ



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างการจำลองผลเบื้องต้นด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเฉพาะของ Al Alloy (6061)

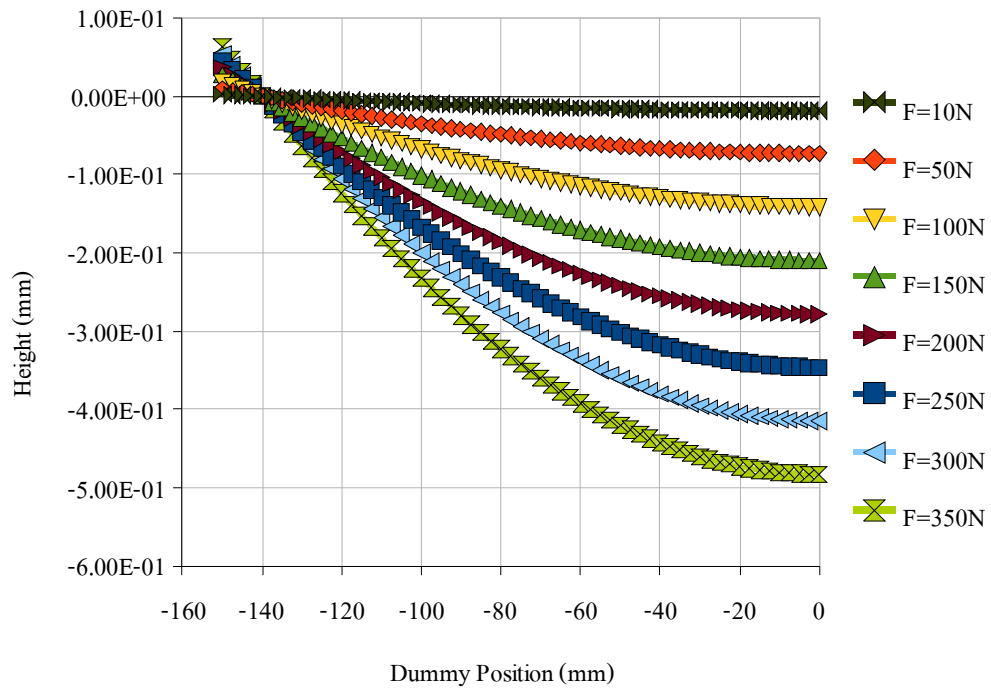
Property	Value	Unit
Elastic Modulus	69,000	N/mm <sup>2</sup>
Poissons Ratio	0.33	-
Shear Modulus	26,000	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	2.4x10 <sup>-5</sup>	-
Density	0.0027	g/mm <sup>3</sup>
Thermal Conductivity	170	W/m K
Specific Heat	1,300	J/Kg K
Yield Strength	55.1485	N/mm <sup>2</sup>

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติเฉพาะของ Zerodur

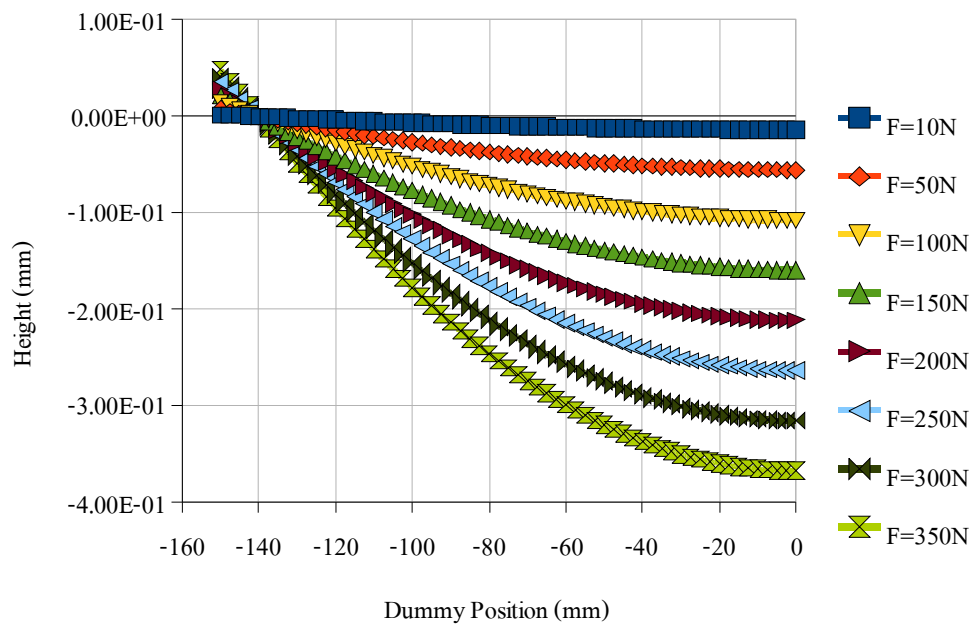
Property	Value	Unit
Elastic Modulus	92,000	N/mm <sup>2</sup>
Abbe Constant	66	-
Dispersion (n <sub>f</sub> -n <sub>c</sub> )	0.00967	-
Density	0.00253	g/mm <sup>3</sup>
Young's Modulus	9.1x10 <sup>9</sup>	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.24	-
Specific Heat	2.99329	J/Kg K
Coefficient of Thermal Expansion	0.05 ± 0.10x10 <sup>-6</sup>	/C° (20-30C°)
Maximum Temperature	600	C°

### 3.3.3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

ผลการจำลองของแรงที่ค่าต่าง ๆ เมื่อนำไปสร้างกราฟจะให้ความสัมพันธ์แสดงดังรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหารัศมีความโค้งโดยโปรแกรมเมทแลป (matlab) พบว่าเมื่อให้แรงกับระบบเพิ่มมากขึ้นจะทำให้รัศมีความโค้งมีค่าลดลงตามทฤษฎี ดังตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการจำลองผลดังกล่าวศึกษาที่ระยะครึ่งหนึ่งของความยาววัสดุทดสอบแทนกระจก เพื่อลดเวลาในการประมวลผลเนื่องจากระบบมีความสมมาตร



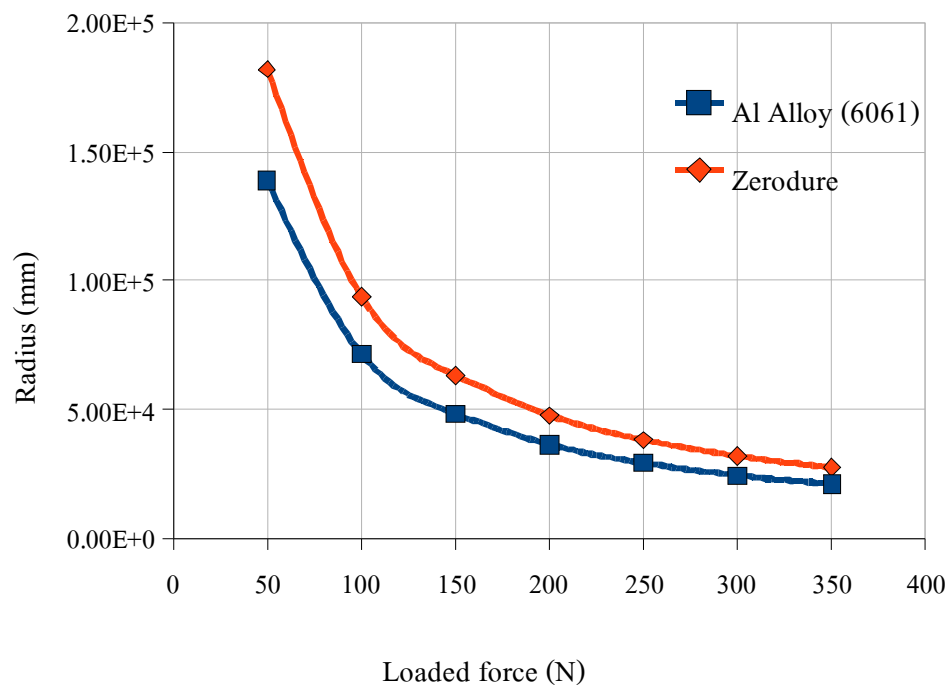
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Al Alloy (6061) กับระยะที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของ Zerodur กับระยะที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 3.4 รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าแรงที่ให้กับระบบระหว่าง Al Alloy (6061) และ Zerodur

Al Alloy (6061)			Zerodur		
Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)	Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)
10	556,051.00	2.006	10	731,806.00	2.008
50	138,868.00	8.497	50	182,034.00	8.298
100	71,633.30	16.580	100	93,859.80	16.200
150	48,283.50	24.670	150	63,239.80	24.500
200	36,411.00	32.400	200	47,679.70	32.010
250	29,230.70	40.830	250	38,259.20	40.056
300	24,411.30	48.920	300	31,954.60	48.590
350	20,957.20	57.000	350	27,437.70	55.730



รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไป

เมื่อนำผลที่ได้มาหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เกิดขึ้น โดยโปรแกรมเมทแลปจะได้รับความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.14 และสมการที่ 3.15 สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ โดยพิจารณาแรงในช่วง 50-350 นิวตัน ที่ R-square = 1

$$R_{AlAlloy(6061)} = -3e-7x^3 - 0.181x^3 + 42.63x^2 - 5,221 + 31,371 \quad (3.14)$$

$$R_{Zerodur} = 1e-9x^6 - 2e-6x^5 + 0.001x^4 - 0.4x^3 + 75.88x^2 - 8,034 + 43,720 \quad (3.15)$$

โดยที่  $x$  คือ ค่าของแรงที่ให้กับระบบมีหน่วยเป็นนิวตัน  
 $R$  คือ รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

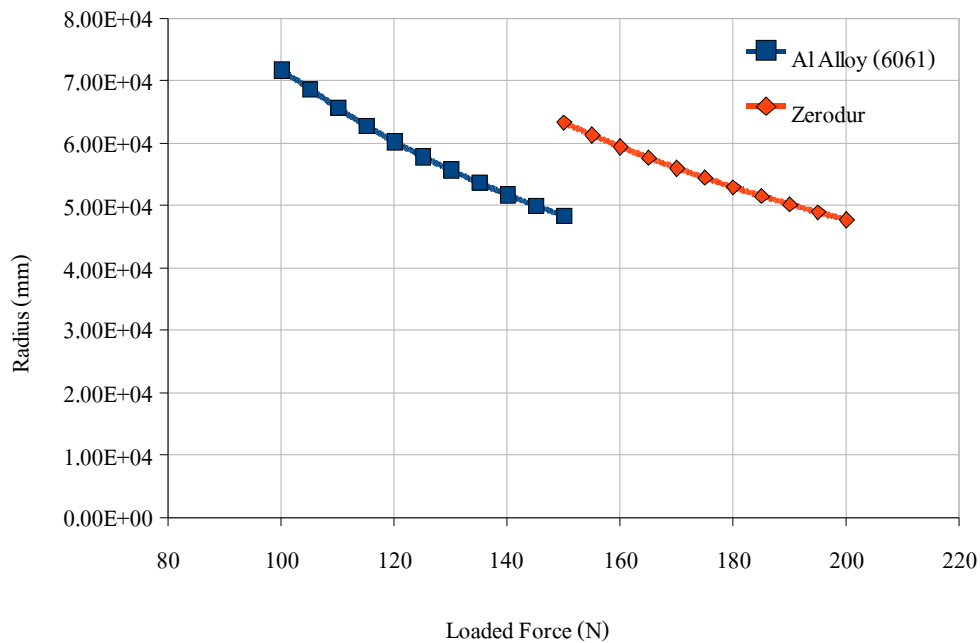
เมื่อพิจารณาผลจากการจำลองดังตารางที่ 3.4 ทำให้เราทราบว่าต้องใช้แรงในช่วง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ จึงจะทำให้ได้รัศมีความโค้งของวัสดุทดสอบตามที่ต้องการ ดังนั้นทำให้เราทราบช่วงของแรงที่ต้องให้กับระบบเบื้องต้นและเพื่อเป็นการพิจารณาค่าของแรงที่ความละเอียดมากขึ้นในช่วงดังกล่าว ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้นอีกด้วย โดยการจำลองผลในช่วงของแรงให้มีความถี่เพิ่มขึ้นซึ่งในที่นี้จำลองผลโดยการเพิ่มแรงทีละ 5 นิวตัน จากเดิมเพิ่มทีละ 50 นิวตัน โดยเริ่มจาก 100-150 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ 150-200 นิวตัน สำหรับ Zerodur ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแสดงดังตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.25

ตารางที่ 3.5 รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าแรงที่ให้กับระบบระหว่าง Al Alloy (6061) และ Zerodur ในช่วงของแรง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน ตามลำดับ

Al Alloy (6061)			Zerodur		
Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)	Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)
100	71,633.30	16.580	150	63,239.80	24.500
105	68,646.50	16.970	155	61,260.00	24.900
110	65,574.30	17.771	160	59,366.00	25.690
115	62,745.80	18.573	165	57,614.00	26.480

ตารางที่ 3.5 รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าแรงที่ให้กับระบบระหว่าง Al Alloy (6061) และ Zerodur ในช่วงของแรง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน ตามลำดับ (ต่อ)

Al Alloy (6061)			Zerodur		
Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)	Force (N)	Radius (mm)	Max von Mises Stress (MPa)
120	60,181.30	19.374	170	55,940.00	27.270
125	57,809.90	20.176	175	54,388.70	28.060
130	55,619.80	20.978	180	52,876.70	28.850
135	53,593.60	21.779	185	51,489.10	29.640
140	51,691.80	22.581	190	50,156.20	30.430
145	49,940.80	23.382	195	48,886.90	31.220
150	48,283.50	24.67	200	47,679.70	32.010



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ

จากข้อมูลที่ได้นำไปสร้างสมการความสัมพันธ์ของแรงในช่วง 100-150 นิวตัน และ 150-200 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ โดยพิจารณาที่ R-square = 0.9999 ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$R_{AlAlloy(6061)} = 3.148x^2 - 1,336x + 1.704e + 5 \quad (3.16)$$

$$R_{Zerodur} = 1.739x^2 - 918.1x + 1.618e + 5 \quad (3.17)$$

โดยที่  $x$  คือ ค่าของแรงที่ให้กับระบบมีหน่วยเป็นนิวตัน  
 $R$  คือ รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

### 3.3.4 สรุปผลการจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks

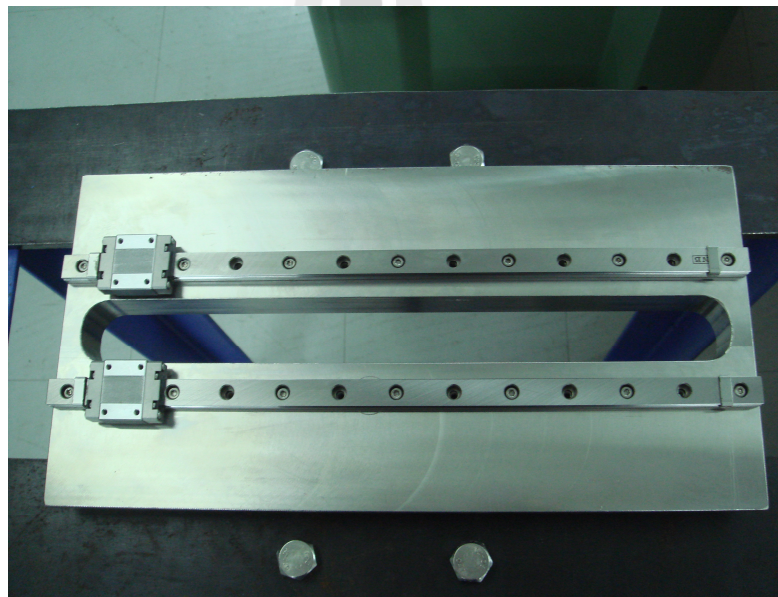
จากผลการจำลองระบบโดยให้แรงในช่วง 10-350 นิวตัน พบว่าค่ารัศมีความโค้งของวัสดุทดสอบทั้งสองชนิดเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 556,051.00-20,957.20 มิลลิเมตร และ 731,806.00-27,437.70 มิลลิเมตร สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ การออกแบบทางเทคนิคด้านระบบลำเลียงแสงพบว่าค่ารัศมีความโค้งที่สามารถปรับขนาดของลำแสงตามที่ต้องการนั้นอยู่ในช่วงประมาณ 50,000-60,000 มิลลิเมตร ผลการจำลองดังตารางที่ 3.4 พบว่าค่าแรงที่ให้กับระบบที่สามารถปรับค่ารัศมีความโค้งได้ในช่วงดังกล่าวต้องใช้แรงระหว่าง 100-150 นิวตันและ 150-200 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของระบบโดยรวมต่อค่าแรงต่าง ๆ ที่ให้กับระบบ โดยการพิจารณาค่า Max von Mises Stress เพื่อหาจุดแตกหักหรือความเสียหายที่จะเกิดขึ้น จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าค่าแรงที่ทำให้ระบบเริ่มเกิดความเสียหายคือ 300 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur โดยคิดที่ค่าความเค้นคราก 80 เปอร์เซ็นต์ของ Al Alloy (6061) และพิจารณาค่าของแรงที่ให้กับระบบโดยการเพิ่มความถี่ของข้อมูลมากขึ้น จากข้อมูลผลการจำลองเบื้องต้นดังตารางที่ 3.4 ทำให้เราทราบค่าช่วงของแรงที่จะทำให้ระบบสามารถปรับรัศมีความโค้งของวัสดุทดสอบได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นเมื่อทำการจำลองโดยให้แรงเพิ่มขึ้นทีละ 5 นิวตันในช่วงดังกล่าว ทำให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้นคือ ต้องใช้แรงในช่วง 120-145 นิวตัน และ 155-195 นิวตัน สำหรับ Al Alloy (6061) และ Zerodur ตามลำดับ และเมื่อทำการ fit curve หาสมการความสัมพันธ์จะได้สมการความสัมพันธ์โพลิโนเมียลอันดับ 2



ดังสมการที่ 3.16 และ 3.17 จากข้อมูลข้างต้นเมื่อพิจารณาผลการจำลองพบว่ามีความเป็นไปได้ที่ระบบดังกล่าวสามารถนำไปสร้างได้จริง และเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาต่อไป

### 3.4 การสร้างระบบจริง

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลจำลองด้วยโปรแกรม COSMOSWorks เพื่อหาแนวทางความเป็นไปได้สำหรับการสร้างระบบจริง ในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าสามารถปรับค่ารัศมีความโค้งได้ในช่วงที่ต้องการคือ 50,000-60,000 มิลลิเมตร ตามการออกแบบทางเทคนิคด้านระบบลำเลียงแสง แสดงว่าต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีโอกาสทำงานได้ตามที่ต้องการแต่ทั้งนี้ในการสร้างระบบจริงอาจมีปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ผลจากการประกอบระบบ การสวมอัด เป็นต้น เมื่อได้ต้นแบบพร้อมรายละเอียดทางวิศวกรรม จากนั้นจะเป็นการนำไปสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งแสดงรายละเอียดตามแบบทางวิศวกรรมตามภาคผนวก ข และตัวอย่างชิ้นงานที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ฐานรองรับ โครงสร้างกลไกขับเคลื่อน

## บทที่ 4

### การออกแบบระบบควบคุมและโปรแกรมอินเตอร์เฟส

การพัฒนา ระบบควบคุมชุดปรับความโค้งของกระจกเพื่อให้ระบบทำงานตามที่ต้องการ นั้นออกแบบโดยใช้สเตปปีงมอเตอร์ (Stepping moter) เป็นตัวขับเคลื่อนกลไกของระบบทั้งหมด และควบคุมผ่านโปรแกรมอินเตอร์เฟส (Interface program) ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมแลปวิว (LabVIEW) โดยการติดต่อผ่านระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อให้สเตปปีงมอเตอร์ทำงานตามคำสั่งที่ต้องการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาจากคำ 2 คำ คำหนึ่งคือ ไมโคร (Micro) หมายถึงขนาดเล็ก และ คำว่าคอนโทรลเลอร์ (Controller) หมายถึง ตัวควบคุมหรืออุปกรณ์ควบคุมระบบต่าง ๆ ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงหมายถึง อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก แต่ในตัวอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กนี้ ได้บรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ที่คนโดยส่วนใหญ่คุ้นเคย กล่าวคือภายใน ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกันโดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน

##### โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วนใหญ่ ๆ ดังต่อไปนี้

1. หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU: Central Processing Unit)

2. หน่วยความจำ (Memory) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ หน่วยความจำที่มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) เปรียบเสมือนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะคือ ข้อมูลใด ๆ ที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายถึงแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือ หน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ใช้เป็นเหมือนกระดานชดในการคำนวณของซีพียู และเป็นที่พักข้อมูลชั่วคราวขณะทำงาน แต่หากไม่มีไฟเลี้ยงจ่ายไว้ ข้อมูลก็จะหายไปคล้ายกับหน่วยความจำแรม (RAM) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป แต่สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์สมัยใหม่ หน่วยความจำข้อมูลจะมีทั้งที่เป็น

หน่วยความจำแรม ซึ่งข้อมูลจะหายไปเมื่อไม่มีไฟเลี้ยง และเป็นอีอีพรอม (EEPROM: Erasable Electrically Read-Only Memory) ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้แม้ไม่มีไฟเลี้ยง

3. ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหรือพอร์ต (Port) มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้จะใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันระหว่างพอร์ตอินพุต เพื่อรับสัญญาณ อาจจะใช้การกดสวิทช์ เพื่อนำไปประมวลผลและส่งไปพอร์ตเอาต์พุตเพื่อแสดงผล เช่น การติดสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น

4. ช่องทางเดินของสัญญาณ หรือบัส (BUS) คือ เส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่าง ซีพียู หน่วยความจำและพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยแบ่งเป็นบัสข้อมูล (Data Bus) บัสแอดเดรส (Address Bus) และบัสควบคุม (Control Bus) บัสข้อมูลเป็นสายสัญญาณที่บรรจุข้อมูล เพื่อการประมวลผลทั้งหมด ขนาดของบัสจะขึ้นอยู่กับความสามารถการประมวลผลของซีพียู สำหรับในงานทั่ว ๆ ไป ขนาดของบัสข้อมูลจะเป็น 8 บิตและในปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นมาจนถึง 16 32 และ 64 บิต

บัสแอดเดรสเป็นสายสัญญาณที่บรรจุค่าตำแหน่งของหน่วยความจำ โดยการติดต่อกับหน่วยความจำนั้น ซีพียูต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการอ่านหรือเขียนก่อน ดังนั้นจำนวนสายสัญญาณของแอดเดรสจึงต้องมีจำนวนมาก ยิ่งมากเท่าไรก็จะเป็นการแสดงความขนาดของหน่วยความจำที่ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถติดต่อได้โดยสามารถคำนวณได้จากจำนวนแอดเดรสของหน่วยความจำเท่ากับ 2 ยกกำลัง  $n$  ( $n$  คือ จำนวนของเส้นทาง)

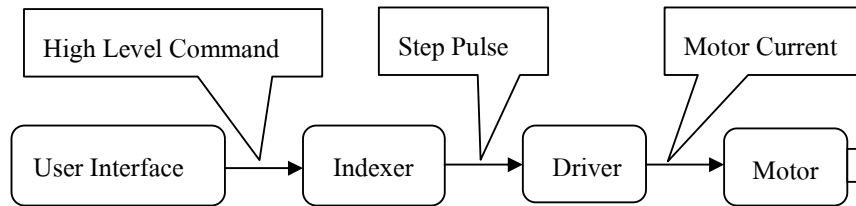
ยกตัวอย่าง ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวหนึ่งมีสายแอดเดรส 10 เส้น ดังนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้สามารถติดต่อกับหน่วยความจำได้ 2 ยกกำลัง  $10 = 1,024$  ตำแหน่ง

หากต้องการทราบความจุของหน่วยความจำจริง ๆ จะต้องทราบถึงขนาดของบัสข้อมูลก่อนว่าเป็นเท่าใด หากเป็น 8 บิต ความจุของหน่วยความจำที่มีสายแอดเดรส 10 เส้น จะเท่ากับ  $8 \times 1,024 = 8,192$  บิต และ 1 กิโลไบต์ เท่ากับ 1,024 ไบต์ ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์ดังกล่าวจึงมีความจุของหน่วยความจำเท่ากับ 8,192 บิต หรือ 1,024 ไบต์ หรือ 1 กิโลไบต์

บัสควบคุมเป็นกลุ่มของสายสัญญาณควบคุมการติดต่อทั้งหมดของซีพียูกับหน่วยความจำและพอร์ต สำหรับสายสัญญาณเลือกควบคุมหลัก ได้แก่ สายสัญญาณเลือกอ่านหรือเขียนหน่วยความจำ สายสัญญาณเลือกอ่านหรือเขียนข้อมูลกับพอร์ต

5. วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากการทำงานที่เกิดขึ้นในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ จะขึ้นอยู่กับการทำงานจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้นส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

## 4.2 การออกแบบระบบควบคุม



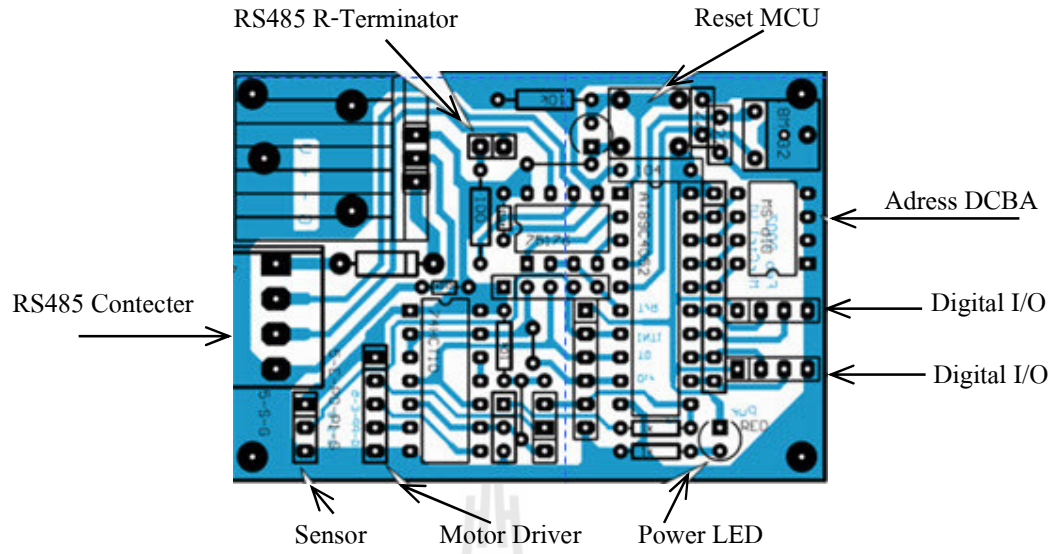
รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมมอเตอร์

การควบคุมมอเตอร์โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนหลัก 4 ส่วน คือ

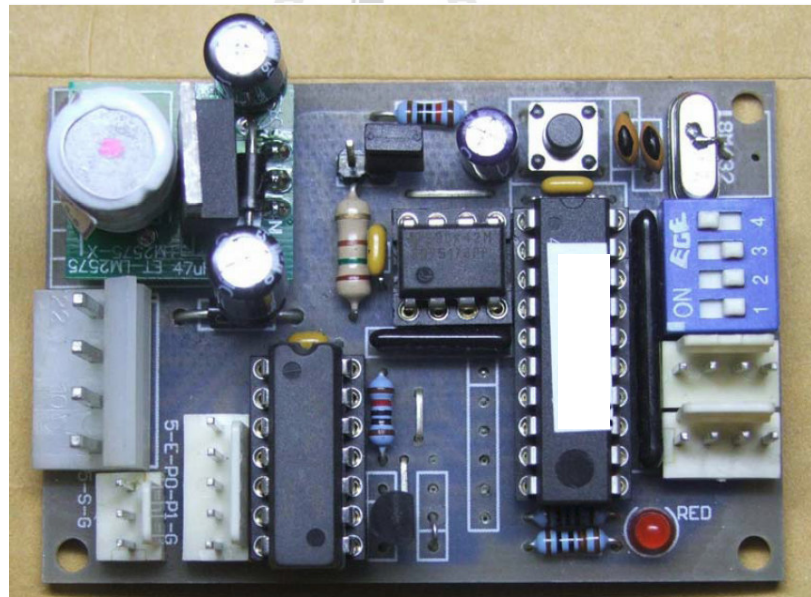
1. ตัวเชื่อมระหว่างผู้ใช้งานและโปรแกรม (User Interface) คือ ส่วนที่ส่งคำสั่งขั้นสูง เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือระบบพีแอลซี (PLC) อุปกรณ์นี้ควบคุมโดยโปรแกรมขั้นสูง เช่น ภาษาซี แลปวิวและ Visual Basic (VB) เป็นต้น
2. ฟังก์ชันติดต่อระหว่างผู้ใช้งานและไมโครคอนโทรลเลอร์ (Indexer/Controller) คือ รับข้อมูลขั้นสูงแล้วแปลงเป็นสเตปพัลส์ (Step pulse) สำหรับควบคุมสเตปปีงมอเตอร์และพัลส์วิธมอดูเลชัน (Pulse Width Modulation) สำหรับควบคุมการทำงานของดีซีมอเตอร์หรือทิศทางสำหรับควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์
3. ไดรเวอร์ (Driver) คือ ส่วนรับสัญญาณสเตปพัลส์ พัลส์วิธมอดูเลชันหรือสัญญาณทิศทางแล้วทำการสวิทซ์ และขยายสเตปพัลส์ให้แรงพอที่จะจ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์
4. มอเตอร์ (Motor) คือ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่รับมาจากไดรเวอร์เป็นการหมุนตามทิศทางและลำดับการสวิทซ์

### 4.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับระบบปรับความโค้งกระจก

ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 5 เฟสซึ่งพัฒนาขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลีแสดงดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 และมีฟังก์ชันการทำงานดังนี้



รูปที่ 4.2 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และตำแหน่งการควบคุมต่างๆ



รูปที่ 4.3 ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์จริงที่ใช้งาน

### ฟังก์ชันการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ประกอบไปด้วย

- ชุดคำสั่งให้มอเตอร์หมุน (Run) และหยุดหมุน (Stop)
- ชุดคำสั่งสำหรับกำหนดค่าจำนวนสเตปการหมุนต่อรอบ
- ชุดคำสั่งให้มอเตอร์หมุนตาม/ทวน เข็มนาฬิกาต่อเนื่อง
- ชุดคำสั่งให้มอเตอร์หมุนตาม/ทวน เข็มนาฬิกาเป็นจำนวนรอบ
- ชุดคำสั่งให้มอเตอร์หมุนตาม/ทวน เข็มนาฬิกาเป็นจำนวนสเตป
- ชุดคำสั่งให้มอเตอร์ไปตำแหน่งอ้างอิงในทิศทางตาม/ทวน เข็มนาฬิกา
- ตัวบอร์ดมีสวิทช์สำหรับตำแหน่งอ้างอิง
- ตัวบอร์ดมีสวิทช์ซ้ายและขวา เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน เมื่อสวิทช์มีสถานะออน มอเตอร์จะหยุดหมุนทันที
- ชุดคำสั่งสำหรับควบคุมดิจิตอล I/O 8 ช่องแยกอิสระ
- มีพอร์ตสำหรับต่อเซนเซอร์นับรอบการหมุน
- ชุดคำสั่งสำหรับนับรอบการหมุน
- มี LED แสดงสถานะการทำงาน
- สามารถต่อเป็นโครงข่ายได้สูงสุด 32 ตัว
- การสื่อสารผ่านระบบอนุกรม RS485 ด้วย Baud Rate 9600, n, 8, 1
- การสื่อสารผ่านระบบอนุกรม RS232 สำหรับโปรแกรมคีย์บอร์ดและโปรแกรมโหลด

#### 4.2.2 การกำหนดชุดคำสั่งและสัญญาณควบคุม

เพื่อเป็นการทดสอบวงจรและการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น ดังนั้นจึงใช้โปรแกรม Hyper Terminal เพื่อทดสอบหาความผิดพลาดของระบบก่อนนำไปพัฒนาต่อด้วยโปรแกรมแลปวิว มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. รันโปรแกรม Hyper Terminal
2. ตั้งค่าบิตเรทการรับส่งข้อมูลเป็น 9600, n, 8, 1 ในโหมดของ Null Modem
3. พิมพ์ “?” สำหรับการแสดงชุดคำสั่งทั้งหมด แสดงดังรูปที่ 4.4

```

#Stepper Motor Control

SetHsp s xx => Set Hi-Speed xx (01-99)
SetLsp s xx => Set Hi-Speed xx (01-99)

SetPPR s xxxx => Set Pulse Per Revolution xxxx (0001-9999)

MHsOrg s d ==> Move Hi-Speed unit Switch "Org" On
MLsOrg s d ==> Move Lo-Speed unit Switch "Org" On

HCMove s d ==> Hi-Speed Continuous Move
LCMove s d ==> Lo-Speed Continuous Move

HPMove s d xxxx ==> Hi-Speed Move xx (9999) Pulse
LPMove s d xxxx ==> Lo-Speed Move xx (9999) Pulse

HRMove s d xx ==> Hi-Speed Move xx (99) Revolution Pulse
LRMove s d xx ==> Lo-Speed Move xx (99) Revolution Pulse

MtSlow s ==> Slow Down ID (S) to Lo-Speed
MtStop s ==> Stop Immediately ID (S)

#Digital Control

IOCLrB s x ==> Digital I/O Clear Bit x (0-1).ID(S)
IOSetB s x ==> Digital I/O Set Bit x (0-1).ID(S)

IORead s ==> Digital I/O Read <ER SR Org SL EL, IO_1 IO_0>

```

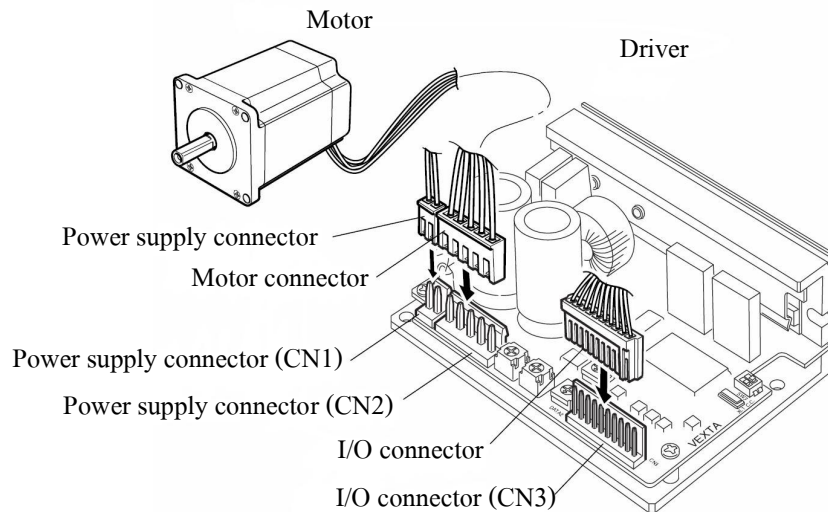
รูปที่ 4.4 ชุดคำสั่งทั้งหมดสำหรับการควบคุม

### 4.3 สเตปปีงมอเตอร์และไดร์เวอร์

สเตปปีงมอเตอร์สำหรับการควบคุมกลไกขับเคลื่อนส่วนต่าง ๆ ของระบบปรับความโค้ง กระจกแบบสองแขนประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นมอเตอร์สำหรับการให้โมเมนต์ ด้านซ้ายและด้านขวาของระบบ ส่วนที่สองเป็นมอเตอร์สำหรับการขับเคลื่อนเครื่องมือวัดตำแหน่ง หรือ Diginatic Indicator โดยการเลื่อนไปตามแนวความยาวของวัสดุทดสอบเพื่อเก็บค่าพารามิเตอร์ของความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการให้แรงดึงกับระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สเตปปีงมอเตอร์ชนิด 5 เฟสยี่ห้อ VAXTA สำหรับการควบคุม

### 4.3.1 ส่วนประกอบและหลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

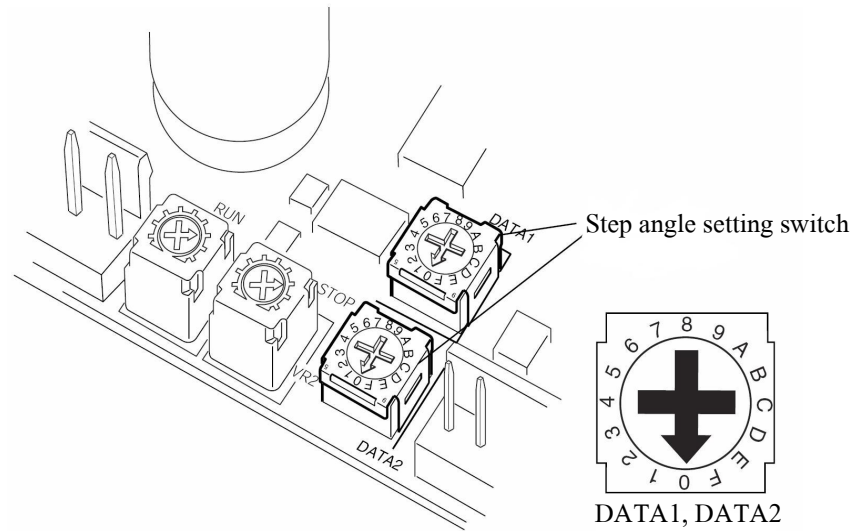
สเตปปีงมอเตอร์สำหรับการควบคุมระบบประกอบไปด้วยสองส่วนคือ มอเตอร์ และไดรเวอร์แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 มอเตอร์และไดรเวอร์สำหรับควบคุมระบบ (Oriental Motor, 2004)

ซึ่งการทำงานของมอเตอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมชุดไดรเวอร์โดยการป้อน สัญญาณพัลส์เพื่อกำหนดคำสั่งต่าง ๆ สำหรับการทำงาน เช่น ทิศทางการหมุน จำนวนสเตปต่อรอบ หรือการสั่งหยุดทำงาน เป็นต้น ซึ่งลักษณะไดรเวอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 มีส่วนที่สำคัญสำหรับการปรับค่าสัญญาณต่าง ๆ คือ การปรับจำนวนสเตปต่อรอบ การปรับ ค่ากระแสมอเตอร์เวลาทำงาน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่ากระแสพิค และ การปรับค่ากระแสหยุด ทำงาน





รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการปรับเตปการหมุนของมอเตอร์ (Oriental Motor, 2004)

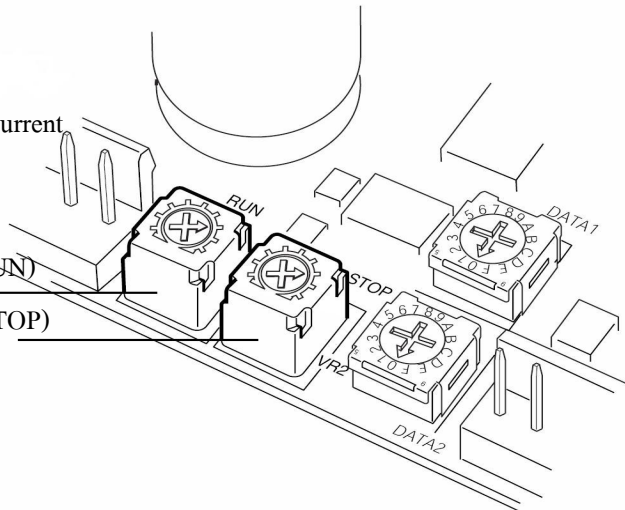
Factory settings

RUN: Motor rate current

STOP: About 50% of motor's rated current

Motor-run current-potentiometer (RUN)

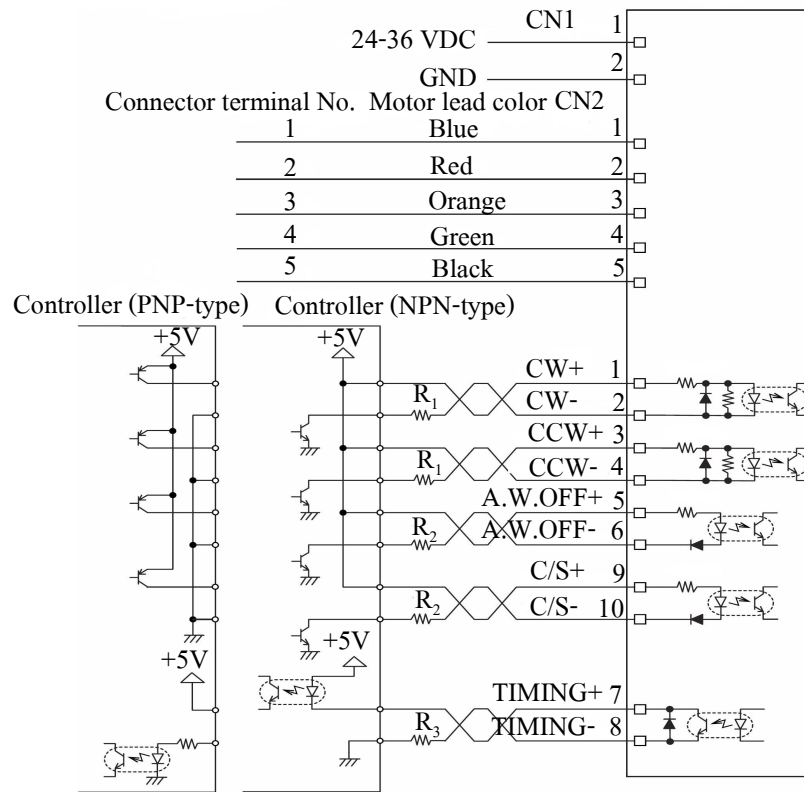
Motor-stop current-potentiometer (STOP)



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการปรับกระแสมอเตอร์ RUN-STOP (Oriental Motor, 2004)

สำหรับการต่อสายสัญญาณระหว่างไดรเวอร์ไปยังมอเตอร์และสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับการต่อสัญญาณไปยังมอเตอร์นั้นประกอบไปด้วยสายสัญญาณจำนวน 5 เส้นเนื่องจากเป็นมอเตอร์ชนิด 5 เฟส ซึ่งการทำงานก็จะหมุนเป็นสเตปตามจังหวะสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้กับไดรเวอร์ ส่วนการต่อสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้

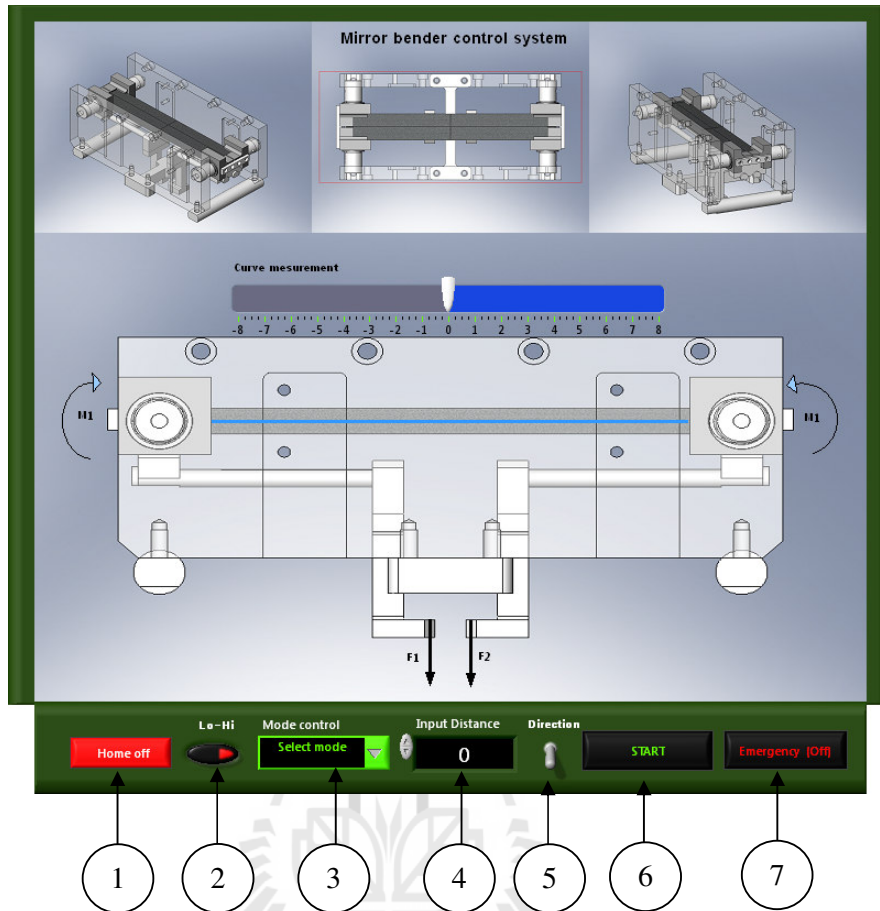
สายสัญญาณจำนวน 6 เส้น ประกอบไปด้วย สายสัญญาณกำหนดทิศทางหมุนซ้ายหรือขวา 2 เส้นและการหยุดทำงาน 1 เส้น ส่วนอีก 3 เส้นที่เหลือเป็นการต่อไฟเลี้ยงไว้ กล่าวคือ เมื่อมีสัญญาณพัลส์เข้ามาจะทำให้สัญญาณถูกต่อลงกราวด์ทันทีหรือครบวงจรนั่นเอง



รูปที่ 4.8 การต่อสายสัญญาณควบคุมมอเตอร์ (Oriental Motor, 2004)

#### 4.4 การออกแบบโปรแกรมอินเตอร์เฟส

เมื่อเราได้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์และรูปแบบคำสั่งการทำงานตามที่ต้องการแล้วต่อไปจะเป็นการออกแบบโปรแกรมควบคุมระบบขับเคลื่อนกลไกปรับความโค้ง และวัดความโค้งที่เกิดขึ้นจากการให้แรงดึงกับระบบ ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมแลปวิว มีหน้าตาสำหรับการใช้งานดังรูปที่ 4.9 และมีขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรมควบคุมสำหรับติดต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งงานมอเตอร์มีรายละเอียดดังนี้

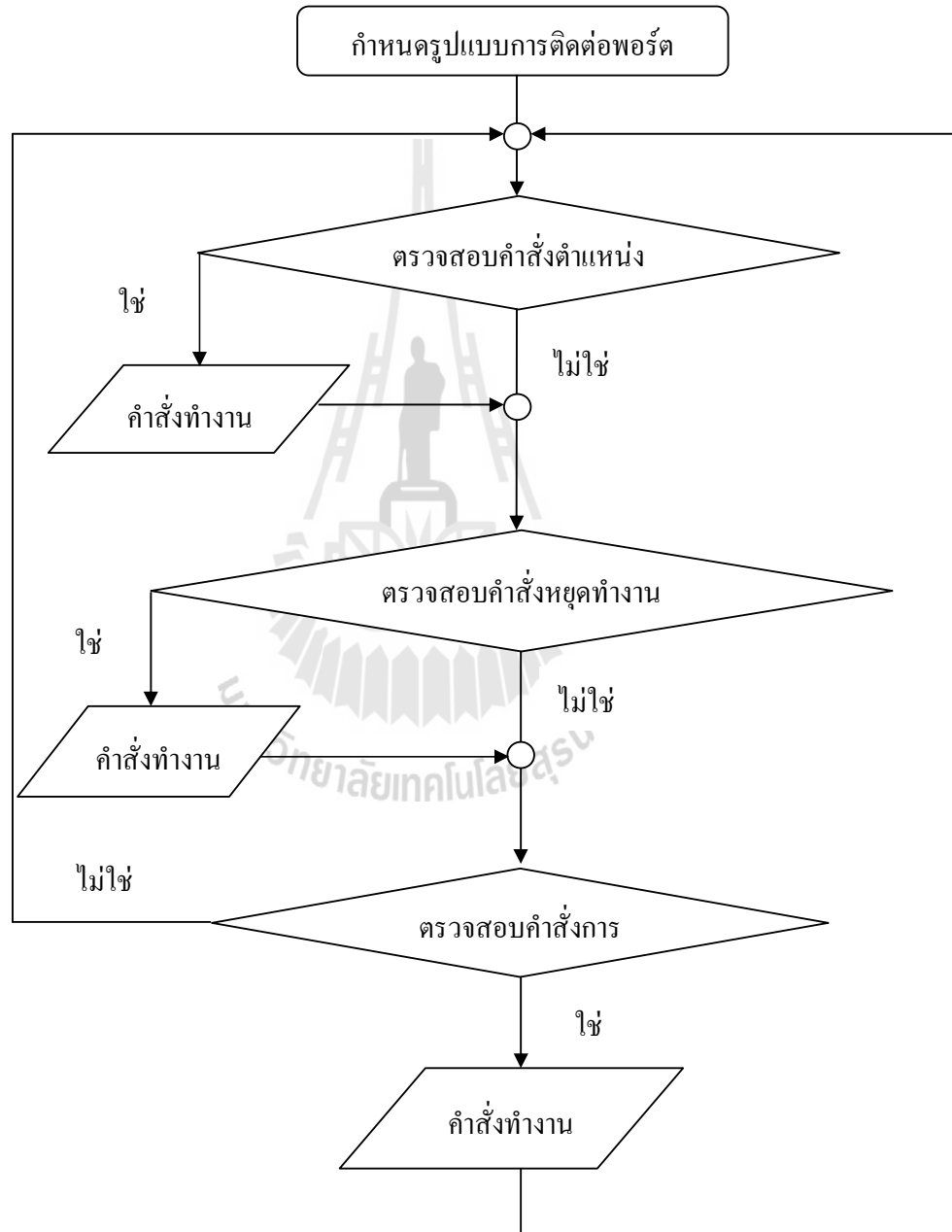


รูปที่ 4.9 หน้าต่างโปรแกรมควบคุมระบบปรับความโค้งที่พัฒนาขึ้นจากแลปวิว

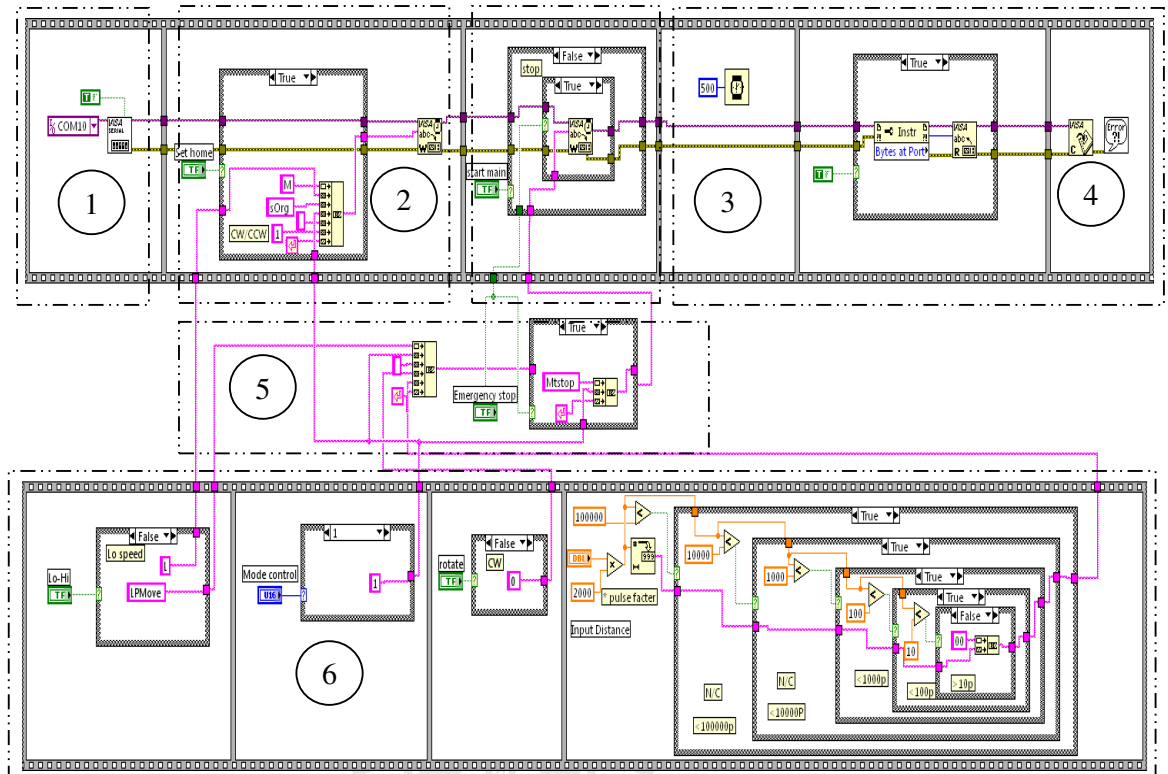
การออกแบบโปรแกรมประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกจะเป็นการออกแบบ SubVI เพื่อติดต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบหน้าต่างสำหรับใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.9 มีฟังก์ชันการใช้งานแสดงตามหมายเลขดังนี้ (1) โหมดควบคุมตำแหน่งอ้างอิง (2) โหมดควบคุมความเร็ว (ช้า/เร็ว) (3) โหมดควบคุมตำแหน่งการทำงานของมอเตอร์ (4) โหมดกำหนดระยะเวลาการเคลื่อนที่ (5) โหมดเลือกทิศทางเคลื่อนที่ (6) โหมดสั่งให้เริ่มทำงาน และ (7) โหมดสั่งหยุดแบบฉุกเฉิน

#### 4.4.1 การออกแบบ SubVI สำหรับติดต่อระบบไมโครคอนโทรลเลอร์

การออกแบบโปรแกรมย่อยหรือ SubVI ในโปรแกรมแลปวิวสำหรับชุดคำสั่งหลักในการควบคุมมอเตอร์มีลำดับการทำงานของสิ่งดังรูปที่ 4.10 และหน้าต่างคำสั่งที่เขียนด้วยโปรแกรมแลปวิว แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งประกอบส่วนต่าง ๆ 6 ส่วนดังนี้

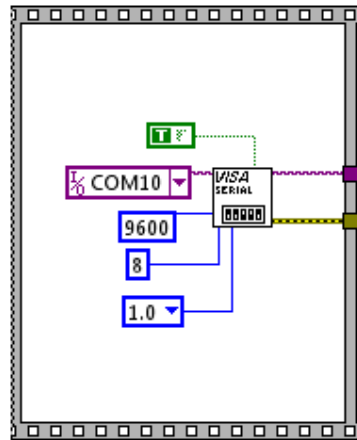


รูปที่ 4.10 ลำดับฟังก์ชันการทำงานของ SubVI



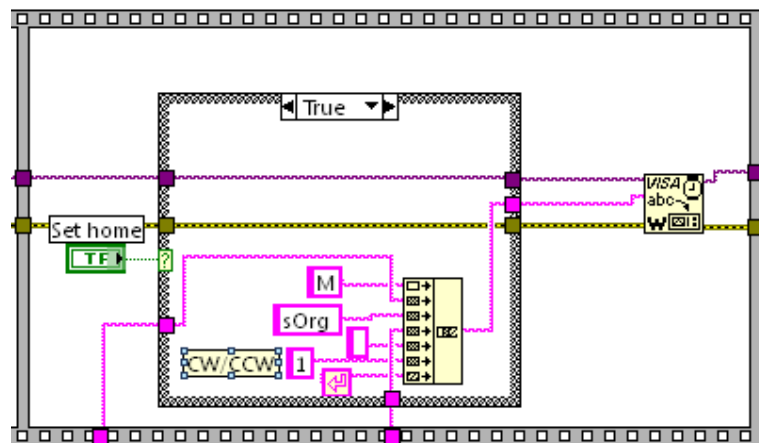
รูปที่ 4.11 หน้าต่างผังชั้นการทำงานที่เขียนด้วยแลปวิว

ส่วนที่ 1 กำหนดรูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบอนุกรมแสดงดังรูปที่ 4.12 ประกอบไปด้วยการตั้งค่าคอมพอร์ตอินพุตและบิตเรทการรับส่งข้อมูลคือ 9600, n, 8, 1



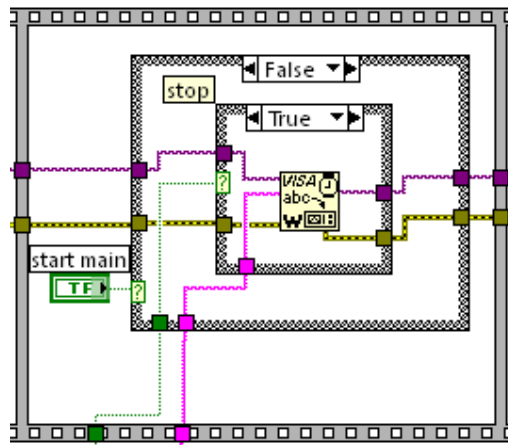
รูปที่ 4.12 การตั้งค่าติดต่อสื่อสารแบบอนุกรม

ส่วนที่ 2 เป็นการกำหนดรูปแบบคำสั่งตำแหน่งอ้างอิงแสดงดังรูปที่ 4.13 คือคำสั่ง **MLsOrg s d** เมื่อ MLsOrg/MHsOrg คือ การกำหนดคำสั่งเคลื่อนที่แบบช้า (MLsOrg) หรือการเคลื่อนที่แบบเร็ว (MHsOrg) โดยที่ s คือ การกำหนดตำแหน่งของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุมตัวที่ 1 2 หรือ 3 และ d คือ กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ มีเท่ากับ 0 หรือ 1 คือหมุนตามเข็มนาฬิกา



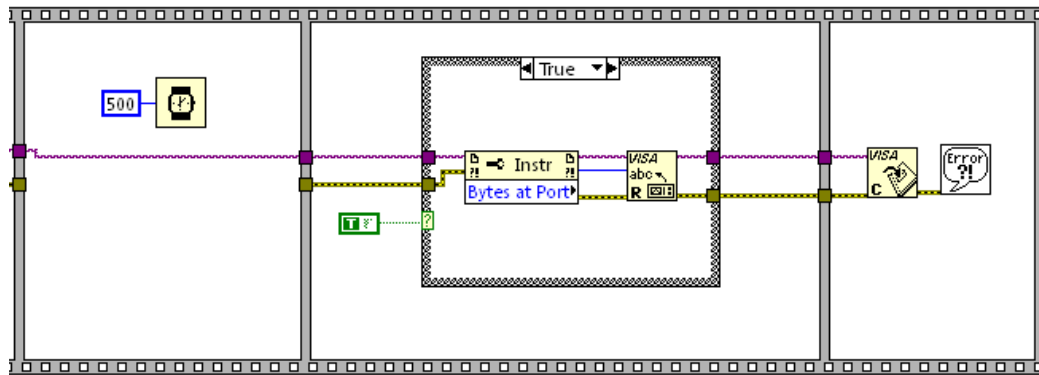
รูปที่ 4.13 การกำหนดรูปแบบคำสั่งตำแหน่งอ้างอิง

**ส่วนที่ 3** เป็นการกำหนดรูปแบบคำสั่งเริ่มทำงานหรือหยุดทำงานแบบฉุกเฉิน แสดงดังรูปที่ 4.14 มีรูปแบบคำสั่งคือ การทำงานแบบต่อเนื่อง การทำงานแบบเป็นสเตป หรือคำสั่งหยุดการทำงาน เช่น คำสั่ง **LPMove 1 0 1000** คือ การเคลื่อนที่แบบช้าของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจำนวน 1000 พัลส์เมื่อ LPMove /HPMOve คือ กำหนดการเคลื่อนที่แบบช้าหรือเร็ว ตัวเลขถัดมาคือ 1 แสดงตำแหน่งของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม ตัวเลขถัดมาคือ 0 เป็นการกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา และตัวเลข 1000 ตัวสุดท้ายของคำสั่งเป็นการกำหนดจำนวนของการเคลื่อนที่ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบและการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์นั้น ๆ





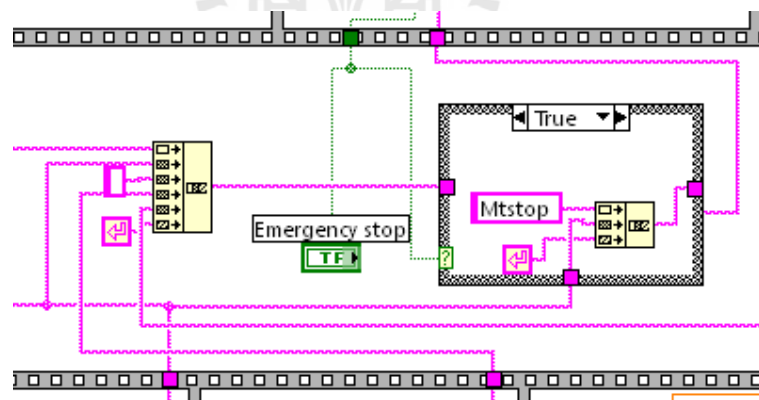
รูปที่ 4.14 การกำหนดรูปแบบคำสั่งเริ่มทำงานหรือหยุดทำงานแบบฉุกเฉิน

**ส่วนที่ 4** เป็นการกำหนดรูปแบบหน่วงเวลาส่งคำสั่ง อ่านข้อมูลตอบกลับจากไมโครคอนโทรลเลอร์และปิดคำสั่งโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 4.15 เป็นการหน่วงเวลา 500 มิลลิวินาที เมื่อส่งคำสั่งเสร็จและกำหนดให้อ่านข้อมูลตอบกลับทุกครั้งจากไมโครคอนโทรลเลอร์พร้อมปิดการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4.15 การกำหนดรูปแบบคำสั่งหน่วยเวลา อ่านข้อมูลตอบกลับและปิดคำสั่งโปรแกรม

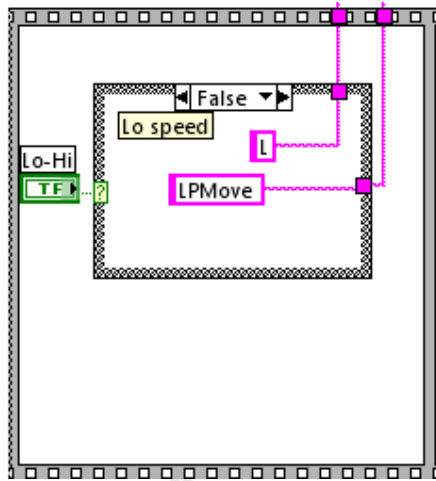
ส่วนที่ 5 เป็นรูปแบบการรวมคำสั่งที่เกิดจากเงื่อนไขผู้ใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.16 เนื่องจากการส่งคำสั่งต้องส่งไปพร้อมกันครั้งเดียว จากรูปเป็นการรวมคำสั่งการเคลื่อนที่และหยุดการทำงานแบบฉุกเฉินซึ่ง คือ  การเว้นวรรค 1 ครั้งและ  คือการจบคำสั่งหรือแทนเอ็นเตอร์ (Enter)



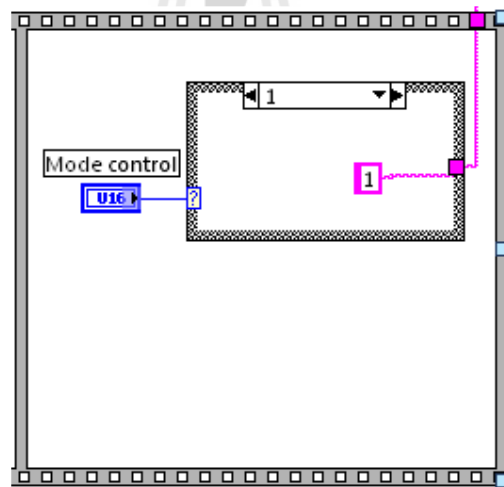
รูปที่ 4.16 รูปแบบการรวมคำสั่ง

ส่วนที่ 6 เป็นการกำหนดรูปแบบคำสั่งที่เกิดจากเงื่อนไขของผู้ใช้งานแสดงดังรูปที่ 4.17-4.20 เนื่องจากให้ผู้ใช้งานกำหนดรูปแบบ และลักษณะการเคลื่อนที่ได้อิสระตามต้องการ ประกอบไปด้วยการกำหนดความเร็ว ตำแหน่งมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม ทิศทางการเคลื่อนที่และจำนวนพัลส์สำหรับการเคลื่อนที่แต่ละครั้งเพื่อส่งคำสั่งให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์

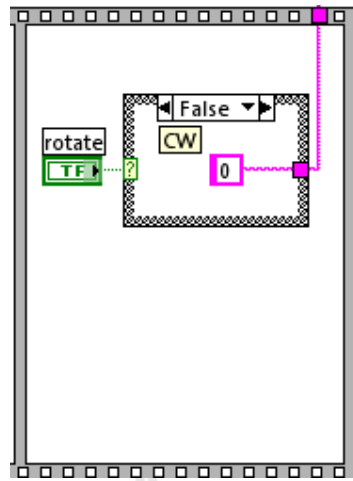




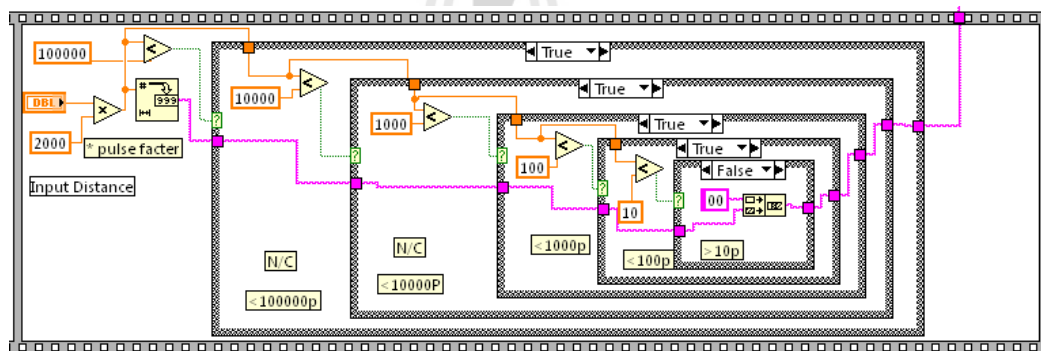
รูปที่ 4.17 การกำหนดความเร็ว



รูปที่ 4.18 การกำหนดตำแหน่งมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม



รูปที่ 4.19 การกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่

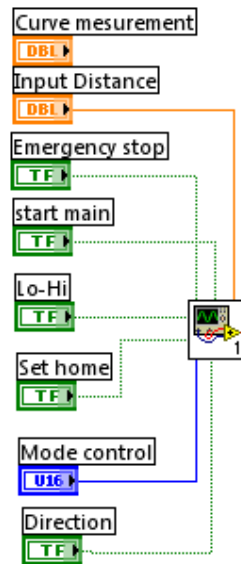


รูปที่ 4.20 การกำหนดจำนวนพัลส์สำหรับการเคลื่อนที่

#### 4.4.2 การออกแบบหน้าต่างสำหรับใช้งาน

จากที่ผ่าน มาเป็นการพัฒนา SubVI สำหรับการติดต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเราจะได้จุดต่อสัญญาณควบคุมเข้าและออกจาก SubVI ตามที่ออกแบบไว้ต่อไปจะเป็นการออกแบบหน้าต่างการใช้งาน โดยการนำ SubVI มาพัฒนาต่อเพื่อกำหนดรูปแบบหน้าต่างและออกแบบให้เห็นภาพของระบบเสมือนจริงที่กำลังควบคุมพร้อมกำหนดชุดคำสั่งควบคุมเพื่อให้การใช้งานได้ง่ายแสดงการเขียนโปรแกรมดังรูปที่ 4.21 จะเห็นว่าชุดคำสั่งจะไม่ซับซ้อนเหมือน SubVI เพราะเป็นการต่อปุ่มชุดคำสั่งควบคุมสำหรับใช้งานเท่านั้น และหน้าต่างการ

ใช้งานที่ออกแบบขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.9 สำหรับการออกแบบเราสามารถออกแบบลักษณะการใช้งานตามความเหมาะสมและสะดวกต่อการใช้งานนั้น ๆ



รูปที่ 4.21 การออกแบบปุ่มใช้งานควบคุมสำหรับติดต่อกับ SubVI



## บทที่ 5

### การประกอบและติดตั้งชุดปรับความโค้งกระจก

บทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการประกอบกลไกชุดปรับความโค้งของกระจก ตามที่ได้ออกแบบไว้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยการนำไปสร้างชิ้นงานจริงนั้นจะแยกออกเป็น ส่วน ๆ แล้วจึงนำมาประกอบกันเป็นระบบ ซึ่งในระหว่างการประกอบระบบนั้นอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งขึ้นได้ ทำให้ผลจากการทดสอบจริงไม่ตรงตามผลจากการจำลอง ซึ่งในบทถัดไปจะกล่าวถึงเรื่องดังกล่าว และสุดท้ายจะกล่าวถึงการประกอบและติดตั้งเครื่องมือวัดสำหรับเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ

#### 5.1 เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในระบบปรับความโค้งกระจก

เซนเซอร์ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับหรือรับรู้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณทางกายภาพใด ๆ เพื่อให้ออกมาเป็นปริมาณทางกายภาพที่สามารถตรวจจับได้ เช่น การวัดอุณหภูมิของน้ำโดยอาศัยการขยายตัวของปรอท ก็จะทำให้ปรอททำหน้าที่เป็นตัวรับความรู้สึกหรือเซนเซอร์ เป็นต้น ส่วนทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หมายถึง อุปกรณ์ใด ๆ ก็ตามที่เปลี่ยนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพใด ๆ ออกมาอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า เช่น แรงเคลื่อนไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าหรือความต้านทาน

เมื่อจะทำการวัดโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลและจัดวางระบบ Data Acquisition (DAQ) ขึ้นมา เมื่อใดมีการใช้เซนเซอร์จะต้องมีทรานสดิวเซอร์ประกอบอยู่ด้วยเสมอ หรือไม่เช่นนั้นเซนเซอร์จะทำหน้าที่เป็นทรานสดิวเซอร์ ไปพร้อมกัน เพราะเครื่องวัดเหล่านั้นจะให้การเปลี่ยนแปลงในรูปของปริมาณทางไฟฟ้าอยู่แล้ว ทำให้อุปกรณ์การวัดหลายชนิดเป็นทั้งเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในตัวเดียวกัน

การที่ต้องเปลี่ยนปริมาณทางกายภาพใด ๆ ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าในระบบการวัด เนื่องจากได้จำกัดระบบการวัดไว้เป็นระบบการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ และเนื่องจากสิ่งที่คอมพิวเตอร์สามารถตรวจจับได้ก็จะเป็นปริมาณทางด้านไฟฟ้าเท่านั้น

สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์ ที่มีใช้กันอยู่ในงานด้านวิศวกรรมนี้สามารถอธิบายในรายละเอียดต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงชนิดของเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์ สำหรับการวัดปริมาณทางกายภาพต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในระบบการวัดทางวิศวกรรม

ตารางที่ 5.1 ชนิดของเซนเซอร์หรือทรานสดิวเซอร์ที่นิยมใช้ในระบบการวัดทางวิศวกรรม

ปริมาณทางฟิสิกส์	เซนเซอร์/ทรานสดิวเซอร์
อุณหภูมิ	-เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) -อาร์ทีดี (RTD) -เทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) -ไพโรมิเตอร์ (Pyrometer)
แสง	-หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier Tube) -โฟโตคอนดักทีฟเซลล์ (Photoconductive Cell)
แรงและความดัน	-สเตรนเกจ (Strain Gauge) -เพียโซอิเล็กทริก ทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) -โหลดเซลล์ (Load Cell)
เสียง	-ไมโครโฟน (Microphone)
ตำแหน่งหรือการจัด	-โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) -การเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear Variable Differential Transformers: LVDT)
การไหลของของไหล	-แผ่นออริฟิส (Orifice Plate) -ท่อเวนตูรี (Venturi Tube) -นอซเซิล (Nozzle) -โรตามิเตอร์ (Rotameter)
pH	-ขั้วไฟฟ้าแบบ pH (pH Electrode)

อุปกรณ์เหล่านี้เมื่อรับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพแล้วจะเปลี่ยนค่าเหล่านั้นออกมาในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrical Signal) และโดยส่วนใหญ่แล้วสัญญาณนั้นจะออกมาอยู่ในรูปของความต่างศักย์หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งอุปกรณ์บางประเภทจะให้ปริมาณที่สามารถตรวจวัดได้ทันที แต่อุปกรณ์บางประเภทจะไม่ได้ให้สัญญาณในลักษณะที่สามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือพื้นฐานทันที หรือในการเดินทางของสัญญาณเหล่านี้เข้าสู่เครื่องมือวัดอาจผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีการรบกวนสัญญาณอยู่ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้เครื่องมือวัดสัญญาณที่แท้จริงได้ทันที ด้วยสาเหตุดังกล่าวเราจำเป็นต้องมีการปรับสภาพสัญญาณเหล่านั้นก่อน

ดังนั้นในหลาย ๆ กรณีจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมในการวัด อุปกรณ์นี้เรียกว่า อุปกรณ์ปรับสัญญาณ (Signal Conditioner) สิ่งที่เราควรทราบเบื้องต้นก็คือ ความจำเป็นของการที่จะต้องใช้อุปกรณ์นี้เพราะบางครั้งเมื่อออกแบบระบบการวัดที่ไม่มีความต้องการความละเอียดสูงหรือ

สัญญาณที่มีขนาดมากเพียงพอ และไม่มีกระบวนการควบคุมสัญญาณมากนักอาจไม่ต้องการอุปกรณ์นี้ก็ได้ ซึ่งจะเป็นการลดความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายลงไปได้

ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและการควบคุมเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้ระบบดังกล่าวเป็นไปตามที่วัตถุประสงค์ที่วางไว้ ทางผู้วิจัยจึงนำเสนอระบบการวัดและการควบคุมที่เกี่ยวข้องกับระบบดังกล่าว ซึ่งประกอบไปด้วยเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์หลากหลายรูปแบบเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเริ่มศึกษาและพัฒนาเพื่อรองรับงานวิจัยที่จะเพิ่มมากขึ้นในอนาคตอันใกล้ ตลอดจนเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ ๆ ในการสร้างและพัฒนาเครื่องมือวัดและทดลองทางด้านวิทยาศาสตร์ที่ต้องการความเที่ยงตรงและแม่นยำสูง

สำหรับระบบปรับความโค้งกระจกในงานวิจัยนี้ เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์นั้นเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ การนำเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงและน่าเชื่อถือมาใช้ในระบบนั้นย่อมเป็นสิ่งที่ต้องการของผู้ออกแบบและผู้ทดลอง ซึ่งในระบบดังกล่าวสามารถจำแนกชนิดของเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ออกเป็น 2 ส่วนคือ

#### 1. เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดตำแหน่งและการเคลื่อนที่

- ไดจิมตริก อินดิเคเตอร์ (Digimatic indicator) ทำหน้าที่ วัดระยะที่แน่นอนด้วยบรรณานพินฉิววัสดุทดสอบ

- โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (Rotary encoder) ทำหน้าที่ วัดรอบการหมุนของมอเตอร์

- ลิมิตสวิตช์ (Limit switch) ทำหน้าที่ ตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่

#### 2. เซนเซอร์สำหรับวัดแรงที่ให้กับระบบ

- วัดแรง (Force gauge) ทำหน้าที่ วัดแรงดึงที่ให้กับระบบ

## 5.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์โดยทั่วไป

### 5.2.1 เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดตำแหน่งและการเคลื่อนที่

#### ไดจิมตริก อินดิเคเตอร์

เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดการขจัดเชิงเส้นชนิดหนึ่งที่มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ อย่างมากมาย โครงสร้างพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 5.1 ตัวถังจะถูกยึดติดอยู่กับวัตถุที่ต้องการตรวจวัดระยะขจัดที่เกิดขึ้น โดยมีแท่งวัดและหัวเข็มทำหน้าที่เป็นส่วนตรวจสอบสัมผัสอยู่กับวัตถุ นั้น ๆ ระยะการขจัดที่เกิดขึ้นและตรวจวัดได้จะถูกขยายค่าให้มากขึ้นโดยอาศัยวงจรขยายสัญญาณ และผ่านเข้าสู่ชุดควบคุมแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัลตามการวัดปริมาณนั้น ๆ



รูปที่ 5.1 เซนเซอร์ตรวจวัดการขัดเชิงเส้น

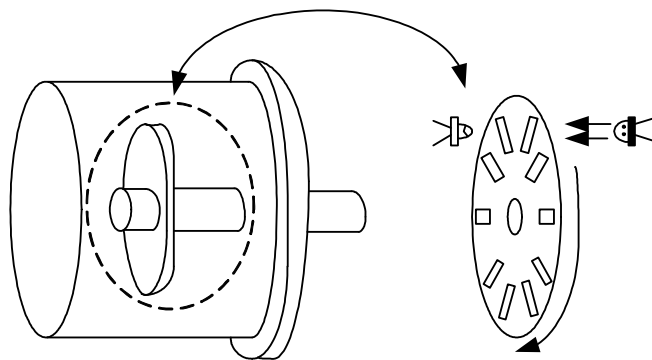
การนำไปใช้งาน: เนื่องจากการใช้งานง่าย มีความสะดวกและรวดเร็ว รวมทั้งมีความแม่นยำ ดังนั้นโดยทั่วไปจึงพบว่า ถูกนำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายในการตรวจวัดระยะขจัดในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ตลอดจนในงานวิศวกรรม เช่น งานด้านวิศวกรรมอุตสาหกรรม ใช้ตรวจสอบขนาดของผลิตภัณฑ์ในงานควบคุมระบบคุณภาพ ใช้ในการปรับแต่งเครื่องจักรกลโรงงาน หรือตรวจสอบขนาดผลิตภัณฑ์ที่จะบรรจุหีบห่อ เป็นต้น

#### โรตารีเซนเซอร์

โรตารีเซนเซอร์ ถูกใช้ในการตรวจจับตำแหน่งมุมของแผ่นดิสก์ที่กำลังหมุนอยู่ หรือถูกใช้ในการอ่านค่าความเร็วเชิงมุม (RPM) ของวัตถุที่กำลังหมุนอยู่ ในการตรวจจับการเคลื่อนที่นั้นมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้หน้าสัมผัส แม่เหล็กหรือการใช้แสง สำหรับการตรวจจับโดยใช้แสงจะอธิบายในที่นี้

#### โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ชนิดแสง

โรตารีเอ็นโค้ดเดอร์แบบใช้แสง เป็นแผ่นดิสก์ที่มีร่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็ก ๆ วางอยู่รอบ ดังแสดงในรูป 5.2 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงจะพุ่งผ่านไปยังตัวรับแสง โดยผ่านร่องเล็ก ๆ นี้ จะอยู่ในแนวเดียวกันกับแหล่งกำเนิดแสงและเซนเซอร์ เมื่อแสงไปกระทบกับตัวรับแสงตัวรับแสงก็จะผลิตสัญญาณพัลส์ออกมา ในขณะที่แผ่นดิสก์กำลังหมุนด้วยความเร็วอยู่นั้น จำนวนของสัญญาณพัลส์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในหน่วยต่ออนาติ หรือวินาทีตามความเร็วในการหมุนของแผ่นดิสก์ ดังนั้น จะเห็นได้ชัดว่าจำนวนร่องเล็ก ๆ บนแผ่นดิสก์ยังมีมากเท่าใดความเร็วในการอ่านค่าจะดีกว่า อย่างไรก็ตามจำนวนนับของสัญญาณพัลส์จะไม่เกี่ยวข้องกับทิศทางการหมุนไม่ว่าจะทวนหรือตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.2 โรตารีเอ็น โคลด์มอเตอร์ชนิดออฟติคัล

ลักษณะทั่วไปของออฟติคัลโรตารีเอ็น โคลด์มอเตอร์ จะไม่มีผลตอบสนองต่ออุณหภูมิ และการสั่นสะเทือนทางกลมากนัก แผ่นดิสก์นี้จะมีน้ำหนักเบาและสามารถที่จะหมุนและหยุดหมุนได้โดยไม่มีภาระหน่วง จึงทำให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในข้อมูลจะน้อยมาก ดังนั้นจึงง่ายที่จะขับเคลื่อนแผ่นดิสก์

การนำไปใช้งาน: ตรวจสอบความเร็วและตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้าหรือการหมุนของเครื่องจักรกลต่าง ๆ

#### ลิมิตสวิตช์

เป็นสวิตช์ควบคุมตำแหน่ง ทำหน้าที่เป็นหน้าสัมผัสในการควบคุมการทำงานตามตำแหน่งต่าง ๆ ตัวอย่างดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีการประยุกต์ใช้งาน เช่น ใช้ในวงจรควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักร เป็นสวิตช์ควบคุมอุปกรณ์ สามารถรับกระแสไฟฟ้าได้ทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ

การนำไปใช้งาน: มีให้เลือกหลากหลายรูปแบบ หลายขนาด หน้าสัมผัสสามารถใช้ได้ทั้งไฟฟ้ากระแสตรงหรือกระแสสลับ และมีให้เลือกทั้งแบบ NO และ NC





รูปที่ 5.3 ลิมิตสวิตช์

### 5.2.2 เซนเซอร์สำหรับวัดแรงที่ให้กับระบบ

#### สเตรนเกจ

สเตรนเกจ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติพิเศษคือใช้ทำหน้าที่เป็นเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดแรงกระทำทางกล โครงสร้างของสเตรนเกจที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งประกอบด้วยฟิลาเมนต์ (filament) โดยทั่วไปนิยมทำมาจากวัสดุจำพวก ลวดตัวนำ แผ่นโลหะตัวนำบาง (Metal foil) สารกึ่งตัวนำหรือโลหะผสม เช่น ทองแดง-นิกเกิล หรือนิกเกิล-โครเมียม เป็นต้น ซึ่งจะมีค่าความต้านทานสูงและทนทานต่อแรงกระทำทางกลสูง เมื่อนำสเตรนเกจไปใช้ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดรูปร่างของวัตถุ นั่นคือเรากำลังจะวัดความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นบนวัตถุนั้น ๆ ซึ่งความเครียดคือ อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงขนาดวัตถุต่อขนาดเดิมของวัตถุในสภาวะปกติ ซึ่งมี 2 ลักษณะคือ ความเครียดทางกล (Mechanical strain) และความเครียดทางไฟฟ้า (Electrical strain)

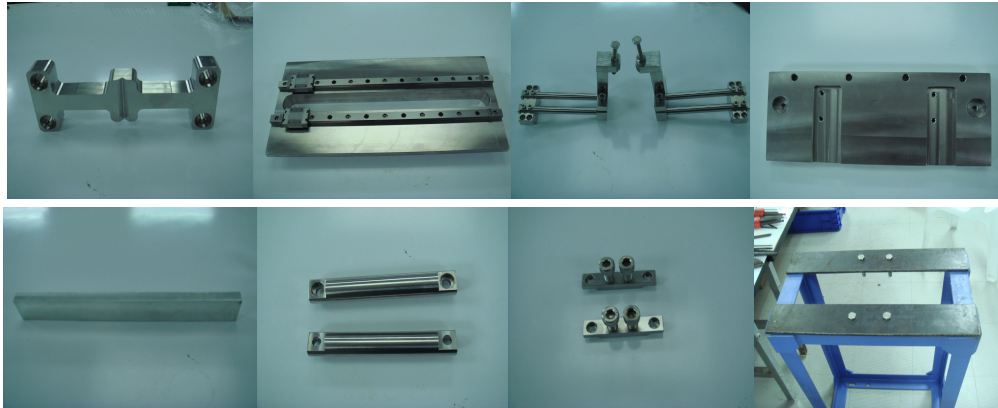
การนำไปใช้งาน: เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวาง เช่น การชั่งน้ำหนัก การสั่นสะเทือนและวัดแรงบิดของมอเตอร์ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ใช้สำหรับวัดแรงดึงที่ให้กับระบบ โดยการยึดโหลดเซลล์ (Load cell) กับส่วนที่ต้องการวัดแรง แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจะมีจุดเชื่อมต่อ 2 จุดที่หัวและท้าย โดยให้ด้านหนึ่งยึดติดกับส่วนที่ต้องการให้แรง และอีกด้านหนึ่งยึดติดกับระบบที่ต้องการวัดแรง



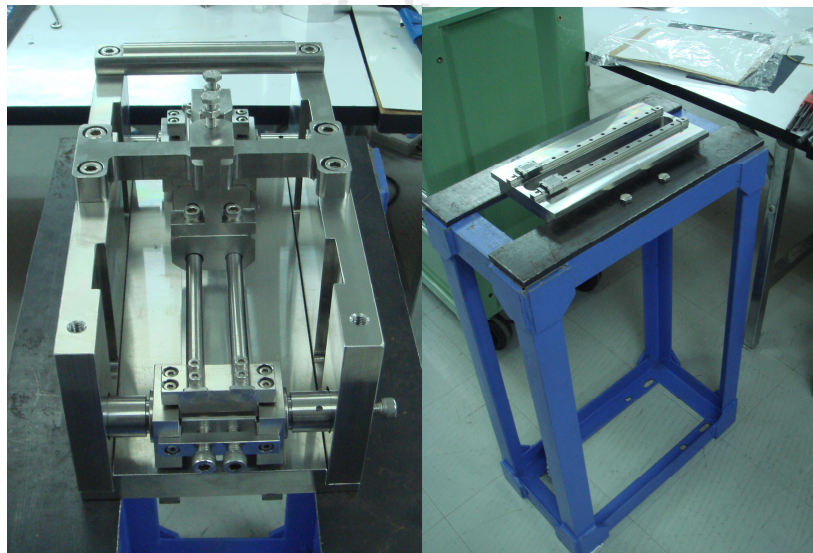
รูปที่ 5.4 เซนเซอร์วัดแรง

### 5.3 การประกอบติดตั้งระบบขับเคลื่อนและเครื่องมือวัดชุดปรับความโค้ง

จากการสร้างชิ้นงานจริงตามแบบทางวิศวกรรมที่ได้ออกแบบแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการนำส่วนต่าง ๆ ของระบบมาประกอบเป็นกลไกชุดปรับความโค้งของกระจก มีรายละเอียดดังนี้ เริ่มต้นจากการประกอบโครงสร้างกลไกการปรับความโค้ง จากนั้นนำมาติดตั้งบนแท่นรองสำหรับการให้แรงกับระบบแสดงดังรูปที่ 5.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่สร้างเสร็จก่อนการประกอบ และรูปที่ 5.6 โครงสร้างของระบบที่ประกอบแล้วเสร็จ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมากในการประกอบติดตั้ง หรือยึดน็อตต่าง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อค่ารัศมีความความโค้งเริ่มต้นของระบบ และทำให้จุดศูนย์กลางของระบบเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้คลาดเคลื่อนไปด้วย



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างชิ้นงานที่สร้างเสร็จก่อนนำไปประกอบเป็นชุดปรับความโค้งกระจก



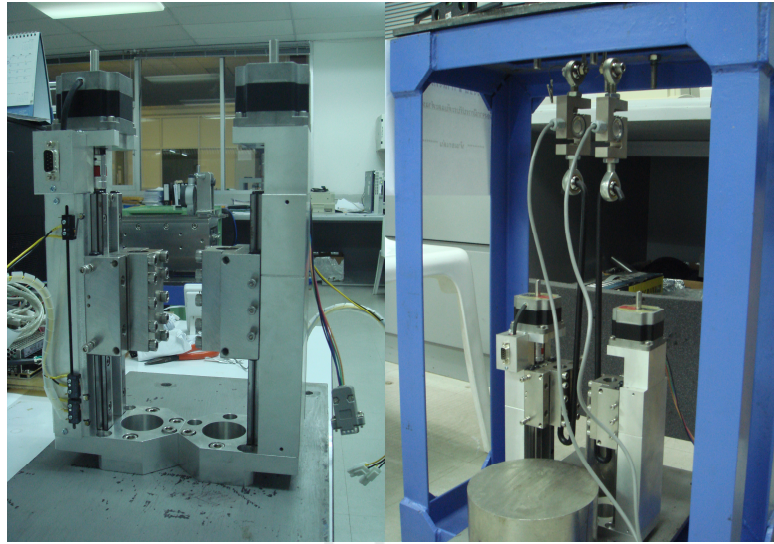
รูปที่ 5.6 ชุดปรับความโค้งกระจกที่ประกอบแล้วเสร็จ

เมื่อประกอบโครงสร้างกลไกของระบบทั้งหมดแล้วเสร็จ ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการติดตั้งชุดขับเคลื่อนและเครื่องมือวัดค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลอง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

#### 1. ชุดขับเคลื่อนการให้แรง

ประกอบไปด้วยสเต็ปปีงมอเตอร์ 2 ชุด โดยการต่อกับส่วนของแกนทั้งสองด้านของระบบเพื่อส่งผ่านแรงไปยังจุดหมุนทั้งสองด้านสำหรับการให้โมเมนต์กับระบบแสดงดังรูปที่ 5.7

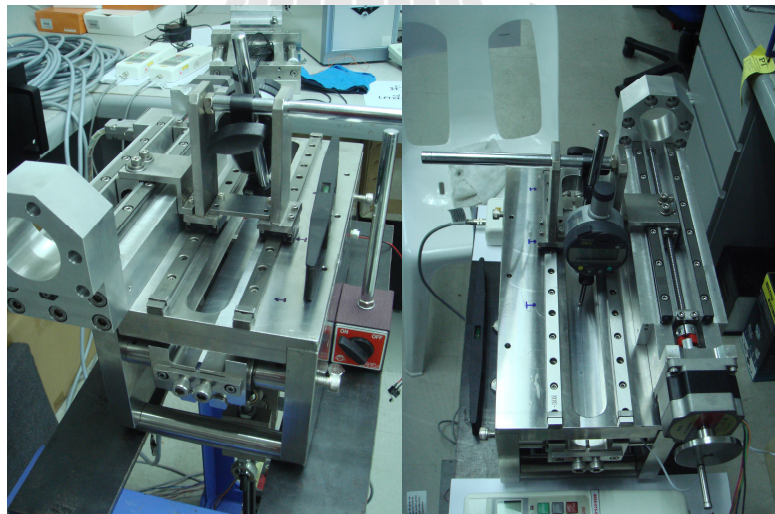




รูปที่ 5.7 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนการให้แรงกับระบบ

2. ชุดขับเคลื่อนการเก็บตำแหน่งความโค้งของกระจก

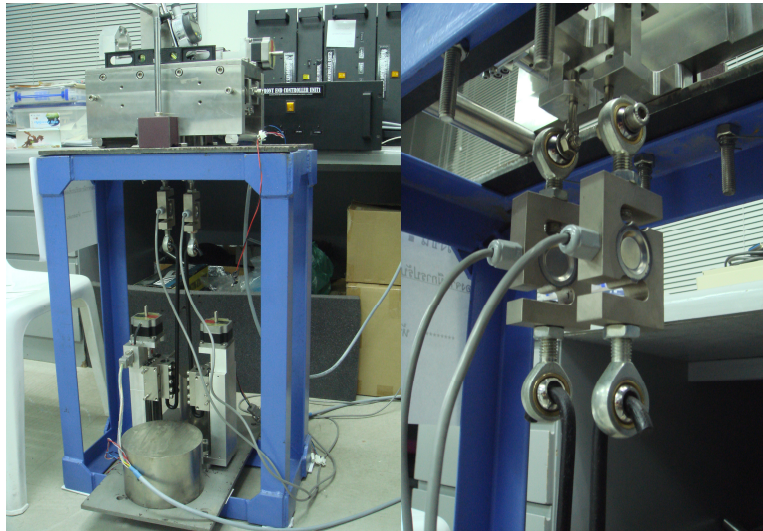
ประกอบไปด้วยสเตปป์มอเตอร์ 1 ชุด โดยต่อเข้ากับรางขับเคลื่อนและยึดติดไว้  
ด้านบนของระบบแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 การติดตั้งชุดขับเคลื่อนควบคุมตำแหน่งความโค้ง

### 3. ชุดวัดแรงที่ให้กับระบบ

การวัดแรงที่ให้กับระบบจะใช้เซ็นเซอร์วัดแรง ซึ่งประกอบไปด้วยโหลดเซลล์ 2 ชุด โดยต่อระหว่างชุดให้แรงและแขนส่งผ่านแรงทั้งสองด้านของระบบ แสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การติดตั้งชุดวัดแรงที่ให้กับระบบ

### 4. ระบบวัดความโค้ง

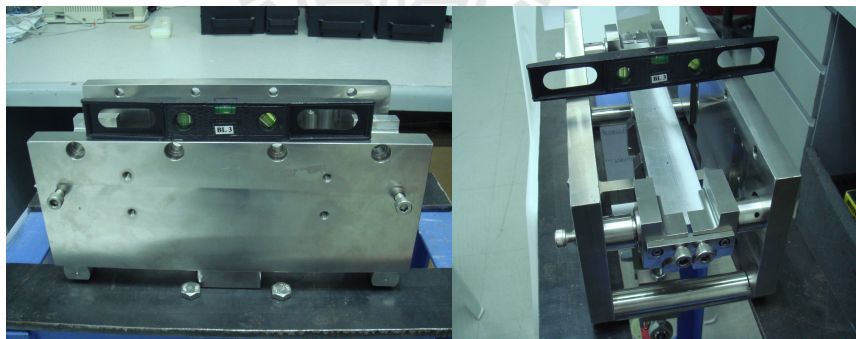
การวัดความโค้งของวัสดุทดสอบหรือระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นหลังจากการให้แรงกับระบบ จะใช้ไดจิมตริกอินดิเคเตอร์ หรือที่เรียกว่า คู่อัลเกจ (Dual gauge) เป็นตัวเก็บค่าแห่งต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระนาบความยาวของวัสดุทดสอบ โดยติดตั้งพร้อมชุดขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 การติดตั้งคู่อัดเกจสำหรับวัดความโค้ง

#### 5. การปรับระดับสำหรับติดตั้งระบบ

การปรับเทียบระดับเพื่อติดตั้งระบบให้มีความสมดุลจะใช้ระดับน้ำเข้าช่วย เพื่อทำการปรับระนาบในทิศทางต่าง ๆ ให้ระบบอยู่ในตำแหน่งที่สมดุลมากที่สุด ซึ่งจะมีผลต่อการวัดความโค้งของระบบที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง ระบบที่ติดตั้งแสดงดังรูปที่ 5.11

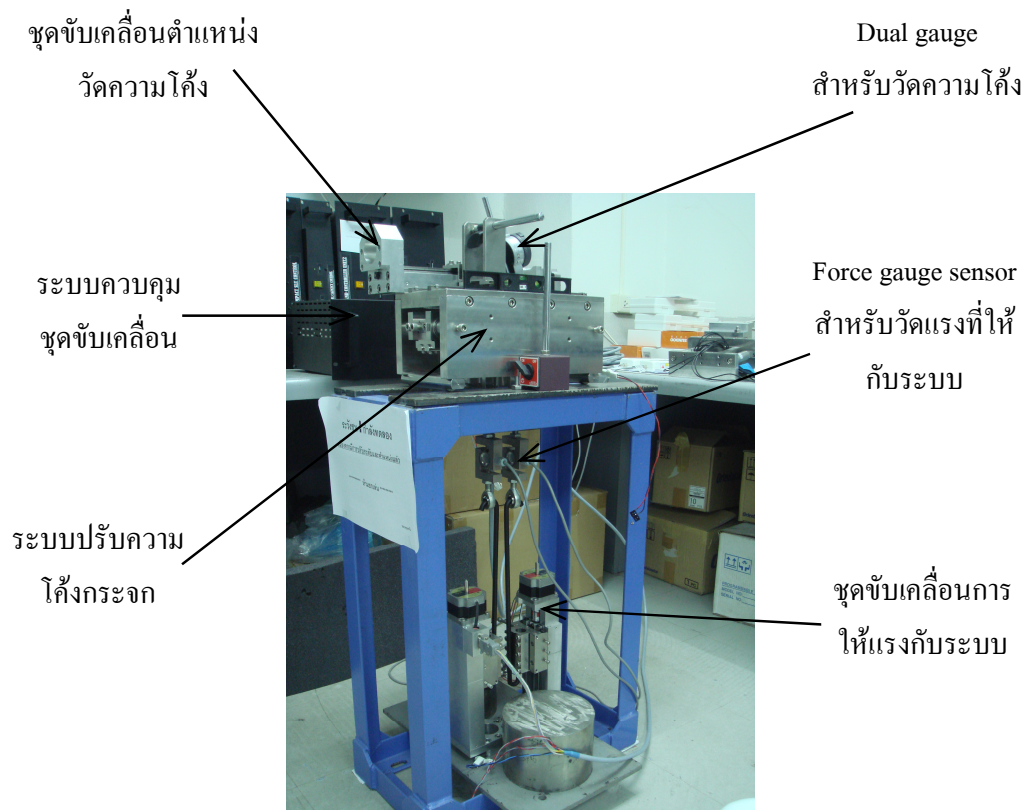


รูปที่ 5.11 การปรับระดับสำหรับติดตั้งระบบ

#### 5.4 ระบบปรับความโค้งกระจกที่ติดตั้งแล้วเสร็จ

จากการประกอบระบบที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นว่าระบบประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.12 และการวัดค่าพารามิเตอร์จะเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ โดยผ่านชุดควบคุมและโปรแกรมอินเตอร์เฟซที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรมแลปวิว ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4





รูปที่ 5.12 ระบบปรับความโค้งที่ประกอบแล้วเสร็จ

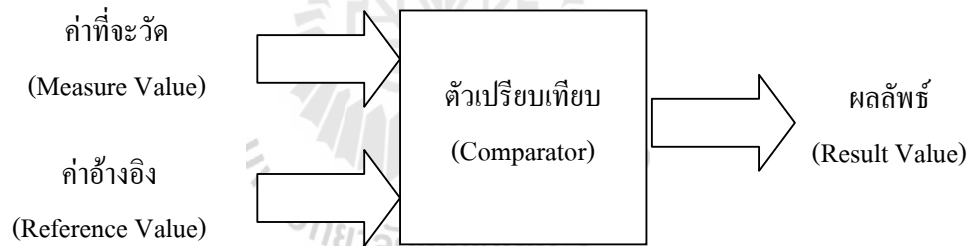
## บทที่ 6

### การวัดและทดสอบระบบ

จากบทที่ผ่านมาเป็นการประกอบและติดตั้งเครื่องมือวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบ เพื่อเป็นการเตรียมระบบก่อนนำมาทดสอบ ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการทดสอบ และวัดค่าความโค้งที่เกิดขึ้นจากผลการให้แรงกับระบบที่ค่าต่าง ๆ จากนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลอง และผลที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อหาค่าแฟกเตอร์ของระบบที่สร้างขึ้น

#### 6.1 ความหมายของการวัด (Measurement of Meaning)

การวัดหมายถึง การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณค่าของตัวแปรสองค่าคือ ค่าของตัวแปรที่ต้องการทราบ (Measure Value) และค่าอ้างอิง (Reference Value) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบคือค่าที่แท้จริงของปริมาณตัวแปรที่ต้องการทราบ ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการวัด

เราสามารถแบ่งการวัดได้เป็น 2 รูปแบบคือ การวัดทางตรง (Direct Comparison) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ได้เลยไม่จำเป็นต้องนำมาทำการคำนวณเปรียบเทียบหรือแปลงหน่วยอีก เช่น การวัดระยะทางด้วยตลับเมตร การวัดอุณหภูมิด้วยปรอท เป็นต้น และการวัดทางอ้อม (Indirect Comparison) ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการวัดในทางวิศวกรรมหรือทางวิทยาศาสตร์ซึ่งค่าหรือผลลัพธ์ที่ได้จะต้องนำมาคำนวณ และทำการแปลงหน่วยเพื่อให้เหมาะสมกับปริมาณการวัด เช่น การวัดอุณหภูมิโดยการวัดค่าของความดันที่เปลี่ยนแปลง การวัดระดับโดยการชั่งน้ำหนัก เป็นต้น ซึ่งต้องอาศัยตัวกลางระหว่างปริมาณที่ต้องการวัดกับค่าที่ได้จากการวัด ตัวกลางนี้จะทำให้



ตัวแปรทั้งสองค่าเปลี่ยนแปลงปริมาณอย่างสัมพันธ์กันเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและเที่ยงตรงมากที่สุด

## 6.2 คุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องมือวัด (Basic Characteristics of Measuring Device)

เครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับรับค่าหรือตรวจรู้ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่พบในกระบวนการค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์หรืออุตสาหกรรม เช่น ความเครียด ระยะทาง การเคลื่อนไหว แรงดันไฟฟ้า เป็นต้น จะต้องมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) และมีความแม่นยำ (Accuracy) ในการตรวจวัดทุก ๆ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของตัวแปรที่ต้องการวัดเพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมกระบวนการ ทั้งสามารถสร้างสัญญาณเตือนเมื่อต้องปรับเปลี่ยนด้วยมือ (Manual) หรือแบบกระตุ้นให้อุปกรณ์ควบคุมทำงานโดยอัตโนมัติ ตลอดจนเพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางด้านพื้นฐานต่าง ๆ ซึ่งคุณสมบัติแต่ละข้อจะมีความสัมพันธ์ และเกี่ยวข้องโดยตรงกับการวัด

### ความแม่นยำ (Accuracy)

ในการตรวจวัดค่าปริมาณใด ๆ สิ่งต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการวัดเป็นอย่างมากคือ ความคลาดเคลื่อนทางสถิต (Static Error) ความคลาดเคลื่อนทางพลวัต (Dynamic Error) การเลื่อน (Drift) ความสามารถในการถ่ายทอด (Reproducibility) และความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linearity) ความแม่นยำซึ่งหมายถึงค่า ที่อ่านได้จะต้องมีความใกล้เคียงกันกับค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้หรือค่าจริง แต่ในความเป็นจริงแล้วถูกต้องแม่นยำอย่างสมบูรณ์นั้น ไม่จำเป็นในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์ เพราะในทุก ๆ การทดลองความถูกต้องแม่นยำของการวัดจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับข้อจำกัดอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนภายในของตัวเอง (Intrinsic Error) ข้อจำกัดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอยู่เสมอขณะทำการวัด ความไม่เสถียรทางไฟฟ้า (Electrical Zero) และข้อจำกัดจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งข้อจำกัดต่าง ๆ ที่กล่าวมานี้ล้วนแล้วแต่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการวัด

นอกจากนี้ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับการสอบเทียบ (Calibration) ภายใต้สภาวะการทำงานที่ถูกต้องเหมาะสม โดยอาจจะกำหนดค่าความแม่นยำได้จากค่าที่วัดได้อยู่ในช่วงบวกหรือลบของค่าตัวเลขหรือเปอร์เซ็นต์ที่ต้องการ ซึ่งอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ จะถูกแบ่งประเภทตามความถูกต้องแม่นยำของอุปกรณ์นั้น ๆ โดยทั่วไปแล้ว ค่าความแม่นยำจะอยู่ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ในหน่วยของวัดที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของย่านการวัดสูงสุด (URV)

### ความเที่ยงตรง (Precision)

คุณสมบัติประการหนึ่งซึ่งมักจะกล่าวถึงของการวัดคือความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัด ในขณะที่ความเที่ยงตรงนั้นสามารถแบ่งการพิจารณาออกได้เป็นสองความหมาย ความหมายแรก

คือ ความใกล้เคียงกันของค่าที่ได้จากการวัดปริมาณเดียวกัน โดยค่าที่ได้จะต้องอยู่ในช่วงค่าเฉลี่ยของการวัดทั้งหมด ซึ่งหมายความว่าเครื่องมือวัดมีความคงเส้นคงวา หรือมีความสามารถซ้ำค่าเดิม (Repeatability) นั่นเอง เครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงสูงผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดจะมีการกระจายน้อยกว่าเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงต่ำ

### ความคลาดเคลื่อน (Error)

ความคลาดเคลื่อนหมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณที่แท้จริงของค่าตัวแปรที่ต้องการวัดกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัด ซึ่งอาจจะอยู่ในลักษณะของปริมาณตัวเลข หรือเปอร์เซ็นต์ ค่าเอาต์พุตที่ได้จากอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ทุกชนิดนั้นทั้งในทางอุดมคติหรือในทางทฤษฎีกับค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัดจะมีความสัมพันธ์กันสำหรับการออกแบบทรานสดิวเซอร์ในทางอุดมคติ ทรานสดิวเซอร์จะถูกสร้างจากวัสดุที่มีความเหมาะสมและให้ค่าเอาต์พุตจากการวัดที่ถูกต้องอย่างต่อเนื่องหรือเป็นเชิงเส้นตรงกับค่าเอาต์พุตในทางทฤษฎีความสัมพันธ์ของเอาต์พุตกับค่าของการวัดจากการใช้งานทรานสดิวเซอร์จะอยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ กราฟหรือตาราง โดยที่เอาต์พุตในทางอุดมคติจะไม่มีคำนึงถึงสภาพแวดล้อมและสภาวะการทำงานของเครื่องมืออื่น ๆ

ในทางปฏิบัติถึงแม้ว่าเอาต์พุตของทรานสดิวเซอร์จะได้รับผลกระทบจากความไม่แน่นอนไปตามอุดมคติของอุปกรณ์ในกรณีที่ค่าที่วัดได้มีการเบี่ยงเบนจากค่าจริงแต่ความแตกต่างทางพีชคณิตระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าจริงของการวัดจะอยู่ในรูปความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ความคลาดเคลื่อนนี้จะแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของเอาต์พุตเต็มสเกล (Full Scale Output %F.S.) อัตราส่วนของความคลาดเคลื่อนกับค่าเอาต์พุตเต็มสเกลนี้เรียกว่า ความแม่นยำของอุปกรณ์ ความคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาข้างต้นจะเกิดจากความคลาดเคลื่อนเฉพาะตัวซึ่งมีค่ามาก ในการปฏิบัติงานจริงจำเป็นต้องทราบรายละเอียดผลจากความคลาดเคลื่อนของทรานสดิวเซอร์เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและมีความแม่นยำของการวัดมากที่สุด

### 6.3 การเตรียมระบบก่อนการทดสอบ

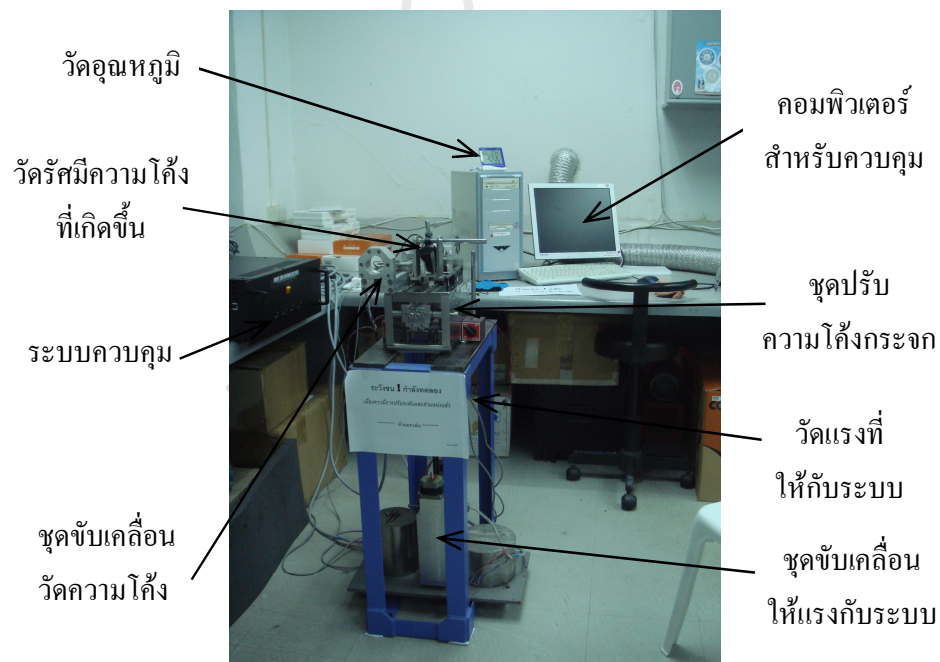
การเตรียมระบบก่อนทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.2 ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. ชุดปรับความโค้งกระจกที่พัฒนาขึ้น
2. ชุดขับเคลื่อนการให้แรงกับระบบ
3. ชุดขับเคลื่อนการวัดความโค้งที่เกิดขึ้น
4. ชุดวัดแรงที่ให้กับระบบ
5. ชุดวัดความโค้งที่เกิดขึ้น
6. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

## 7. ระบบควบคุม

## 8. คอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมการทำงาน

ชุดปรับความโค้งกระจกที่พัฒนาขึ้นในส่วนชุดขับเคลื่อนจะใช้สเตปปีงมอเตอร์ชนิด 5 เฟส จำนวน 3 ชุด ประกอบไปด้วยชุดขับเคลื่อนการให้แรง 2 ชุด และชุดขับเคลื่อนการวัดความโค้ง 1 ชุด โดยควบคุมผ่านโปรแกรมอินเทอร์เฟซที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรมแลปวิวเพื่อติดต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับสั่งการทำงานของมอเตอร์ส่วนต่าง ๆ ทำให้การควบคุมระบบทำได้ง่าย และสะดวกผ่านโปรแกรมอินเทอร์เฟซที่พัฒนาขึ้น ส่วนการเก็บข้อมูลความโค้งที่เกิดขึ้นจะเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติเพื่อทำการสร้างกราฟ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปหารัศมีความโค้งที่เกิดขึ้นต่อแรงกระทำที่ค่า ๆ ผ่านโปรแกรมเมทแลป



รูปที่ 6.2 ระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับการทดสอบ

#### 6.4 การทดสอบระบบและเก็บข้อมูล

เมื่อทำการเตรียมระบบเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบกลไกชุดปรับความโค้งของกระจกที่ได้พัฒนาขึ้น และทำการเก็บข้อมูล ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเปิดโปรแกรมอินเตอร์เฟซที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.4 จากรูปจะเห็นว่าเมื่อมีการให้แรงกับระบบ F1 และ F2 แรงจะถูกส่งผ่านแขนทั้งสองด้านของระบบไปยังจุดหมุนโมเมนต์ M1 และ M2 ทำให้เกิดความโค้งขึ้น ซึ่งการปรับมีค่าน้อยมากในระดับไมโครเมตร

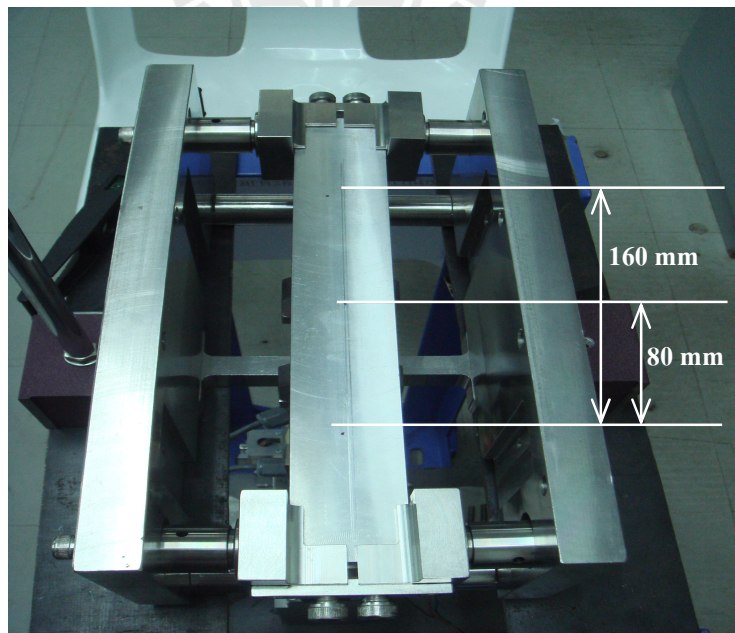
2. ในการควบคุมระบบและเก็บข้อมูลมีขั้นตอนดังนี้

-ทำการเลือกโหมดควบคุมโดยให้แรง F1 หรือ F2

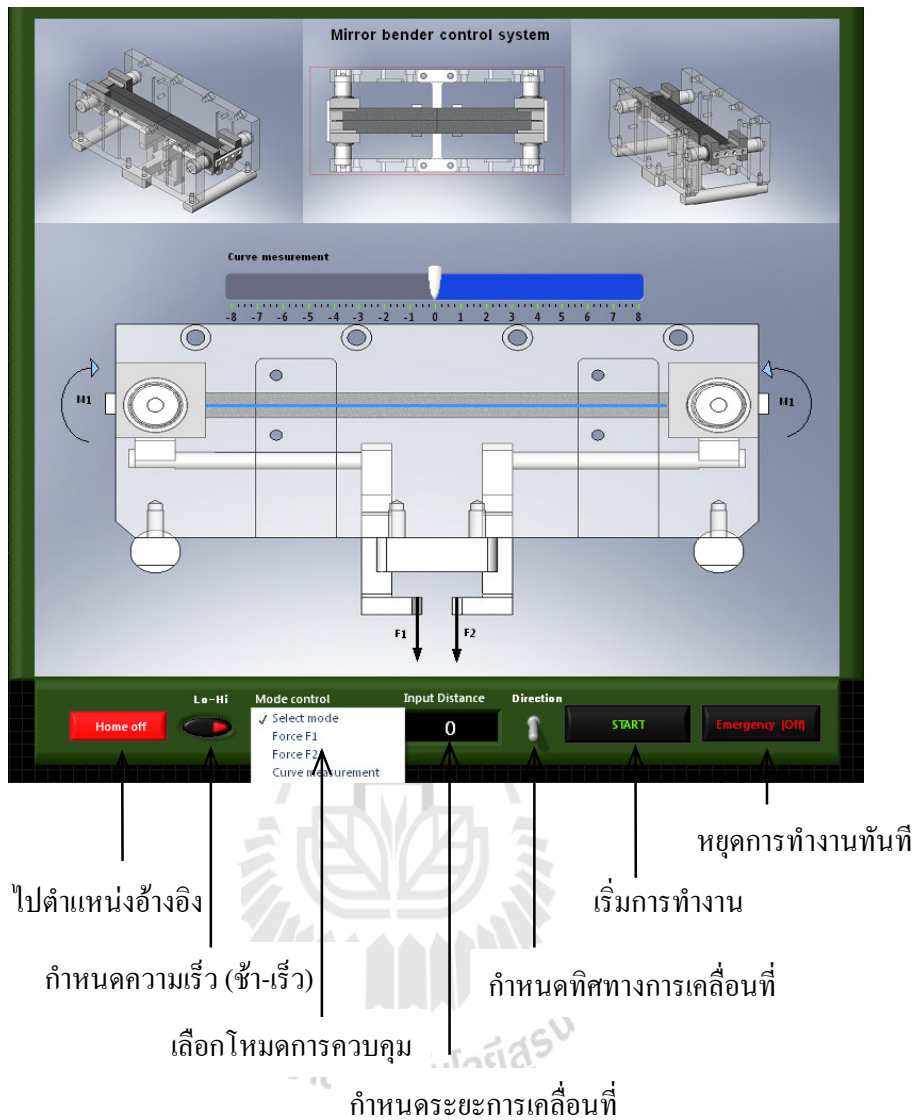
-จากนั้นกำหนดระยะการเคลื่อนที่ ซึ่งก็คือการให้แรงกับระบบนั่นเอง สังเกตได้จากชุดวัดแรง ว่าแรงที่ให้กับระบบมีค่าเท่าไร โดยการให้แรง F1 และ F2 จะทำงานแยกอิสระต่อกัน ทำให้สามารถปรับค่าได้ง่ายในกรณีที่จุดศูนย์กลางของระบบเปลี่ยนไป

-เมื่อกำหนดค่าแรงที่ให้กับระบบเรียบร้อยแล้ว ต่อไปต้องเลือกทิศทางการให้แรงซึ่งในงานวิจัยนี้จะให้แรงดึงกับระบบ จากนั้นกดปุ่มเริ่มการทำงาน มอเตอร์ก็จะทำงานเป็นการให้แรงกับระบบ และในการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ จะทำให้ชุดขับเคลื่อนการให้แรงเคลื่อนที่เป็นระยะ 2 มิลลิเมตร โดยที่แรงที่ให้กับระบบต้องอ่านมาจากชุดวัดแรง ตามค่าที่กำหนดตามการทดลอง

-เมื่อให้แรงกับระบบแล้วเสร็จ ต่อไปจะเป็นการวัดความโค้งหรือระยะที่แอ่นตัวไปจากผลของแรงที่ค่าต่าง ๆ ในการวัดจะทำการวัดที่ระยะทาง 160 มิลลิเมตร โดยวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางด้านบนและล่างของวัสดุทดสอบเป็นระยะ 80 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ตำแหน่งการวัดความโค้ง



รูปที่ 6.4 โปรแกรมอินเทอร์เฟซสำหรับควบคุมระบบ

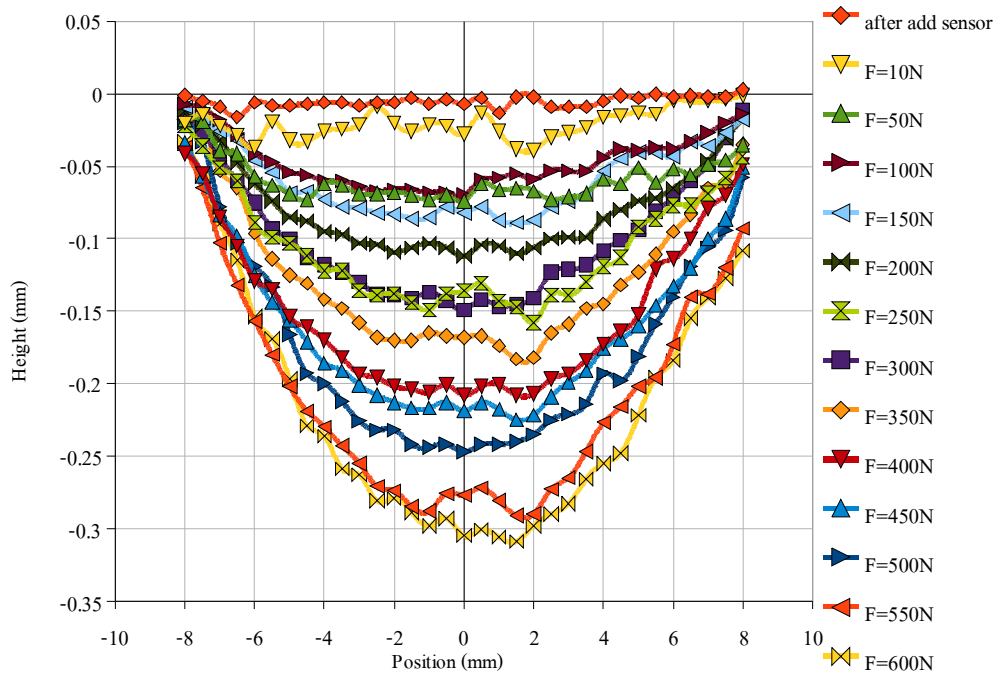
-หลักการวัดความโค้งสามารถทำได้โดยเลื่อนตำแหน่งไปตามความยาวของวัสดุทดสอบ โดยกำหนดระยะตามแนวระนาบครั้งละ 5 มิลลิเมตร เมื่อเลื่อนไปหนึ่งครั้ง ชุดวัดความโค้งก็จะทำการเก็บข้อมูลของระยะที่แอนตัวเปลี่ยนไป ตามค่าแรงที่ให้กับระบบ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับโปรแกรมเอ็กเซลล์ (Excel) เก็บไว้ที่ระบบคอมพิวเตอร์ และทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนได้ระยะ 160 มิลลิเมตร ตามกำหนด โดยการทดสอบระบบนี้จะเริ่มให้แรงตั้งแต่ 0-600 นิวตัน

## 6.5 ผลการทดสอบ

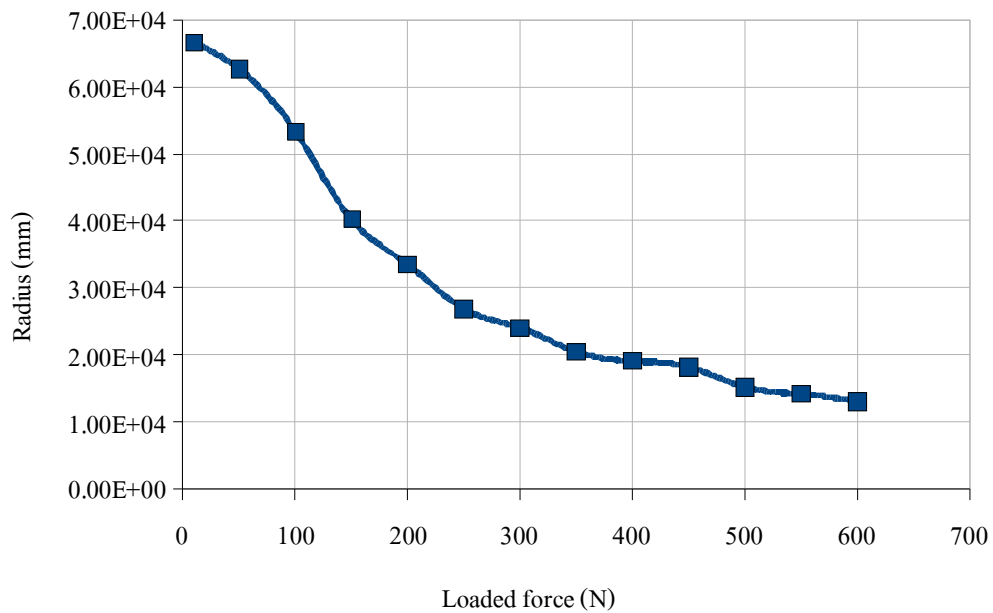
เมื่อให้แรงกับระบบที่ค่าต่าง ๆ และผลจากการทดสอบนำไปสร้างกราฟของข้อมูลตามตำแหน่งบนระนาบผิววัสดุทดสอบ จะได้กราฟความสัมพันธ์เกิดขึ้น จากนั้นนำข้อมูลและกราฟที่ได้ไปหารัศมีความโค้งโดยผ่านโปรแกรมเมทแลป ได้ผลแสดงดังตารางที่ 6.1 และ รูปที่ 6.5-6.6 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีกล่าวคือ เมื่อให้แรงกับระบบมากขึ้นจะทำให้รัศมีความโค้งของวัสดุทดสอบมีค่าลดลง

ตารางที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ให้กับระบบและรัศมีความโค้งที่เกิดขึ้น

Force (N)	Radius (mm)
10	66,470.20
50	62,583.48
100	53,318.87
150	40,172.55
200	33,481.43
250	26,809.21
300	24,038.26
350	20,441.46
400	19,081.11
450	18,189.89
500	15,176.76
550	14,186.76
600	13,050.87



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ณ จุดต่างๆ ของ Al Alloy (6061)



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากการทดสอบระบบ

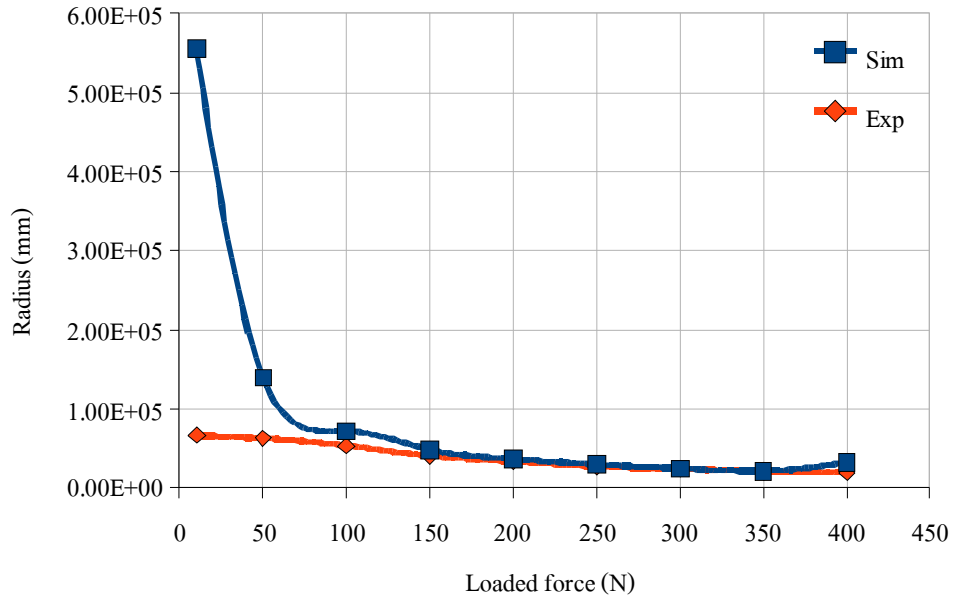
## 6.6 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลการทดสอบจริง

เมื่อพิจารณาผลจากการทดลองจริงเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ โดยโปรแกรม COSMOSWorks ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.2 และ รูปที่ 6.7 เมื่อพิจารณาแรงในช่วง 10-400 นิวตัน และ รูปที่ 6.8 เมื่อพิจารณาแรงในช่วง 100-350 นิวตัน พบว่าเมื่อให้แรงมากขึ้นจะทำให้รัศมีมีความโค้งมีค่าลดลงตามสมการความสัมพันธ์ที่ 6.1 และ 6.2 สำหรับผลการจำลองและผลการทดลองจริง ตามลำดับ

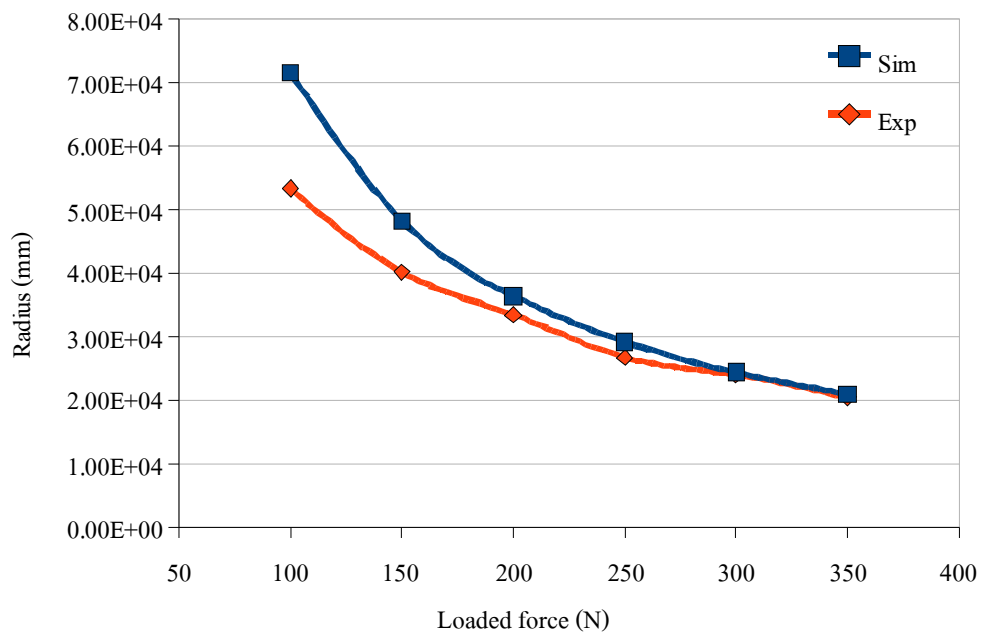
ตารางที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

Force (N)	Sim. Radius (mm)	Exp. Radius (mm)
10	556,051.00	66,470.20
50	138,868.00	62,583.48
100	71,633.30	53,318.87
150	48,283.50	40,172.55
200	36,411.00	33,481.43
250	29,230.70	26,809.21
300	24,411.30	24,038.26
350	20,957.20	20,441.46
400	31,575.10	19,081.11





รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากผลการจำลอง  
เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่แรง 10–400 นิวตัน



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งจากผลการจำลอง  
เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่แรง 100–350 นิวตัน

จากข้อมูลที่ได้นำไปหาสมการความสัมพันธ์จากโปรแกรมแมทแลป โดยพิจารณาค่าแรงและรัศมี ความโค้งที่เกิดขึ้นของระบบ เมื่อพิจารณาค่าของแรงในช่วง 100-350 นิวตัน จะได้สมการโพลิโนเมียลอันดับ 5 ที่  $R\text{-square} = 1$  ดังนี้

$$R_{Sim} = -8.315e-8x^5 + 0.0001128x^4 - 0.06205x^3 + 17.67x^2 - 2,743x + 2.209e-5 \quad (6.1)$$

$$R_{Exp} = -5.048e-7x^5 + 0.0005735x^4 - 0.2523x^3 + 53.96x^2 - 5,761x + 2.899e-5 \quad (6.2)$$

โดยที่  $x$  คือ ค่าของแรงที่ให้กับระบบมีหน่วยเป็นนิวตัน  
 $R$  คือ รัศมีความโค้งที่เปลี่ยนแปลงไปมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากผลการจำลองและผลการทดลองจริงพบว่า สมการที่ได้มีความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ดังตารางที่ 6.3

$$\text{เมื่อกำหนดให้ } \Delta R = \Delta P1x^5 + \Delta P2x^4 + \Delta P3x^3 + \Delta P4x^2 + \Delta P5x + \Delta P6 \quad (6.3)$$

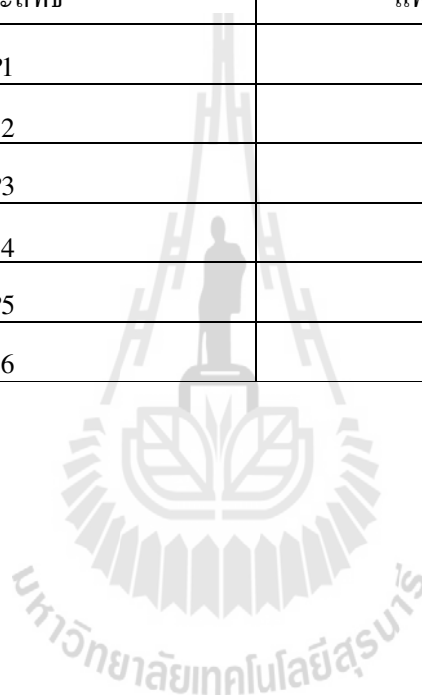
ตารางที่ 6.3 ค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ระหว่างผลการจำลองและผลการทดลองจริง

สัมประสิทธิ์	ค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์
$\Delta P1$	4.2165e-7
$\Delta P2$	4.6070e-4
$\Delta P3$	0.190250
$\Delta P4$	36.29000
$\Delta P5$	3018.000
$\Delta P6$	6.900e-6

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจริงเพื่อหาแฟกเตอร์สำหรับระบบที่พัฒนาขึ้น โดยทำให้สมการผลการทดลองจริงดังสมการที่ 6.2 มีค่าเท่ากับผลจากการจำลอง ดังนั้นจะต้องคูณแฟกเตอร์สำหรับการออกแบบระบบนี้กับสมการที่ 6.2 โดยพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งจะได้แฟกเตอร์สำหรับการออกแบบระบบสำหรับงานวิจัยนี้ดังตารางที่ 6.4 ซึ่งเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์  $P1 - P6$  ไปคูณร่วมกับสมการที่ 6.2 จะทำให้ได้ค่าตรงกับผลการจำลอง

ตารางที่ 6.4 แฟกเตอร์ที่ได้จากการออกแบบชุดปรับความโค้งของกระจกที่พัฒนาขึ้น

สัมประสิทธิ์	แฟกเตอร์ที่ต้องคูณร่วม
$P1$	0.1647187005
$P2$	0.1966870096
$P3$	0.2459373761
$P4$	0.3274647887
$P5$	0.4761326150
$P6$	0.7619868920



## บทที่ 7

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการศึกษาออกแบบชุดปรับความโค้งกระจกสำหรับแสงซินโครตรอนเพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับสถานีทดลองที่ 3 และสถานีทดลองอื่น ๆ ในอนาคตเพื่อรองรับเทคนิคการวัดต่าง ๆ ของห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ซึ่งกระบวนการออกแบบนั้นมีความซับซ้อนเนื่องจากต้องใช้ความรู้วิศวกรรมหลายด้าน เช่น ฟิสิกส์ เครื่องกล ไฟฟ้า และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น สำหรับระบบที่ได้เลือกในงานวิจัยคือ ชุดปรับความโค้งกระจกแบบสองแขน (2-arm bender) ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถปรับแรงที่ให้กับระบบทั้งสองด้านได้อย่างอิสระจากกัน ในกรณีที่ต้องการประกอบหรือการติดตั้งระบบอาจทำให้จุดศูนย์กลางเปลี่ยนไป ทำให้ง่ายต่อการปรับจุกโฟกัสของลำแสงทั้งหมดเพื่อให้ตกบน Field of view (FOV) ของเทคนิคการวัด X-PEEM มากที่สุดเพื่อให้ผลที่ได้สำหรับเทคนิคการวัดนี้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากการศึกษาและพัฒนาชุดต้นแบบสำหรับปรับความโค้งกระจกโดยการเปรียบเทียบผลจากการจำลอง และผลที่ได้จากการทดลองจริงพบว่าชุดปรับความโค้งกระจกที่ออกแบบขึ้นให้ผลเป็นที่น่าพอใจกล่าวคือ จากการออกแบบด้านเทคนิคระบบลำเลียงแสงต้องการรัศมีความโค้งกระจกในช่วง 50,000-60,000 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถปรับจุกโฟกัสของลำแสงทั้งหมดตกลงบน Field of view (FOV) ของเทคนิคการวัด X-PEEM มากที่สุด พบว่าต้องให้แรงกับระบบในช่วง 50-100 นิวตัน สำหรับวัสดุทดลองที่ใช้แทนกระจกสำหรับงานวิจัยนี้คือ Al Alloy (6061) มีขนาดยาว 300 มิลลิเมตร x กว้าง 40 มิลลิเมตร x หนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการจำลองทางวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงใช้แรงน้อยกว่าผลการจำลองจากโปรแกรม COSMOSWorks 70 นิวตัน ซึ่งเป็นผลดีต่อการลดความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบเนื่องจากแรงที่ใช้้น้อยลง ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นน้อยลงไปด้วย และผลจากการที่ใช้แรงน้อยลงอาจเนื่องมาจากการประกอบระบบทำให้เกิดแรงสะสมบางส่วนขึ้นกับกลไกส่งผ่านแรงเสมือนเป็นค่าแรงเริ่มต้นของระบบ เมื่อทำการพิจารณาผลที่ได้เพื่อหาแฟกเตอร์สำหรับการออกแบบระบบดังกล่าว ได้ค่าแสดงดังตารางที่ 6.4 ซึ่งเป็นค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากขั้นตอนการประกอบระบบหรือสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ในการทดลอง เมื่อนำไปคูณร่วมกับสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลอง

ที่ 6.2 ทำให้ค่าที่ได้มีค่าเท่ากันตามผลการจำลองคือ สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงและรัศมีความโค้งโพลีโนเมียลอันดับที่ 5 โดยพิจารณาที่  $R\text{-square} = 1$

ในงานวิจัยนี้ได้เลือก Al Alloy (6061) เป็นวัสดุทดสอบแทนวัสดุใช้งานจริง เนื่องจาก Al Alloy (6061) มีคุณสมบัติเชิงกลที่มีค่าคุณสมบัติบางตัวใกล้เคียงกันคือ ค่า Density และ Poisson Ratio ไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับวัสดุที่ใช้งานจริง เมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น เหล็ก สแตนเลส เป็นต้น อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในภายในประเทศ และมีใช้งานอยู่แล้วในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนและยังมีราคาถูกอีกด้วยเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ จากผลการทดลองวัสดุทดสอบแทนกระจกจริงที่ใช้ Al Alloy (6061) ทำให้เรามั่นใจได้ว่าระบบปรับความโค้งกระจกแบบสองแขนที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับรัศมีความโค้งได้ในช่วงที่ต้องการตามการออกแบบและให้ค่าใกล้เคียงกับผลการจำลองของกระจก Zerodur สำหรับใช้จริงในระบบลำเลียงแสงของสถานีทดลองที่ 3 ห้องปฏิบัติการแสงสยาม ซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างแก้วและเซรามิก มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีการขยายตัวน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง จากงานวิจัยนี้ทำให้เรามั่นใจได้ว่าระบบดังกล่าวที่พัฒนาขึ้น สามารถทำงานได้จริงและใช้เป็นแนวทางสำหรับพัฒนาระบบอื่น ๆ ต่อไปในอนาคต เนื่องจากกระจกจริงมีราคาค่อนข้างแพงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ถ้าไม่ได้มีการศึกษามาก่อน

เมื่อพิจารณาในทางเศรษฐศาสตร์มูลค่าของงานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนจากการนำเข้าจากต่างประเทศในเรื่องเทคโนโลยีแสงซินโครตรอนได้เป็นจำนวนมากกล่าวคือ เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนที่เราพัฒนาขึ้นเองเมื่อรวมถึงห้องสุญญากาศและระบบควบคุมจะมีราคาประมาณ 500,000 บาท และต้นทุนที่เรานำเข้าจากต่างประเทศราคาประมาณ 2,500,000 บาท ซึ่งจะเห็นว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ถึง 80% หรือ 1 ใน 5 เท่าของราคาที่นำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งยังเป็นการเริ่มต้นและพัฒนากระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องมือการทดลองทางวิทยาศาสตร์สำหรับงานวิจัยขึ้นเองภายในประเทศอีกด้วย และการศึกษาดังกล่าวเป็นการเริ่มต้นพัฒนาระบบปรับความโค้งกระจกสำหรับระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนเป็นครั้งแรกภายในประเทศ เพื่อรองรับการขยายสถานีทดลองในอนาคตสำหรับการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนเพื่อพัฒนางานวิจัยในประเทศต่อไป

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาออกแบบและพัฒนาระบบปรับความโค้งกระจกดังกล่าว ผลที่ได้จากกระบวนการและปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำการวิจัย ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางการพัฒนาในอนาคต ในส่วนของการประกอบและติดตั้งระบบที่พัฒนาขึ้นต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมากเนื่องจากระบบต้องการความละเอียดสูง เช่น การตรวจสอบผลจากการ

สวมอัดหรือผลจากการยึดโครงสร้างกลไกต่าง ๆ ของระบบเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจทำให้จุดศูนย์กลางของระบบตามที่ออกแบบไว้เกิดความคลาดเคลื่อนได้และส่งผลกระทบต่อค่าเริ่มต้นของรัศมีความโค้งของวัสดุทดสอบ ทำให้การปรับจุดโฟกัสของลำแสงที่ได้บน Field of view (FOV) ของเทคนิคการวัด X-PEEM มีความคลาดเคลื่อนไปด้วย ส่วนการวัดรัศมีความโค้งที่เกิดขึ้นอาจใช้ระบบการวัดแบบเซนเซอร์ชนิดแสง (Optical sensor) ซึ่งจะทำให้การวัดไม่มีการสัมผัสกับวัสดุทดสอบทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้นแต่มีราคาค่อนข้างราคาแพงเนื่องจากต้องใช้ความละเอียดสูงในระดับไมโครเมตร และสุดท้ายในการออกแบบต้องคำนึงถึงอุปกรณ์และวัสดุต่าง ๆ ที่จะใช้ในระบบต้องสามารถอยู่ในระบบสุญญากาศได้เพราะการใช้งานจริงชุดปรับความโค้งของกระจกจะต้องอยู่ในห้องสุญญากาศอีกครั้งหนึ่ง



## รายการอ้างอิง

- วิศรุต ศรีรัตนะ (2550). เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม. **ซีอีเคยูเคชั่น**. กรุงเทพฯ ๗ : 16-22
- Bhattacharyya, D., Jha. S N., Das, N C., Verma, V., Markan deya, S G. and Ghosh, A K. (2005). Simulation of temperature distribution by finite element analysis on different components of the EXAFS beamline at INDUS-II Synchrotron source. **Sadhana**. **30(6)**: 735-755.
- Das, NC., Jha, S N., Bhattacharyya, D., Poswal, A K., Sinha, A k. and Mishra, V K. (2004). Design, fabrication and testing of elliptical crystal bender for the EXAFS beam-line at INDUS-II Synchrotron source. **Sadhana**. **29(5)**: 545-577.
- Eybert, L., Wulff, M., Reichenbach, W., Plech, A., Schotte, F., Gagliardini, E., Zhang, L., Hignette, O., Rommereaux, A. and Freund, A. (2002). **The Toroidal Mirror for Single-Pulse Experiments on ID09B**, Argonne, Illinois USA.
- Howells, M.R. and Paquin, R.A. (1997). Optical Substrate Materials for Synchrotron Radiation Beamlines. **SPIE Optical Science, Engineering and Instrument**. LBNL-40659, UC-410, San Diego, CA: 2-6.
- Johnson, E., Lyndaker, A., Deyhim, A., Sullivan, M., Chance, M., Able, D., Toomey, J. and Hulbert, S. (2006). **White Light Focusing Mirror. The Ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrument**, Daegu, Exco, Korea.
- Kamachi, N., Nakagawa, J., Endo, K., Kanashima, T. and Ohashi, H. (2006). Performance of Microfocussing by Elliptical Bendable Mirrors for Soft X-ray. **2<sup>nd</sup> International workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI02)**, Argonne, Illinois USA.
- Kamachi N., Endo K., Ohashi H. and Ishikawa T. (2002). Characteristics of Mechanically-Bent-Shaped Mirror. **2<sup>nd</sup> International workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI02)**, Argonne, Illinois, USA: 113-121.

- Padmore H. A., Howells M.R., Irick S., Renner T., Sandler R. and Koo Y. M. (Con. Aug 1996). Some new schemes for producing high-accuracy elliptical X-ray mirrors by elastic bending. **Proc. SPIE**, Denver.
- Rah, S., Locklin, S., Irick, S. and Howells, M.R. (1997). New Schemes in the Adjustment of Bendable, Elliptical Mirror Using a long Trace Profiler, **International Conference on Optical Science, Engineering and Instrument**, San Diego, CA.
- Sonhsiriritthigul, P., Kjornrattanawanich, B., Tong-On, A. and Nakajima, H. (2007). Design of the First undulator beamline for Siam Photon Laboratory. **Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A582**: 100-102.
- Suthummapiwat A., Oonsivilai A., songsiriritthigul P., Pao-La-Ord P., Marungsri B. and Sophon M. (July 2009). Desing Study of Mirror Bender for a Synchrotron Light Beamline. **Proc. Int Conf. on Science Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB)**, Thailand: 89.
- Ugural A. C. and Fenster S. K. (1995). **Advanced Strength and Applied Elasticity. 3<sup>rd</sup> ed, Englewood Cliffs: Prentice Hall.**
- Young W. C. (1989). **Roark's Formula for Stress and Strain, 6<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill.**
- Zhang L. , Hustache R. , Hignette O. , Ziegler E. and Freund A. (1998). Design optimization of a flexural hinge-based bender for X-ray optics. **J. Synchrotron Rad. 5**: 804-807.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, light gray watermark centered on the page. It features a stylized figure of a person standing on a path that leads upwards, flanked by two large, stylized letters 'H'. Below this, there is a circular emblem containing a book and a lamp, with the Thai text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' (Mahavithayalai Techno Suranaree) written in a circular path around the bottom.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

## Design Study of Mirror Bender for a Synchrotron Light Beamline

A. Suthummapiwat <sup>a,c</sup>, A. Oonsivilai <sup>d</sup>, P. Songsiririthigul <sup>ab</sup>, P. Pao-La-Or <sup>d</sup>,  
B. Marungsri <sup>d</sup> and M. Sophon <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Synchrotron Light Research Institute (Public Organization).

<sup>b</sup> School of Physics, Institute of Science.

<sup>c</sup> School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering.

<sup>d</sup> School of Electrical Engineering, Institute of Engineering.

Suranaree University of Technology 111 University Avenue,  
Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000  
Tel.08-1548-7728, 08-5028-5363 Fax.0-4421-7047

E-mail: apirak\_sut@slri.or.th, anant@sut.ac.th, prayoon@slri.or.th, padej@sut.ac.th,  
bmshvcc@sut.ac.th, mathcc@slri.or.th

### Abstract

This article presents the design study of a two-arm mirror bender to provide the flexibility of beam size adjustment on the sample in the BL3 synchrotron light Beamline at the Synchrotron Light Research Institute. In the design study, the COSMOS finite-element-base program is used to simulate and find the relationship between the radius of curvature of the mirror and the force for bending the mirror. In this work, two types of materials are used as the substrate of the mirror, i.e. Al Alloy-6061 and Zerodur. The dimensions of the mirror are 40mm×300mm×15mm. The mechanical parts of the mirror bender are stainless steel SS304. In the simulations, we aim to find suitable the acting force to bend the planar mirror to a curved mirror with a required radius of between 50,000-60,000 mm. It is found that the force required is 100-150 N for Al alloy-6061 mirror and 150-200 N for Zerodur mirror. It should also be noted that the force should not exceed 300 N, corresponding to 80% percent of the yield stress value.

**Keywords:** synchrotron light beamline, mirror bender, Zerodur, COSMOS

### 1. Introduction

Synchrotron light is a source of the electromagnetic radiation emitted when charged particles are accelerated close to speed of light in a curve path. The main characteristics of synchrotron light are the high brightness and wide energy spectrum from infrared-hard x-ray. Synchrotron light has been applied to analysis of materials in various measurement techniques. A synchrotron light beamline is used to deliver light from the source to the experimental station, located at the end of the beamline. Different kinds of optical elements are employed in the optical system of the beamline, depending on the required beam characteristic at each experimental station.

X-PEEM (X-ray Photoemission Electron Microscopy) is one of powerful imaging spectroscopic, or spectromicroscopic, technique. The technique provide both image and (energy) spectrum in the same measurement. The spatial resolution of X-PEEM is of about 20 nm. Thus, it is also suitable for investigation of nanostructures.

The principle of X-PEEM is illustrated in Fig. 1. Synchrotron light with sufficient photon energy is used to excite the atoms in specimen. Electrons emitting from the specimen, called photoelectrons, are collected and magnified by a series of electric/electromagnetic lenses. The final image is projected on a micro-channel plate (MCP) to multiply the number of electrons. Then, the electros are accelerated to impinge on

International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Maharakham University, Thailand

the fluorescence screen, producing visible contrast image viewed by human eyes or a CCD camera. The contrast mechanism of the image is the results of work function, topology, magnetic domain, elemental and chemical natural of the surface of the specimen.

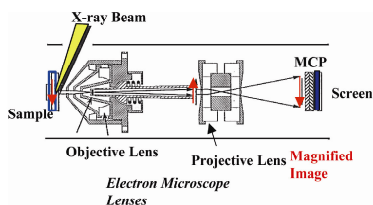


Fig. 1: Diagram of the PEEM BL7.3.1 the Advanced Light Source, US.

A new beamline is being constructed at the Siam Photon Laboratory of the Synchrotron Light Research Institute (SLRI). The beamline will deliver synchrotron light produced from the first undulator at SLRI for X-PEEM and photoemission spectroscopy (PES) measurements. The optical layout of beamline is shown in Fig. 2. It consists of the pre-focusing mirror TO, a monochromator (from S1 to S2), and two post-focusing mirror systems.

The mirror TO vertically focus the beam into the entrance slit S1 of the monochromator. Two focusing mirror, M1/1 and M1/2, are used for two different photon energy ranges. The two post focusing mirror systems are used in the time-sharing mode for the type of measurement techniques. This work relates to the post-focusing system for the X-PEEM experimental station. There are two mirrors in this branchline; i.e. the M2V mirror for vertical focus and the M2H mirror for the horizontal focus. To make the most use of the light beam, the beam size on the specimen at the X-PEEM station must be varied with the field-of-view (FOV) of the microscope, which is between 2-100 microns in diameter. However, in the optical design the beam size in the horizontal direction is restricted by the large horizontal source size to be fixed about 150 micron at full-width-half-maximum. Thus, only the beam size in the vertical direction can be varied. The change in the beam size on the specimen can be obtained by changing the radius of curvature and thus the focal point of the M2H mirror. This is illustrated in Fig 3.

The relation between the entrance armlength ( $r$ , or the source distance), the exit armlength ( $r'$ , or the image distance), the angle of incidence ( $\alpha$ ) and the radius of curvature of cylindrical surface ( $R$ ) is given by the Eq. (1)

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \alpha}{r'} = \frac{2 \cos \alpha}{R} \quad (1)$$

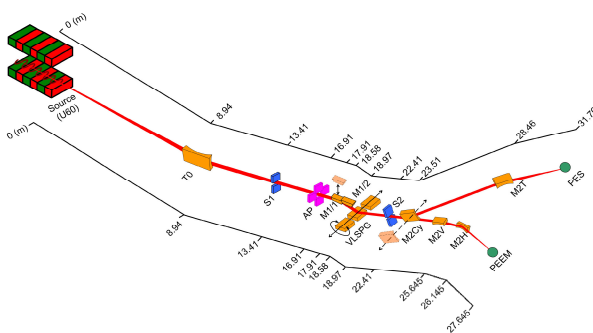


Fig. 2: The Geometrical layout of BL3 [1]

International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

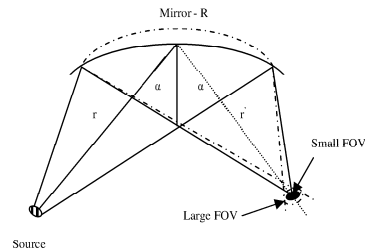


Fig. 3: Changing the size of beam on sample by changing curvature radius of the mirror.

Fig 3 illustrates that when the light beam is focused at the position of the specimen, the beam size is the smallest point suitable for the small FoV of X-PEEM. When the focal point is moving out from the position of the specimen, the beam size on the specimen is getting larger. The change in the position of the focal point can be obtained by changing the radius of curvature of the mirror.

The relation between the applying force and the change in curvature is complex, depending on the characteristic of the material of the mirror [2]. The mirror M2V used in this work is made of Zerodur coated with 50nm-thick gold film. Zerodur is a mixture between glass and ceramic materials. It has very low thermal expansion with the coefficient of approximately  $\pm 0.15 \times 10^{-6}/\text{C}$  at room temperature.

## 2. Design of mirror bender taking system

### 2.1 Theory and calculations

General equation for the moment at end of both sides of a mirror is set catch confiscated  $M_1 = hF_1$  and  $M_2 = hF_2$ . The adjustment of the radius of curvature of a mirror bender can accurately be analyzed using the theorem of beam [3]. Changing the shape of the beam under the moments  $M_1$  and  $M_2$ , as shown in Fig. 4, can be explained by the differential equation given in Eq. 2 for visual effects [4].

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \left(\frac{h}{EI}\right) \left[ \frac{F_1 + F_2}{2} + \left(\frac{F_2 - F_1}{L}\right)x \right] \quad (2)$$

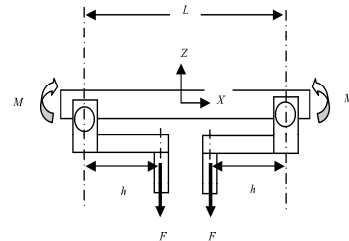


Fig. 4: Mechanism of structure for simulation mirror bender

where  $E$  is the young modulus,  $h$  is the distance between perpendicular force and the ration center of the beam.  $I = t^3(w/12)$  is the moment of inertia, where  $t$  is the thickness,  $w$  is the width and  $L$  is the length of mirror,  $z$  is the distance along axis of curve change and  $x$  is the length along axis of mirror.

Changing the radius of curvature of the mirror can be obtained from the equation  $R \approx 1/(d^2z/dx^2) \approx EI/hF$ . In taking the moment between both systems allows the nucleus to change or spindle unalike. Therefore, a constant factor must be added into equation. The value of the bending loss factor is a constant which depends on the system design [5], available only from experiments. Therefore, Eq. 2 will be modified by multiplying the loss bending-factor.

### 2.2 Design of mechanism

In the past, several mechanisms for a mirror bender system have been studied for synchrotron applications. For example, the curved adjustment of cam that was designed and made to be in a single structure, which is obtained by wire-cut technique. In this work, two-arm bender is chosen to be a prototype. The dimension of the bender is 320mm x 160mm x 134 mm. The materials used are locally available. The advantages of the two-arm bender system is that it is able to force the system independently in nucleus cases changed. The structure was designed and tested by using the SOLIDWORKS program. The adjustment of curvature can be done from the end of edge moment of both sides mirror [6] by transmitting

force in both arms, to cleave rotation of a series showing the Fig. 5.

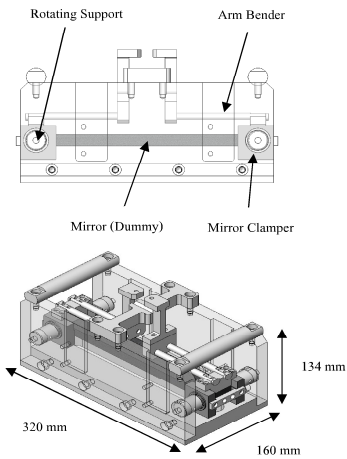


Fig. 5: Structure model of mechanism two-arm bender design.

The design toward that the size of structure is suitable and possible to create a system for implementation, because of majority can do and make revisions easy to balance when developing or designing more later.

**3. Simulation by finite element base program**

The simulation results from finite element management to help with the COSMOS program and define the properties of material instead of glass, this research we use Al Alloy-6061 and Zerodur for testing [7]. The mirror used in beamline has actual size of 15mm×40mm × 300mm to study effect of force to radius of curvature material instead of mirror transition. For examples, results of simulation by finite element method show in Fig. 6 simulation results found that when the force system with increasing radius of curvature will cause a decrease as shown in the Table 1 and Fig. 7, shows the relationship between force and radius of curvature changes by simulation

results of study period at half length of material instead of mirror to reduce time to calculate because it is symmetrical. When the results have created an equation of relationship between force and curvature radius. Then make a fit curve to the relationship equation 3 and 4 for Al Alloy- 6061 and Zerodur respectively.

Table 1: Radius to shift and force add to system between Al Alloy-6061 and Zerodur

Al Alloy-6061		Zerodur®	
Force (N)	Radian (mm)	Force (N)	Radian (mm)
10	556,051.00	10	731,806.00
50	138,868.00	50	18,2034.00
100	71,633.30	100	93,859.80
150	48,283.50	150	63,239.80
200	36,411.00	200	47,679.70
250	29,230.70	250	38,259.20
300	24,411.30	300	31,954.60
350	20,957.20	350	27,437.70

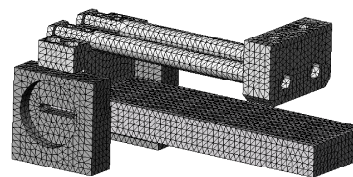


Fig. 6: Simulation of COSMOS program

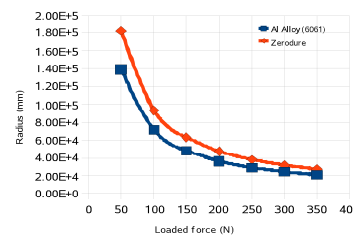


Fig. 7: The relationship between force and radius of changes.

International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

curve fit of result by force between 50 to 350 N a relationship equation is :

$$R_{\text{Al Alloy-6061}} = -3E-07x^5 - 0.181x^3 + 42.63x^2 - 5221x + 31371 \quad (3)$$

$$R_{\text{Zerodur}} = 1E-09x^6 - 2E-06x^5 + 0.001x^4 - 0.400x^3 + 75.88x^2 - 8,034x + 43,720 \quad (4)$$

where x is the value of the force to a system in newton unit and R is the radius of curvature change is in millimeter unit.

#### 4. Conclusion

In the simulations using the force between 10 and 350 N, it is found that radius value of both types of test materials changed during 556,051 mm to 20,957.20 mm and 731,806mm to 27,437.70 mm. for Al Alloy-6061 and Zerodur, respectively. Technical design of the optical transport systems found that the radius value that can adjust the size of the beam at the specimen position as needed, in the range of approximately 50,000-60,000 mm. It is also found that the required acting force to adjust the radius of curvature are in range between 100-150 N requires force and 150-200 N for Al Alloy-6061 and Zerodur, respectively. When regarding the overall structure and the force add to system, the values determined by Max von Mises Stress for a decisive point, or damage will occur. Preliminary tests found that force add to system that starts damage is 300 N for Al Alloy-6061 and Zerodur by considering that 80% percent of the yield stress value Al Alloy-6061. The simulation results also show that the designed system is practical. The system can further be developed based on the current results for better performance.

#### 5. Acknowledgement

The fund provided by SUT research and development fund this study and colleagues in beam division of synchrotron light research institute (Public Organization) for consulting, systems design.

#### 6. References

- [1] P. Songsirithigul, et al., Nucl. Instr. And Meth. A 582, pp.100-102, 2007.
- [2] H. A. Padmore, et al., Proc. SPIE, 2856, pp.145-157, 1996.

- [3] W. C. Young, Roark's Form. for Stress and Strain, 6th ed : McGraw-Hill, 1989.
- [4] A. C. Ugural & S. K. Fenster, Adv. and App : Prentice Hall, 1995.
- [5] L. Zhang, et al., J. Synchrotron Rad. 5, pp.804-807, 1998.
- [6] N. Kamachi, et al., MEDSI02, pp.113-121, 2002.
- [7] M. R. Howells & R. A. Paquin, Opt. for Sync. LBNL-40659, UC-410, pp.2-6, 1997.

## Investigation on Adjustable Mirror bender Using Light beam Size

A. Oonsivilai, A. Suthumapiwat, and P.Songsritthigul

**Abstract**—In this research, the use of light beam size to design the adjustable mirror bender is presented. The focused beam line characterized by its size towards the synchrotron light beam line is investigated. The COSMOSWorks is used in all simulation components of curvature adjustment system to analyze in finite element method. The results based on simulation covers the use of applied forces during adjustment of the mirror radius are presented.

**Keywords**—light beam-line, mirror bender, synchrotron light machine.

### I. INTRODUCTION

THE new developments and advances in science and technology have been experienced in the few past decades. The applications of these new inventions are found in many systems. One of these applications is the synchrotron light machine.

The Synchrotron light is the electromagnetic radiation emitted when electrons, moving at velocities close to the speed of light, are forced to change direction under the action of a magnetic field. The synchrotron light is unique in its intensity and brilliance and it can be generated across the range of the electromagnetic spectrum: from infrared to x-rays. Applications of synchrotron light are used in many aspects such as physical science, biological physics and so forth. The synchrotron light machine is composed of many important parts including the beam line system. This system comprises many parts such as vacuum tube, vacuum chamber and especially, optical equipments. The optical equipments are mirror grating and crystal etc. functioning to select wavelength, size and focusing of beam light that point at study sample. One of the important techniques in synchrotron applications is X-PEEM (X-ray Photoemission Electron Microscopy) applying in nano-structure spectroscopy and

even in taking photo in micro-nano scale. The principle of X-PEEM is to use suitable soft X-rays or vacuum ultraviolet range to excite electron in atom of sample emitted from sample for studying its photoelectron. Photoelectron energy depends on energy levels of atom, type of atom and wavelength of exciting x-rays. Photoelectrons having diameters about 2-100 microns are emitted collected and amplified by equipments that similar to use in SEM (scanning electron microscopy). Amplified electron is brought to image on screen as shown in figure 1 that able to measure in chemical analysis of minute area (<100 nanometer). Intensity or contrast of picture that images on screen is the characteristics of surface, type of atom, work function of material and/or characteristic of magnetic domain.

New beam-line system has been constructing in Siam Photon lab at SLRI (Synchrotron Light Research Institute). It will use synchrotron light produced from an undulator machine to apply for X-PEEM technique and PES (Photoemission spectroscopy) [1]. Optical equipments of the beamline shown in figure 2 consist of a mirror TO to focus synchrotron light into S1 of monochromator. Part of the monochromator is to start at inlet S1 to outlet S2. Behind monochromator, light is able to use either X-PEEM or PES technique by moving in and out of M2C<sub>y</sub> mirror. This work points at focusing system of X-PEEM technique for focusing synchrotron light on sample in microscale and keeping most part of light is in right position of X-PEEM microscope for high performance.

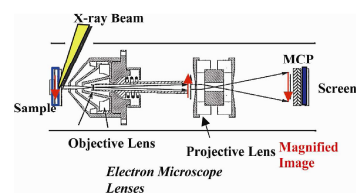


Fig. 1 Diagram of PEEM at BL7.3.2 of Advanced Light.

Focusing system behind monochromator is composed of M2V and M2H mirrors that have cylinder surface to focus light in vertical and horizontal, respectively. M2H has constant radius on surface so that size of beam on sample is about 150 microns. On the other hand, M2V is able to adjust curvature radius value for selecting the beam size in vertical. Required curvature radius is in between 50,000mm to 60,000mm.

A. Oonsivilai is with Smart Materials and Intelligent System and Alternative and Sustainable Energy Research Unit, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (corresponding author to provide phone: +66 (0)815-48-7728; fax: +66(0) 44-21-7047; e-mail: anant@ sut.ac.th).

A. Suthumapiwat is with School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 ( e-mail: Apirak\_sut@ slri.or.th).

P. Songsritthigul is with Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (e-mail: Prayoon@ slri.or.th).

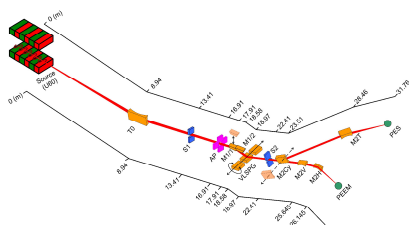


Fig. 2 Diagram of optical alignment of BL3 [1]

Therefore, all parts of light are on FOV (Field of view) of microscope XPEEM (2-150 microns). This technique is relative to beam size hitting to sample and amplified system of microscopy technique. Beam adjustment is significant so that mirror bender system is needed and used to change the focus of beam position on sample as shown in figure 3. Hence, beam adjustment on sample is worked by changing curvature radius of mirror related to FOV of X-PEEM.

The relation between the entrance armlength ( $r$ , or the source distance), the exit armlength ( $r'$ , or the image distance), the angle of incidence ( $\alpha$ ) and the radius of curvature of cylindrical surface ( $R$ ) is given by the Equation 1

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \alpha}{r'} = \frac{2 \cos \alpha}{R} \quad (1)$$

Figure 3 shows that the smallest beam occurs when curvature radius of mirror is forced to focus beam in as same position as sample. Beam size is able to adjust by changing focusing point at before or behind sample. In general, mirror base for beam focusing in UV range is made from Zerodur or Silicon coated metallic thin film that is good in reflection such as gold or nickel. For M2V mirror will be built from Zerodur material which is mixed between glass and ceramic and has nearly zero thermal expansion ( $\pm 0.15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) at room temperature.

Beam adjustment for minute size is complex and difficult for giving precise moment or accuracy force [2] that this is an important thing and interesting to design and build the mechanical movement in the first time in our country.

II. DESIGN OF TWO-ARM MIRROR BENDER SYSTEM

To design and develop two-arm mirror bender that SolidWorks program is used to design each part of its structure. When the whole parts are constructed, its system is tested and simulated by relative equation between force and changing curvature radius of mirror. By simulation, the mirror is Al Alloy(6061) compared to Zerodur material. Cosmos program combined with SolidWorks is used for finite element method and simulation of force to act on the system. Results

from the simulation obtain and analyze for building a real system.

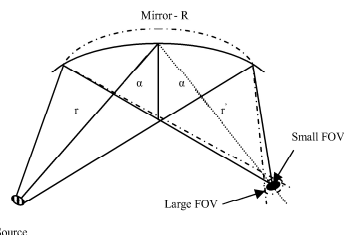


Fig. 3 Beam adjustment on sample by changing curvature radius of mirror

A. Theory and calculation

General equation for the moment at end of both sides of a mirror is set catch confiscated  $M_1 = hF_1$  and  $M_2 = hF_2$ . The adjustment of the radius of curvature of a mirror bender can accurately be analyzed using the theorem of beam [3]. Changing the shape of the beam under the moments  $M_1$  and  $M_2$ , as shown in figure 4, can be explained by the differential equation given in Equation 2 for visual effects [4].

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \left(\frac{h}{EI}\right) \left[ \frac{F_1 + F_2}{2} + \left(\frac{F_2 - F_1}{L}\right)x \right] \quad (2)$$

where  $E$  is the young modulus,  $h$  is the distance between perpendicular force and the ration center of the beam.  $I = r^3(w/12)$  is the moment of inertia, where  $r$  is the thickness,  $w$  is the width and  $L$  is the length of mirror,  $z$  is the distance along axis of curve change and  $x$  is the length along axis of mirror.

Changing the radius of curvature of the mirror can obtained from the equation  $R \approx l/(d^2z/dx^2) \approx EI/hF$ . In taking the moment between both systems allows the nucleus to change or spindle unlike. Therefore, a constant factor must be added into equation. The value of the bending loss factor is a constant which depends on the system design [5], available only from experiments. Therefore, equation 2 will be modified by multiplying the loss bending-factor.

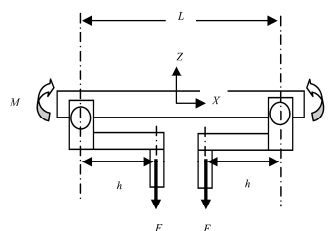


Fig. 4 Diagram of structure of mirror bender system



### B. Mechanical design

This research concentrates to two-arm curvature adjustment for a prototype having dimension of 320mm x 160mm x 134mm. All components are made in the country. The advantage of the two-arm curvature adjustment is based on the ability to apply force freely in centric system. Software that assists in design the system is Solidworks. Structures of the two-arm curvature adjustment are shown in figure 5. The curvature adjustment of the system counts on taking moment at edge of both sides of arm [6].

Most of structures are made in machine shop at Synchrotron Light Research Institute (Public organization) since it is easy to change, add and develop all of components further. Figure 6 and table I show details and all of components of the system.

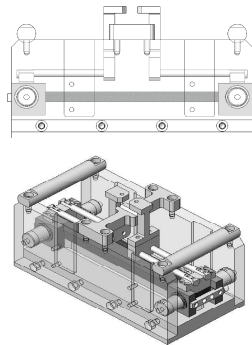


Fig. 5 Structure model of mechanism two-arm bender design.

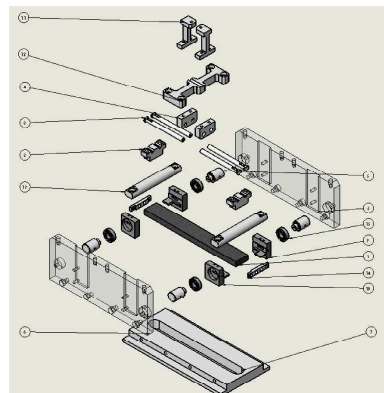


Fig. 6 Component of curvature adjustment system

TABLE I  
DETAILS OF MECHANICAL PARTS OF CURVATURE ADJUSTMENT SYSTEM

No.	Detail
1	Mirror
2	Top clamper
3	Arm bender
4	Arm combiner
5	Shaft
6	Right plate for bender
7	Base plate for bender
8	Left plate for clamper
9	Right Mirror clamper
10	Left Mirror clamper
11	Pulling up bar
12	I bridge
13	Bender handle
14	Dracket for SP
15	BS 6267 RBB-1015-Full,DE ,AC,Full_68

### III. FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION

All simulation components of curvature adjustment system are designed and used COSMOSWorks to analyze in finite element method. The test of mechanical system is to find the relation between various forces that are applied and variation of curvature radius of mirror to obtain. Furthermore, the apply force to make failure of the system takes into account.

#### A. COSMOSWorks characteristics

This project uses COSMOSWorks engineering program to use FEA (finite element analysis) in analysis of characteristics of mirror such as strength and curvature of mirror by applying force to the system. Solidworks and COSMOSWorks program work together and link information between. All components of the system create on Solidwork and analyze with COSMOSWorks. Analysis process starts from meshing geometry into small elements linked together. FEA uses partial differential equation rendering and finding the approximating system. Steps of the process divided into three basic processes as follow:

1. Preprocessing is to assign suitable material properties, and apply boundary conditions in the form of restraints and loads.
2. Solution is to calculate and solve the resulting set of equations.
3. Postprocessing is to view the results in forms of plots, contour diagrams etc.

In FEA simulation, properties of mirror defined are Al Alloy(6061) and Zerodur [7] as shown in table II and table III, respectively. Both materials have a dimension of 40mm x 300mm x 15mm. However, this research especially considers

to simulate the holder set of mirror and mirror shown in figure 7.

TABLE II  
PROPERTIES OF AL ALLOY(6061)

Property	Value	Unit
Elastic Modulus	69,000	N/mm <sup>2</sup>
Poissons Ratio	0.33	-
Shear Modulus	26,000	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	2.4x10 <sup>-5</sup>	-
Density	0.0027	g/ mm <sup>3</sup>
Thermal	170	W/ m K
Conductivity	1,300	J/Kg K
Specific Heat	124.084	N/mm <sup>2</sup>
Tensile Strength	55.1485	N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength		N/mm <sup>2</sup>

TABLE III  
PROPERTIES OF ZERODUR

Property	Value	Unit
Abbe' Constant	66	-
Dispersion (n <sub>D</sub> -n <sub>e</sub> )	0.00967	-
Density	2,530	kg/m <sup>3</sup> @ 25 C
Young's' Modulus	9.1x10 <sup>9</sup>	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.24	-
Specific Heat	2.99329	J/Kg K
Coefficient of Thermal Expansion	0.05+-0.10x10 <sup>-6</sup>	/C (20-30 C )
Maximum Temperature	600	C

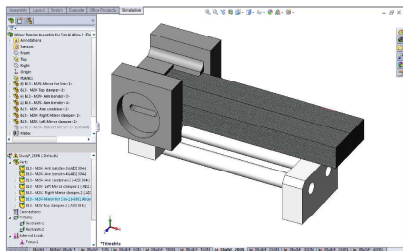


Fig. 7 Simulation of system by COSMOSWorks

IV. RESULTS AND DISCUSSION

From simulation results, various forces plotted are shown in figure 8 and 9. The results from simulation are brought to math lab to find curvature radius and indicate that the more increasing force, the more decreasing curvature radius. The relation between applied force and variation of curvature

radius is shown in table IV and figure 10. Half of structure is used as there is symmetric shape and it saves time when running simulation.

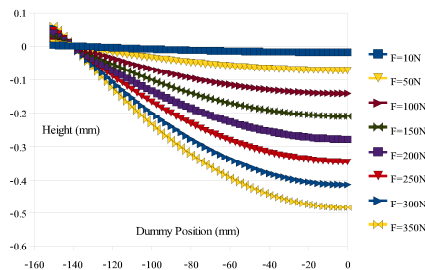


Fig. 8 Relationship between Al-Alloy(6061) position and gaining distance

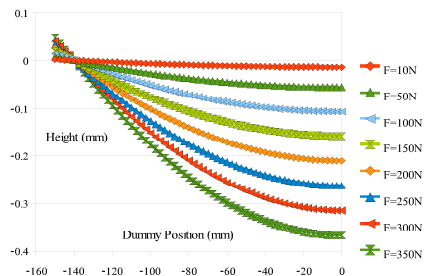


Fig. 9 Relationship between Zerodur position and gaining distance Figure 10 shows the results from two (3) and (4) that input of load force set 50-350 N is in function of invitation of curvature radius [8]. The simulation results are summarized in Table V.

$$R_{Al\ Alloy(6061)} = -3E-07x^5 - 0.181x^3 + 42.63x^2 - 5221x + 31371 \quad (3)$$

TABLE IV  
VARIATION OF CURVATURE RADIUS TO LOADING FORCE APPLYING TO SYSTEM BETWEEN AL-ALLOY (6061) AND ZERODUR

Al Alloy (6061)		Zerodur	
Force (N)	Radius (mm)	Force (N)	Radius (mm)
10	556,051.00	10	731,806.00
50	138,868.00	50	182,034.00
100	71,633.30	100	93,859.80
150	48,283.50	150	63,239.80
200	36,411.00	200	47,679.70
250	29,230.70	250	38,259.20
300	24,411.30	300	31,954.60
350	20,957.20	350	27,437.70

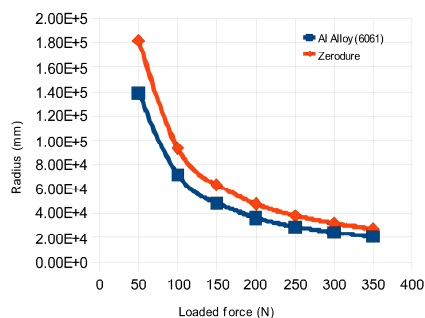


Fig. 10 Relationship between loading force and variation of curvature radius

TABLE V  
THE LOADING FORCE AND CURVATURE RADIUS FROM SIMULATION

Force (N)	Radius (mm)
10	556,051.00
50	138,868.00
100	71,633.30
150	48,283.50
200	36,411.00
250	29,230.70
300	24,411.30
350	20,957.20
400	18,000.00

$$R_{\text{Zerodure}} = 1E-09x^6 - 2E-06x^3 + 0.001x^4 - 0.400x^3 + 75.88x^2 - 8,034x + 43,720 \quad (4)$$

where x is the value of the force to a system in Newton unit and R is the radius of curvature change is in millimeter unit.

#### V. CONCLUSION

This research presents the development of mirror curvature adjustment system for synchrotron light to apply in beamline 3 at Synchrotron light research institute (Public organization). Design processes have complexity since knowledge of engineering has to be applied such as mechanical, electrical, computer and physics etc. This design system is two-arm curvature adjustment which has the advantage of adjusting force freely to both sides of arm. In a case of system assembly or installation might shift the center its system out from position making the ease of focusing beam hitting on the most of Field of view of X-PEEM technique for high accuracy and performance.

The simulation results of curvature adjustment system suitable for using in curvature radius of 50,000-60,000 mm range. In this range, it is able to focus all parts of beam light hitting on field of view of X-PEEM measurement. In addition, loading force at 50-100 N are suitable for Al Alloy(6061)

material having dimension of 300mm x 40mm x 15mm. The loading force in real experiment result is less than 50 N in FEA simulation results that helping less system damage. The different result of both results occurs since all mechanical parts of the system operate and some forces passes through them as virtual force to start initial stage of the system.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This research work is supported by Suranaree University of Technology. Helps and supports from engineers in beam-line at SLRI are greatly appreciated.

#### REFERENCES

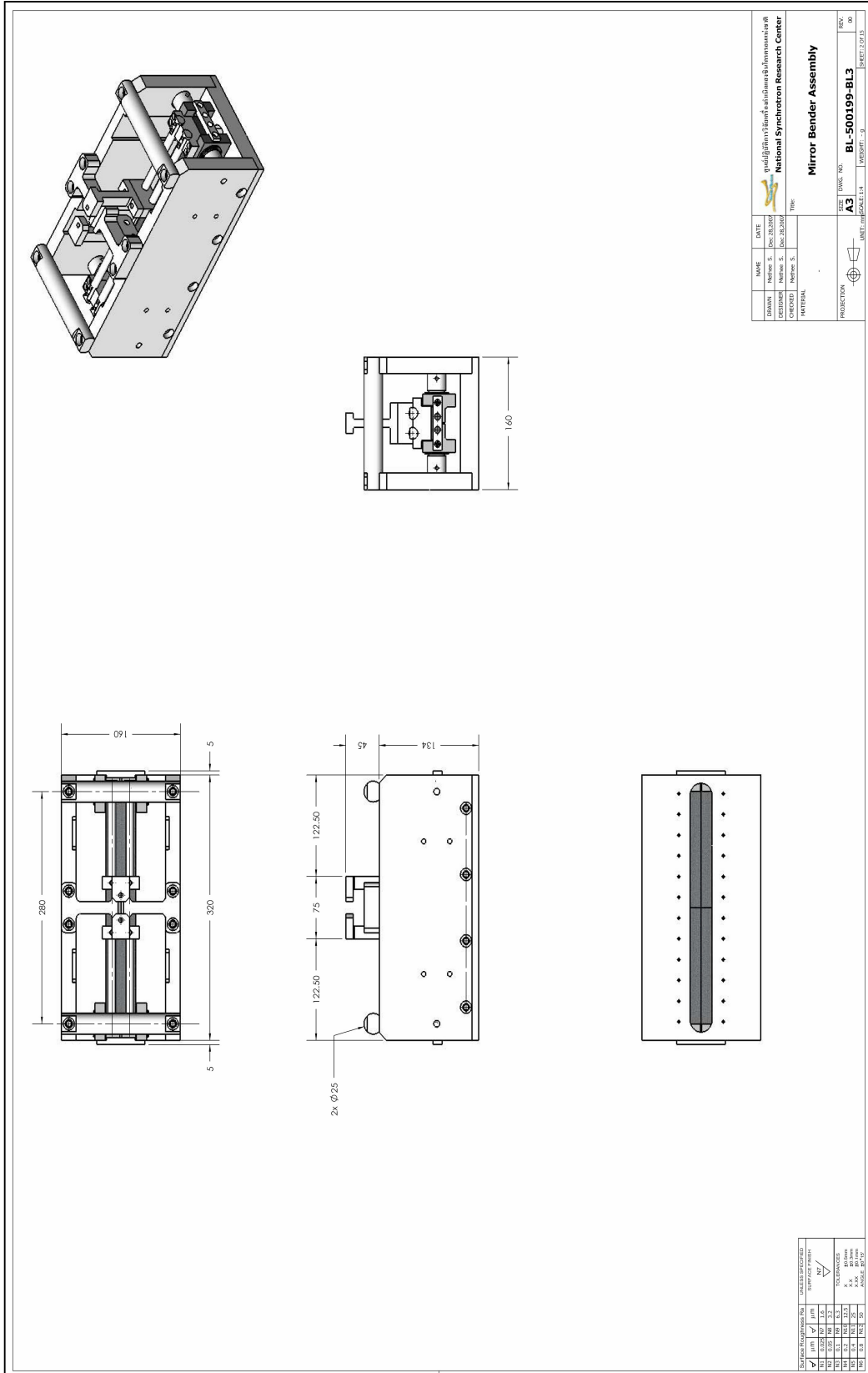
- [1] P. Songsirithigul, B. Kjonrattanawanich, A. Tong-On and H. Nakajima, "Design of the First undulator beamline for the Siam Photon Laboratory," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 582, 2007, pp. 100-102.
- [2] H. A. Padmore, M.R. Howells, S.Jrick, T.Renner, R. Sandler and Y. M. Koo, "Some new schemes for producing high-accuracy elliptical X-ray mirrors by elastic bending," *Proc. SPIE*, Denver, Co Aug. 1996.
- [3] W. C. Young, *Roark's Formula for Stress and Strain*, 6<sup>th</sup> ed, McGraw-Hill, 1989.
- [4] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 3<sup>rd</sup> ed, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995.
- [5] L. Zhang, R. Hustache, O. Hignette, E. Ziegler and A. Freund, "Design optimization of a flexural hinge-based bender for X-ray optics," *J. Synchrotron Rad.* 5, 1998, p. 804-807.
- [6] N. Kamachi, K. Endo, H.Ohashi and T. Ishikawa, "Characteristics of Mechanically-Bent-Shaped Mirror," *2<sup>nd</sup> International workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDS02)*, Argonne, Illinois, USA, 2002, pp. 113-121.
- [7] M. R. Howells and R. A. Paquin, "Optical Substrate materials for Synchrotron Radiation Beamlines," *SPIE Optical Science, Engineering and Instrumentation*, LBNL-40659, UC-410, pp. 2-6, 1997.
- [8] A. Suthumapiwat, A. Oonsivilai, P. songsiririthigul, P. Pao-La-Ord, B. Marungsri and M. Sophon, "Desing Study of Mirror Bender for a Synchrotron Light Beamline," *Proc. Int Conf. on Science Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB)*, Thailand, July 2009, pp. 390-394.

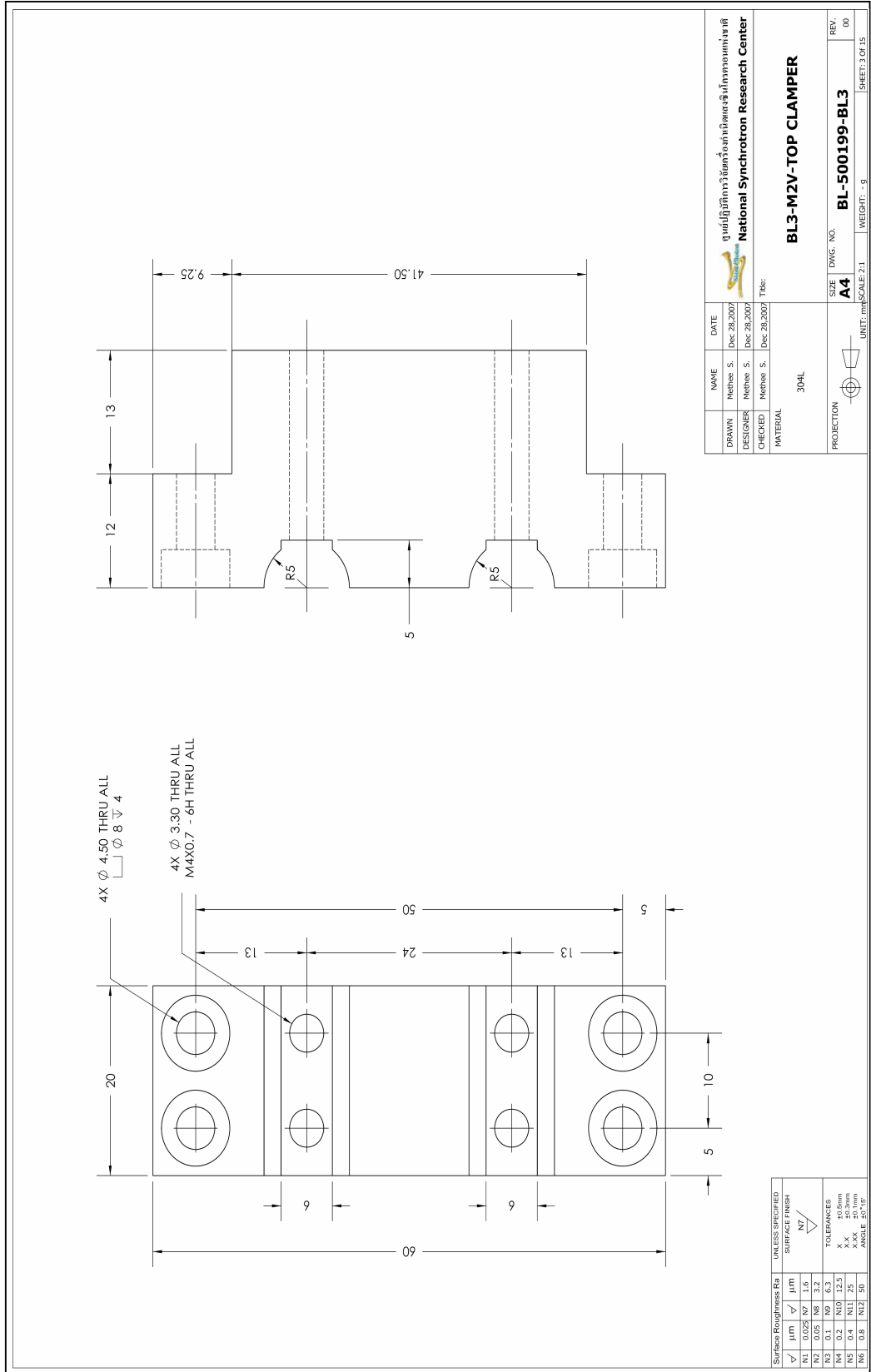


**ภาคผนวก ข**

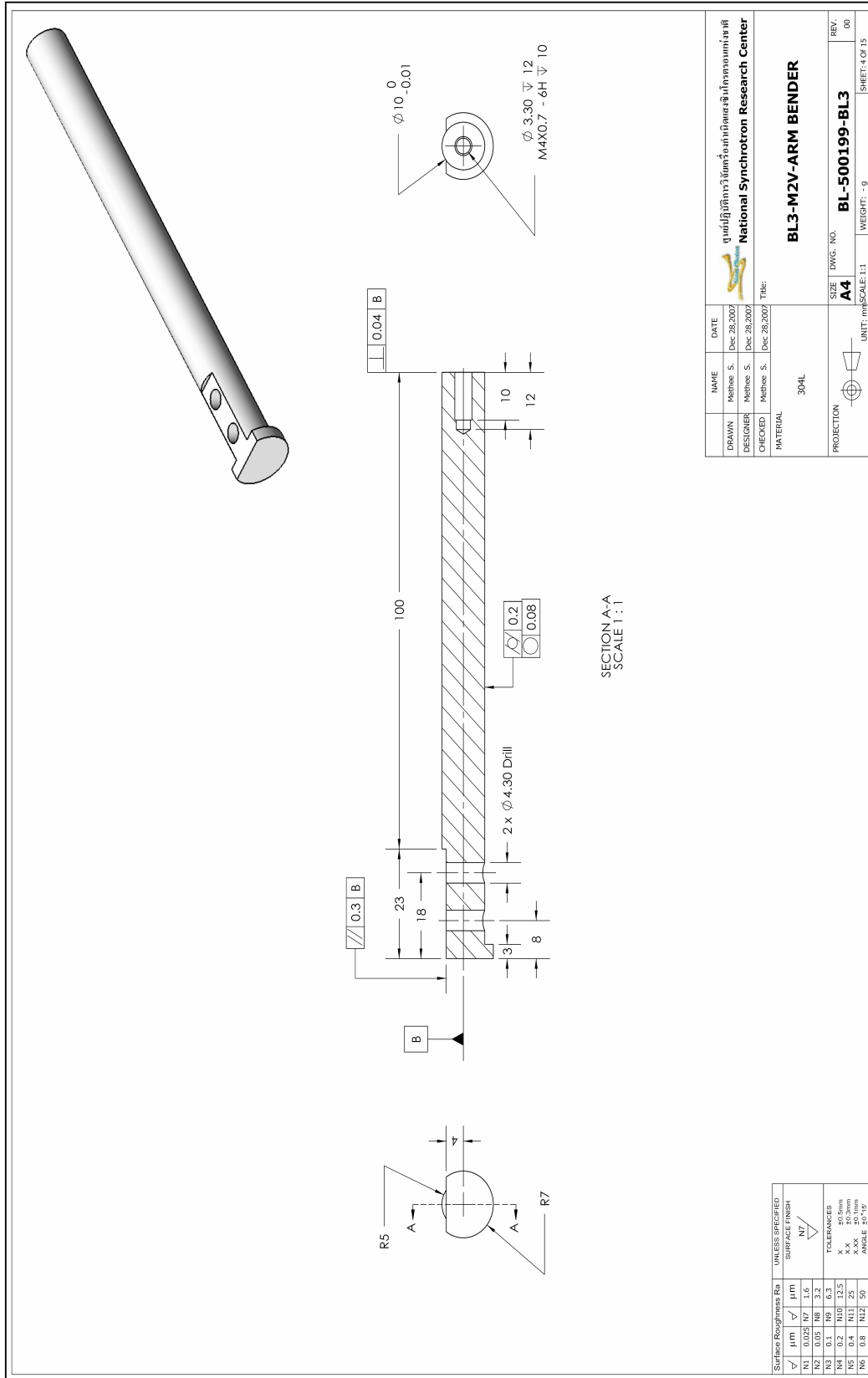
**แบบทางวิศวกรรม ชุดปรับความโค้งกระจกต้นแบบ**









ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคและซินโครตรอนแห่งชาติ  
 National Synchrotron Research Center  
 BL3-M2V-TOP CLAMPER



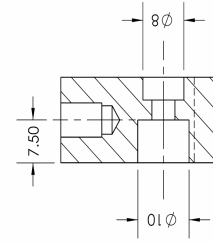
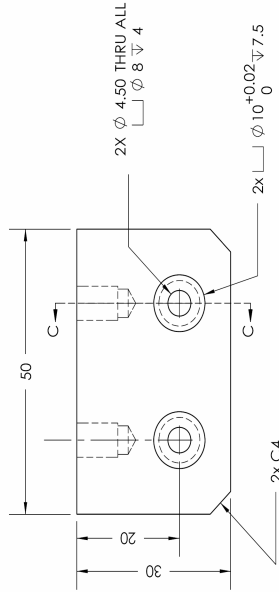
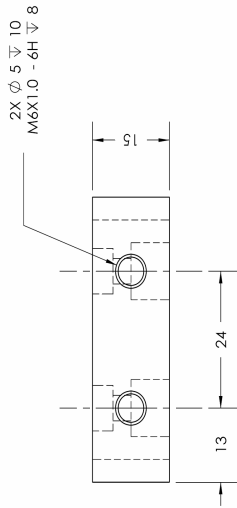
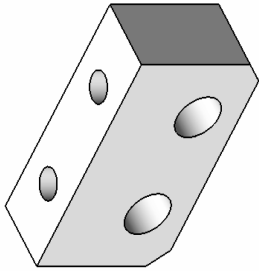
NAME	DATE	 ชาติพันธุ์พันธุศาสตร์และพันธุวิศวกรรมแห่งชาติ <b>National Synchrotron Research Center</b>	
DRAWN	Mehtee S.	Dec.28.2007	
DESIGNER	Mehtee S.	Dec.28.2007	
CHECKED	Mehtee S.	Dec.28.2007	
MATERIAL	304L		
PRODUCTION	SIZE	DWG. NO.	REV.
	<b>A4</b>	<b>BL-500199-BL3</b>	00
	UNIT: mm	SCALE: 1:1	WEIGHT: - g
			SHEET: 4 OF 15

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	SURFACE FINISH
▽ 1.0	▽ 1.0	N7
N1	0.05	N7
N2	0.05	N6
N3	0.1	N6
N4	0.2	N10
N5	0.4	N11
N6	0.8	N12

X ±0.5mm  
 X.X ±0.1mm  
 X.XX ±0.05mm  
 ANGLE 10°-15°

SECTION A-A  
SCALE 1:1





SECTION C-C  
SCALE 1:1

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED SURFACE FINISH
✓	μm
N1	0.025
N2	0.05
N3	0.1
N4	0.2
N5	0.4
N6	0.8

Surface Finish	UNLESS SPECIFIED SURFACE FINISH
✓	N7
N1	0.025
N2	0.05
N3	0.1
N4	0.2
N5	0.4
N6	0.8

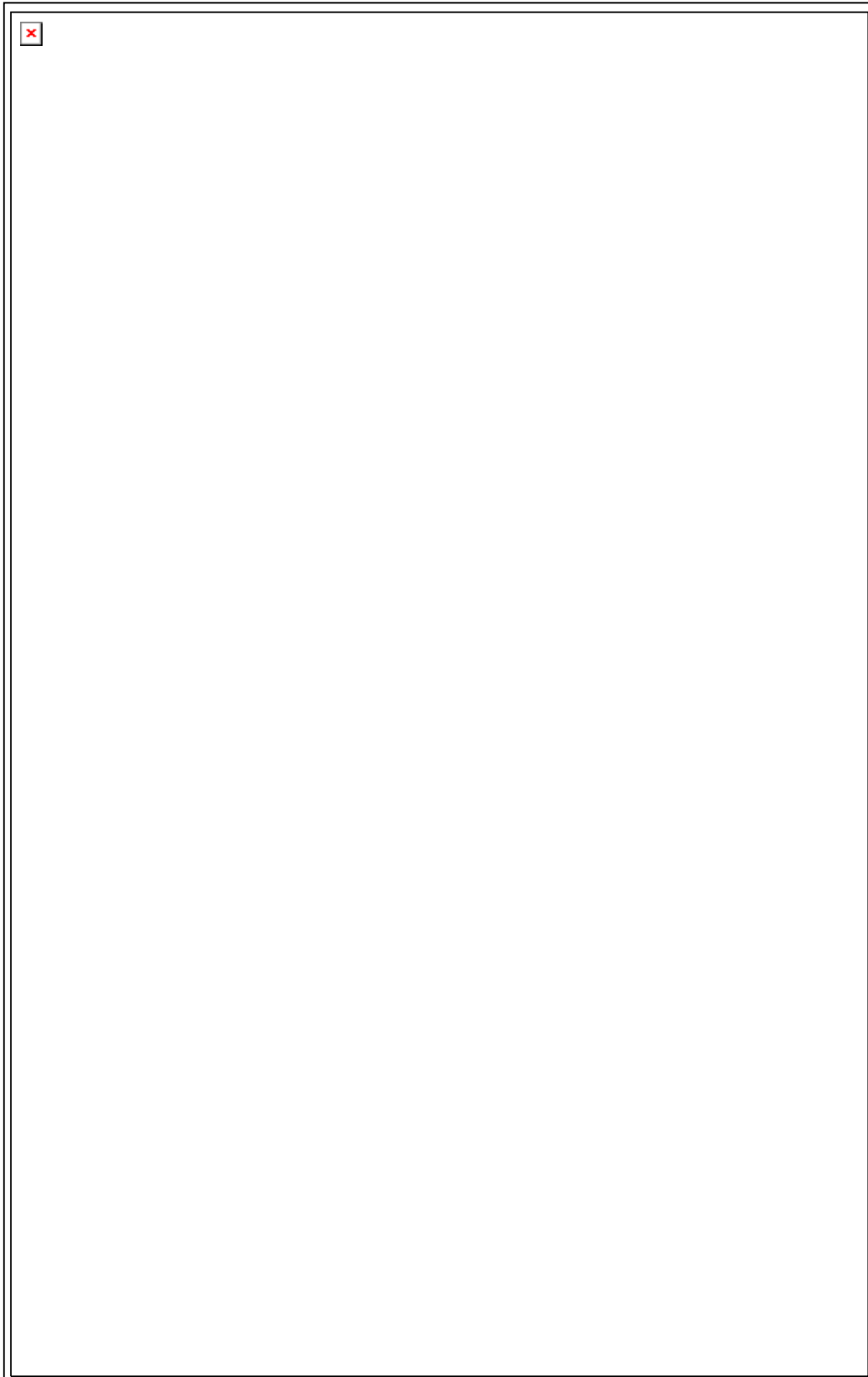
TOLERANCES	UNLESS SPECIFIED
X	±0.5mm
X	±0.3mm
X	±0.2mm
X	±0.1mm
X	±0.05mm
X	±0.02mm
X	±0.01mm
X	±0.005mm
X	±0.002mm
X	±0.001mm
X	±0.0005mm
X	±0.0002mm
X	±0.0001mm

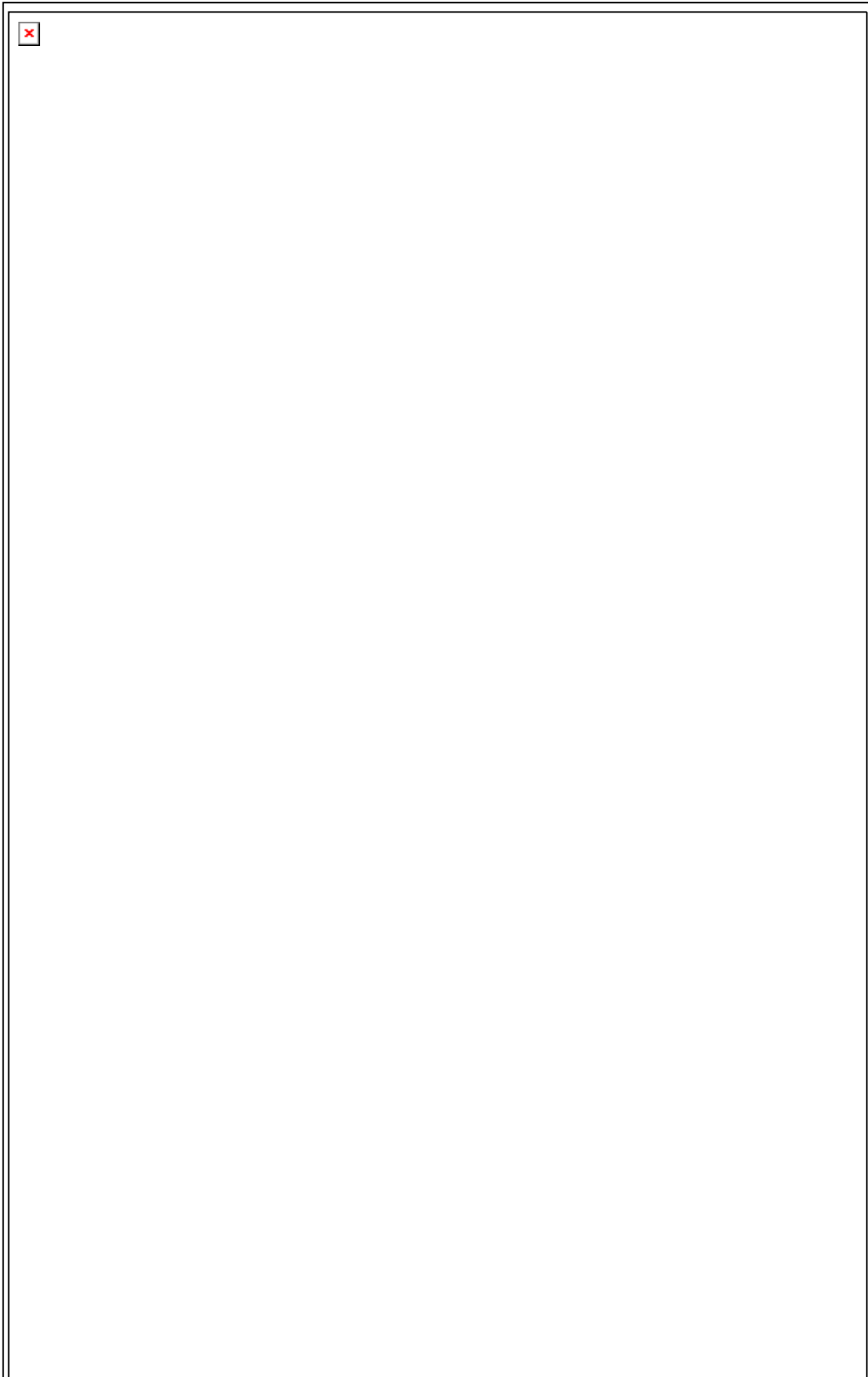
ANGLE	UNLESS SPECIFIED
X	20°
X	30°
X	45°
X	60°
X	75°
X	90°
X	105°
X	120°
X	135°
X	150°
X	165°
X	180°

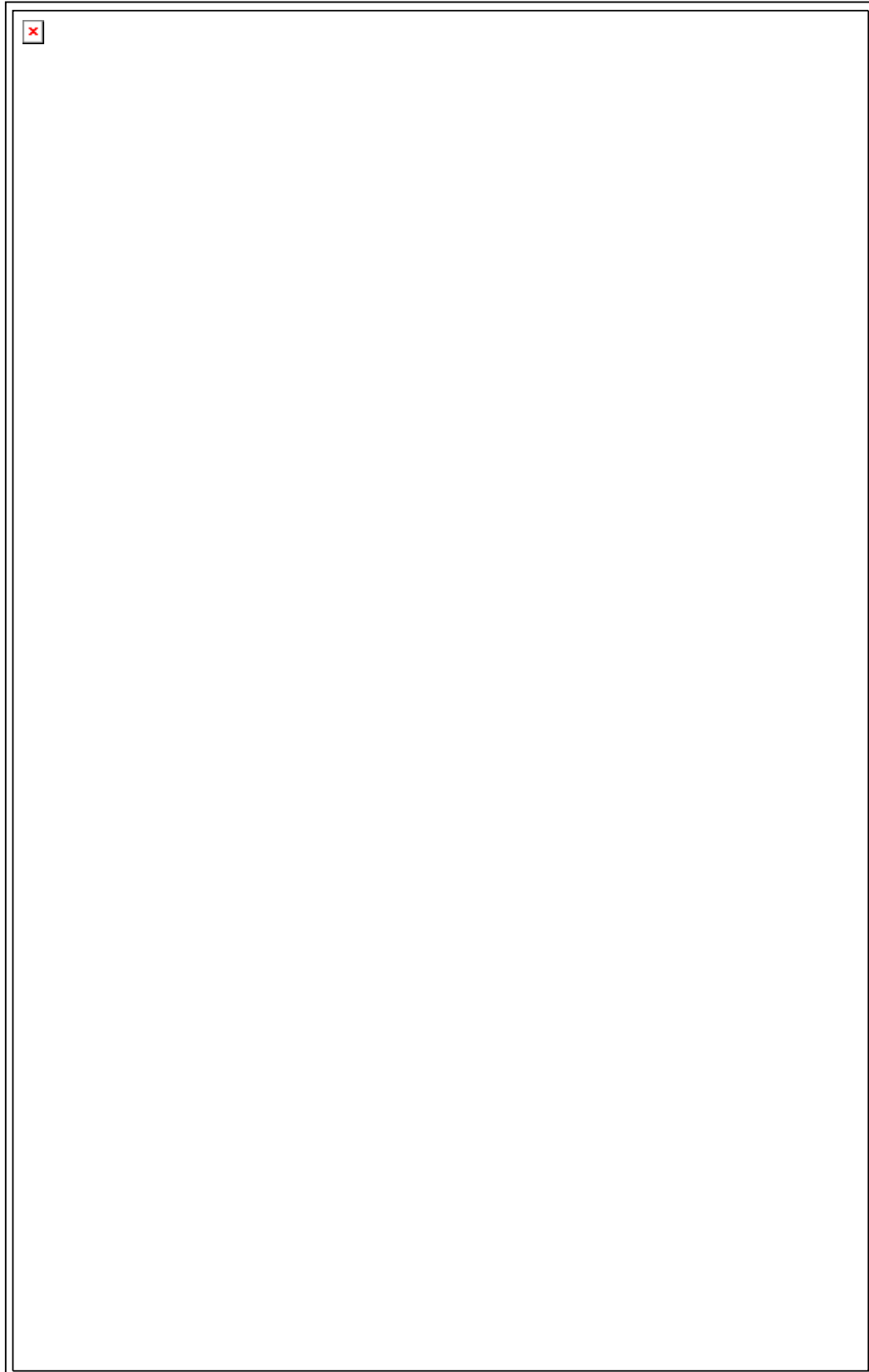
NAME	DATE	SIZE	DWG. NO.	REV.
DRAWN	Meinhe S.	Dec 28, 2007	BL-500199-BL3	00
DESIGNER	Meinhe S.	Dec 28, 2007		
CHECKED	Meinhe S.	Dec 28, 2007	WEIGHT: - 9	SHEET: 5 OF 15
MATERIAL	304L			
PROJECTION				

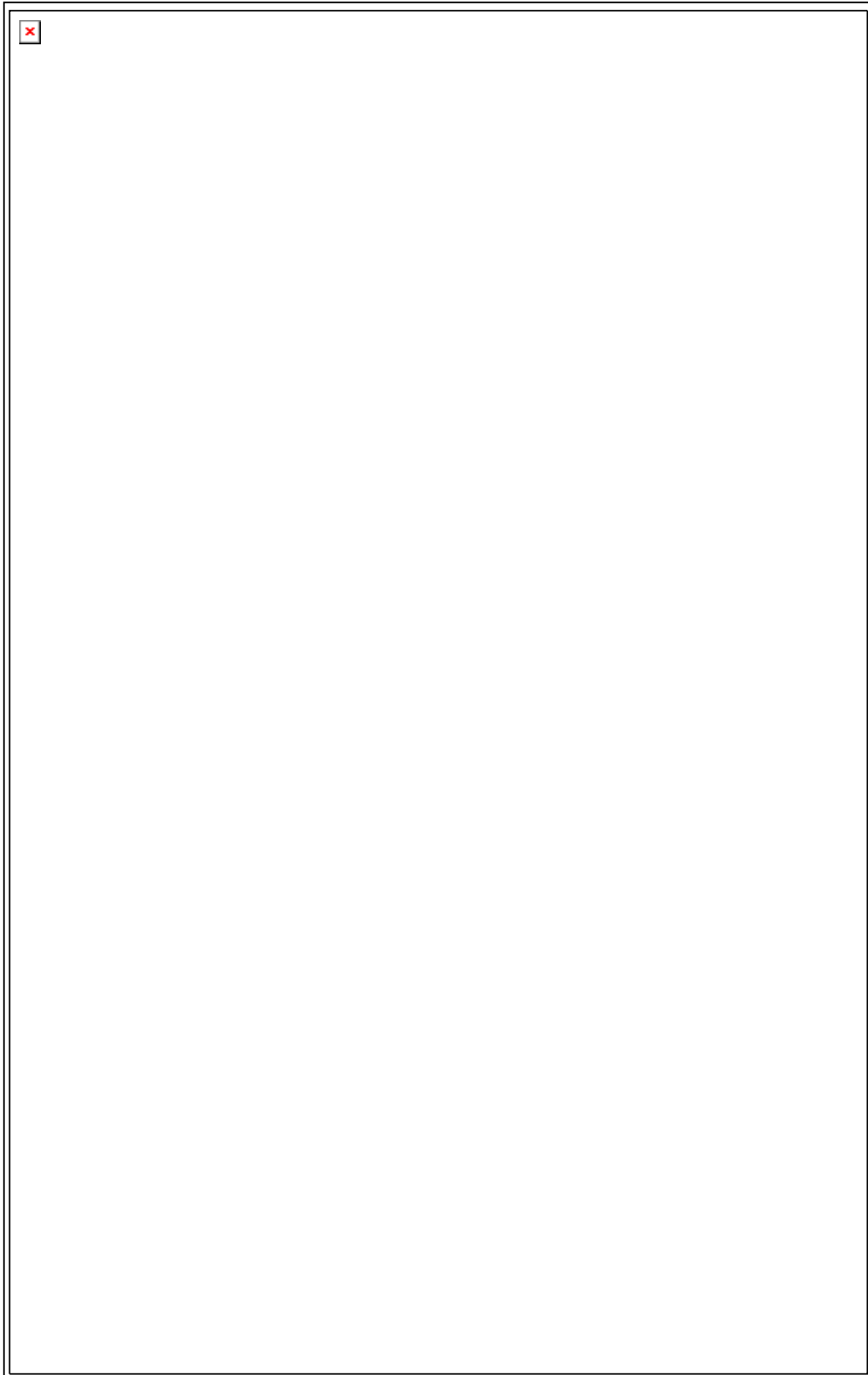
ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยและเครื่องมือวัดด้วยซินโครตรอนแห่งชาติ  
National Synchrotron Research Center

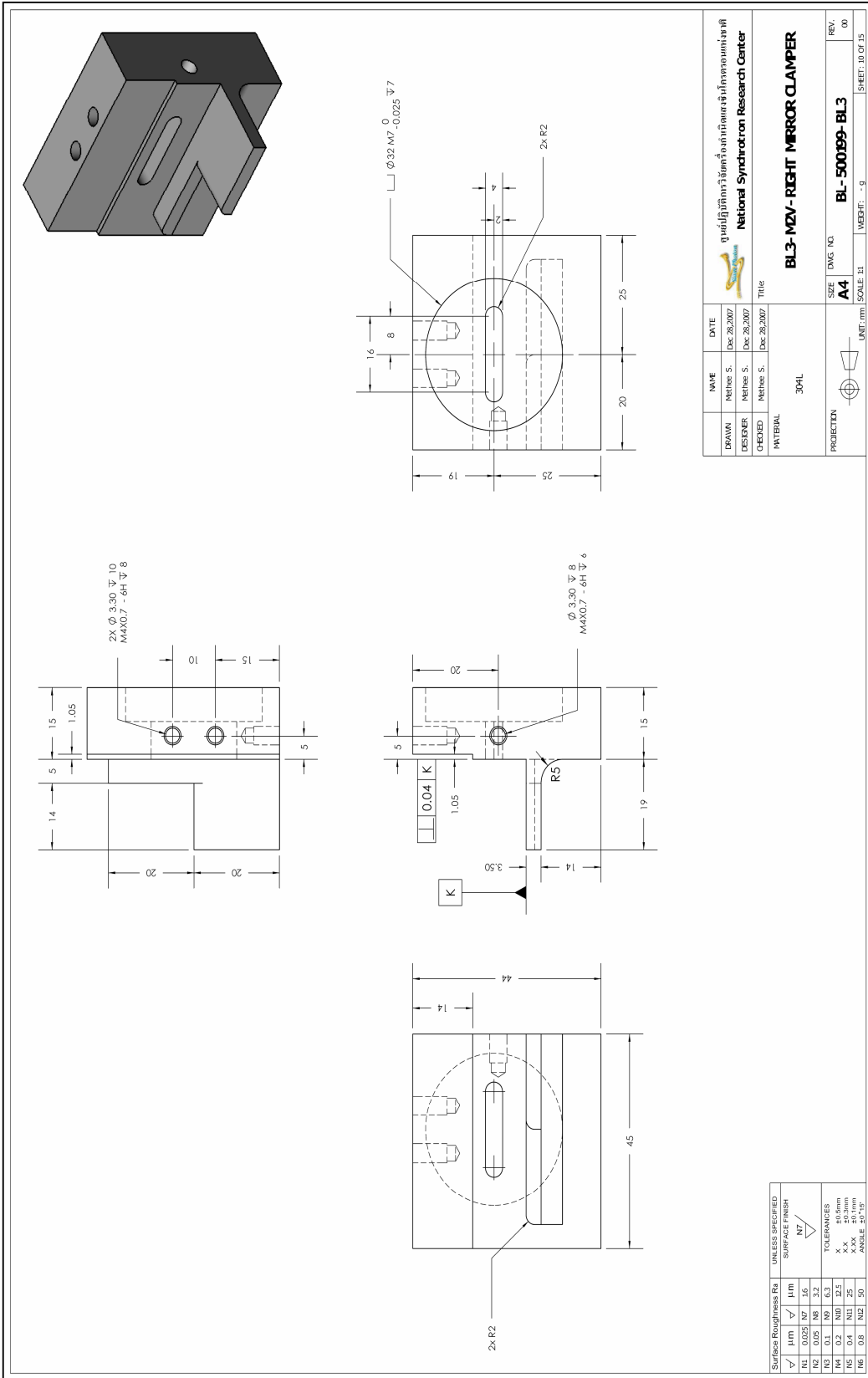
BL3-M2V-ARM COMBINER









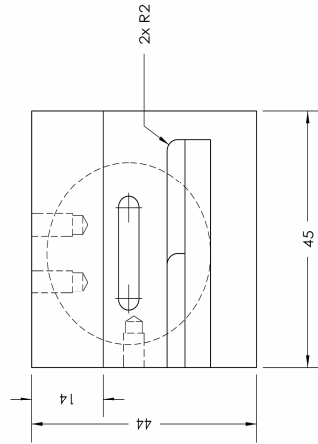
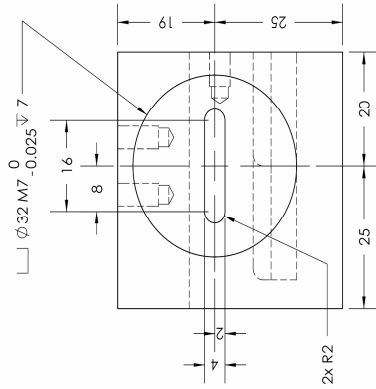
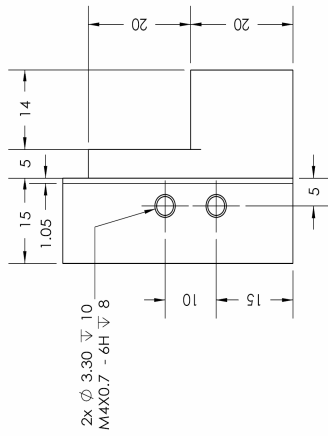
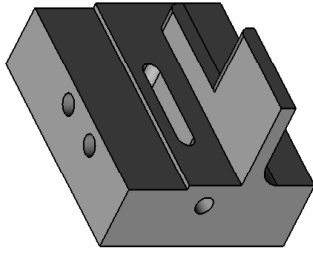


NAME	DATE	 ชาติพันธุ์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ National Synchrotron Research Center
DRAWN	DATE	
DESIGNED	DATE	
CHECKED	DATE	
MATERIAL		TITLE
304L		<b>BL3-M2V- RIGHT MIRROR CLAMPER</b>
PROJECTION	UNIT: mm	SCALE: 1:1
REV. 00	SIZE A4	DWG. NO. BL-500199-BL3
	WEIGHT: -- g	SHEET: 10 OF 15

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	SURFACE FINISH
✓	μm	N7
N1	0.025	N7
N2	0.05	N7
N3	0.1	N7
N4	0.2	N7
N5	0.4	N7
N6	0.8	N7

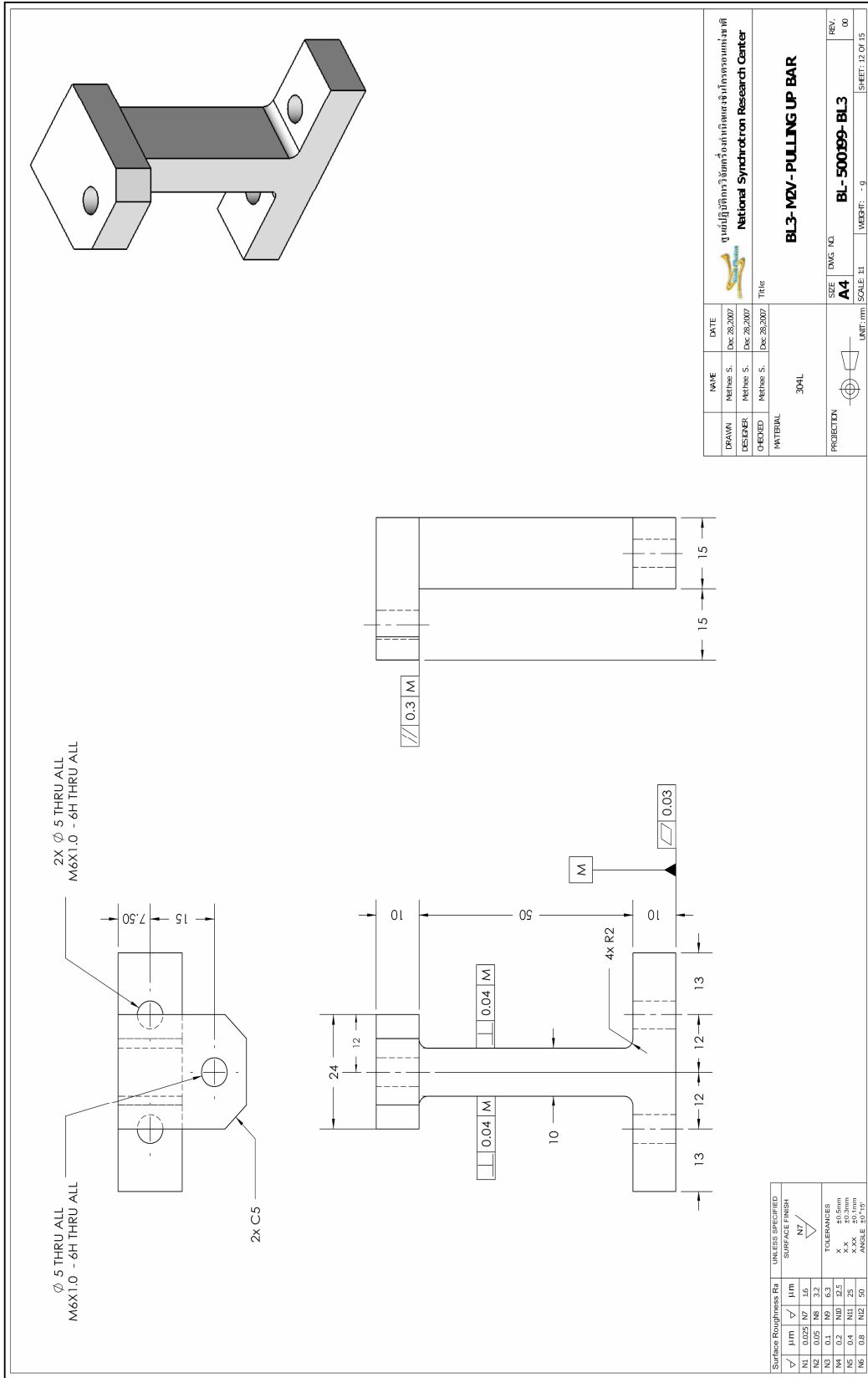
TOLERANCES
X 50.5mm
X X 20.5mm
X X 10.5mm
ANGLE 30°/5°



Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	SURFACE FINISH
$\checkmark$   $\mu\text{m}$   $\checkmark$   $\mu\text{m}$		M7
N1   0.025	N7   1.6	
N2   0.05	N8   3.2	
N3   0.1	N9   6.3	
N4   0.2	N10   12.5	
N5   0.4	N11   25	
N6   0.8	N12   50	

TOLERANCES  
X.X. = 0.5mm  
X.X.X. = 0.1mm  
ANGLE: 30°/15°

	หน่วยงานที่รับผิดชอบการดำเนินงาน <b>National Synchrotron Research Center</b>
DRAWN: REFINE S.   DATE: Dec. 28, 2007 DESIGNED: REFINE S.   DATE: Dec. 28, 2007 CHECKED: REFINE S.   DATE: Dec. 28, 2007	Title: <b>BL3-M2V- LEFT MIRROR CLAMPER</b>
MATERIAL: 304L	SIZE: DWG. NO. <b>BL-500109-BL3</b>
PROJECTION:	REV. 00
UNIT: mm SCALE: 1:1	WEIGHT: - g SHEET: 11 OF 15

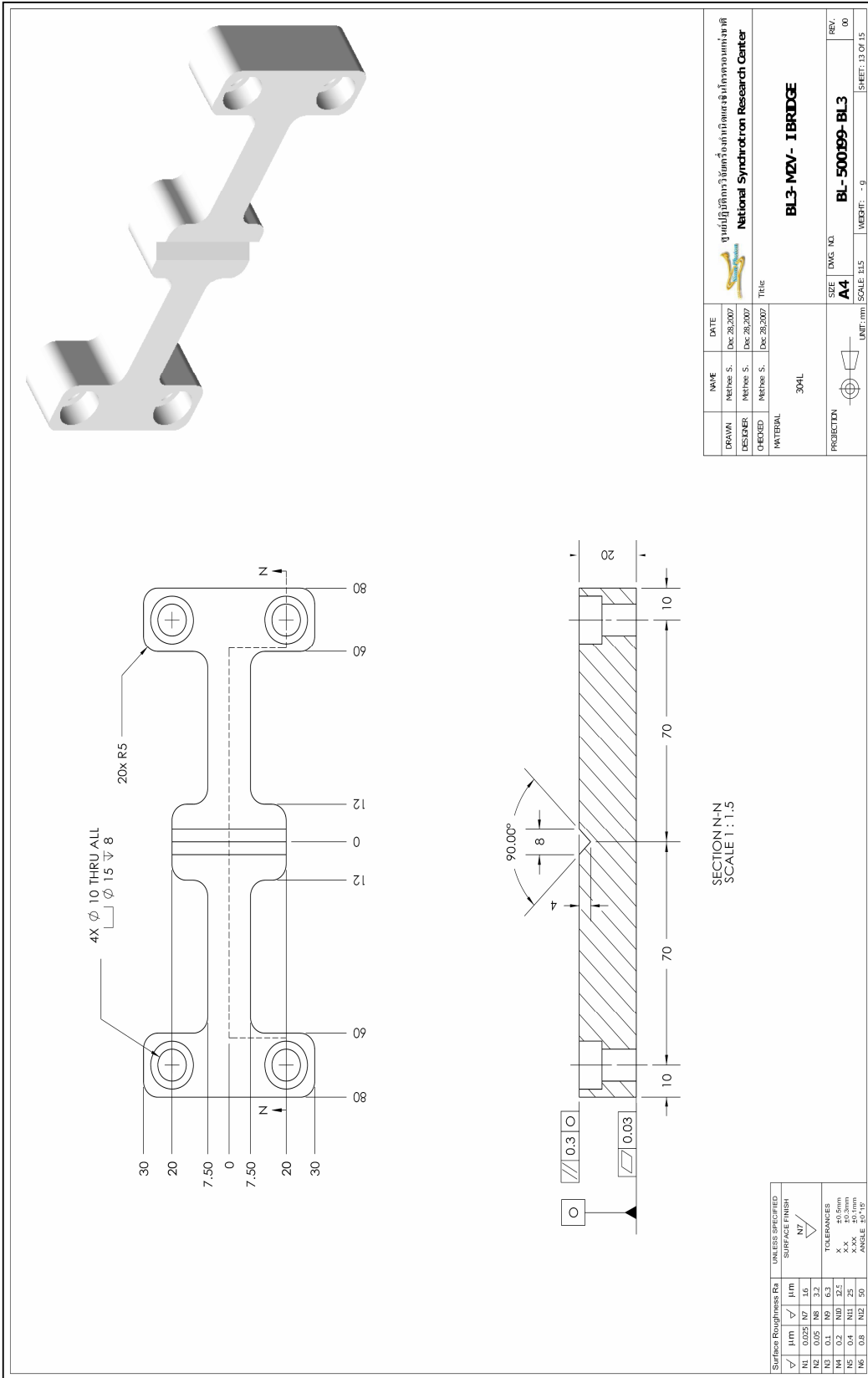




NAME	DATE	 ชาติพันธุ์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ National Synchrotron Research Center
DRAWN	DATE	
DESIGNED	DATE	
CHECKED	DATE	
MATERIAL		304L PROJECTION 
SIZE	DWG. NO.	REV.
A4	BL-500199-BL3	00
UNIT:mm	SCALE: 1:1	WEIGHT: - g
		SHEET: 12 OF 15

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	SURFACE FINISH
✓ 1.6	✓ 1.6	M7
N1 0.025	N7 1.6	
N2 0.05	N6 3.2	
N3 0.1	N5 6.3	
N4 0.2	N4 12.5	
N5 0.4	N3 25	
N6 0.8	N2 50	

TOLERANCES  
 X 50.0mm  
 X X 20.0mm  
 ANGLE 30°/75°

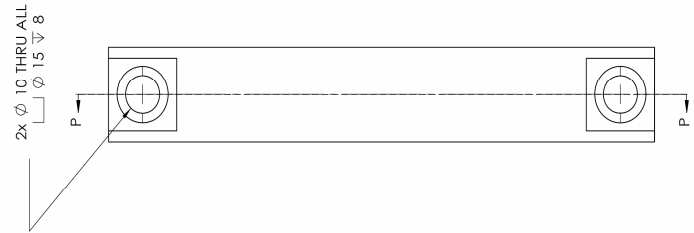
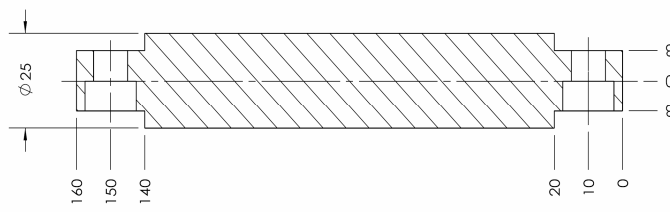






NAME	DATE	 ชาติพันธุ์วิศวกรรมเครื่องกลและเทคโนโลยีสารสนเทศ National Synchrotron Research Center	
DRAWN	DATE	SIZE	DWG. NO.
DESIGNED	DATE	A4	BL-500199-BL3
CHECKED	DATE	UNIT: mm	SCALE: 1:1
MATERIAL	TITLE	BL3-MDV-IBRIDGE	
304L		PROJECTION	REV. 00
			SHEET: 13 OF 15
		WEIGHT: - g	

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	SURFACE FINISH
✓	μm	N7
N1	0.025	N7
N2	0.05	N7
N3	0.1	N7
N4	0.2	N7
N5	0.4	N7
N6	0.8	N7

TOLERANCES  
 X 50.5mm  
 X X 25.0mm  
 ANGLE 30°/15°

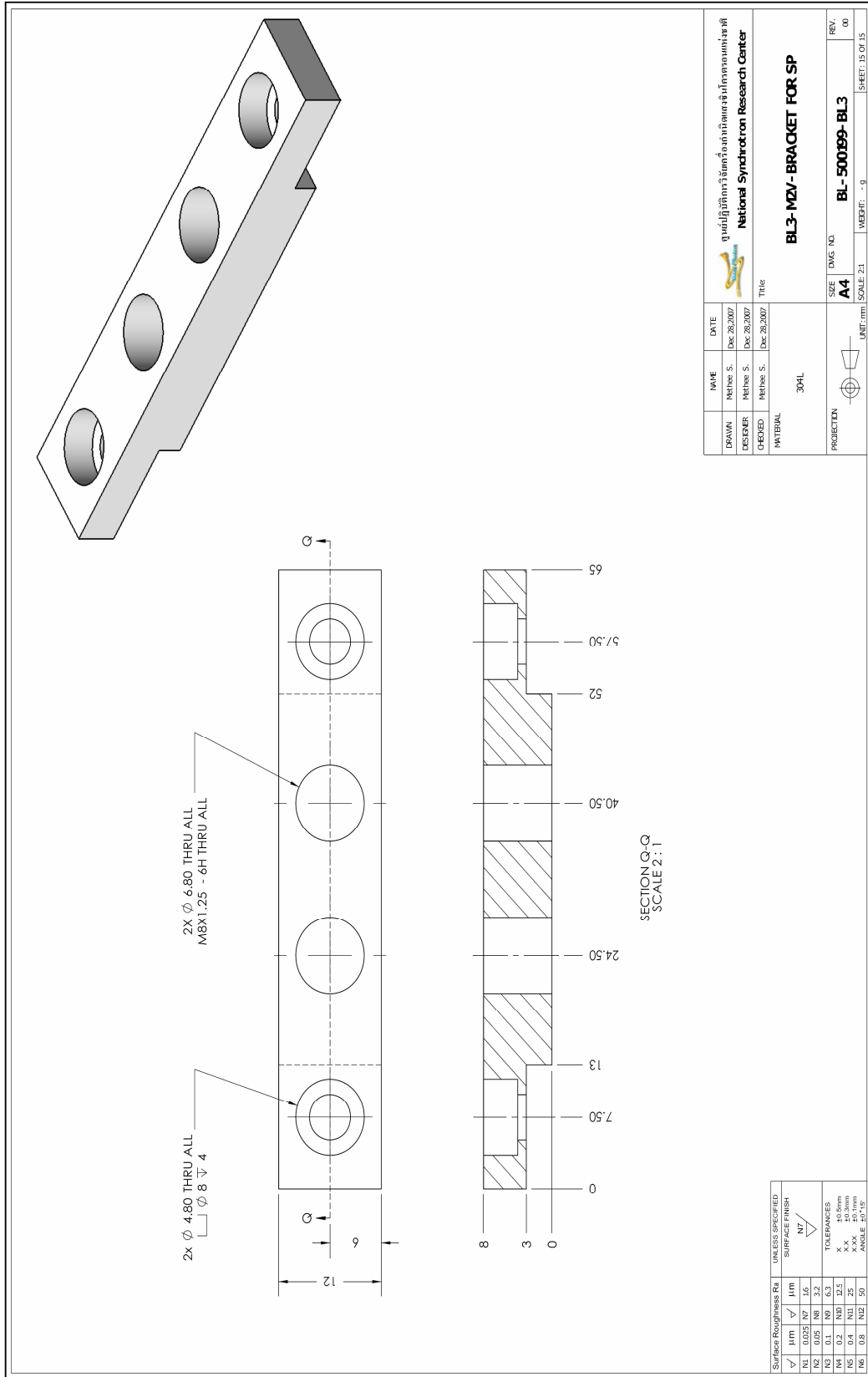


SECTION P-P  
SCALE 1 : 1.5

NAME	DATE	 ชาติพันธุ์พันธุศาสตร์ National Synchrotron Research Center
DRAWN	DATE	
DESIGNER	DATE	
CHECKED	DATE	
MATERIAL	304L	
PROJECTION		SIZE A4
		DWG. NO. BL-500199-BL3
		UNIT: (mm) SCALE: 1:1.5 WEIGHT: -- g
		SHEET: 14 OF 15 REV. 00

Surface Roughness Ra	UNLESS SPECIFIED	
	SURFACE FINISH	
$\nabla$ 1.6	$\nabla$ 1.6	N7
N1	0.025	N7
N2	0.05	N6
N3	0.1	N5
N4	0.2	N4
N5	0.4	N3
N6	0.8	N2
		N1
		0

TOLERANCES  
 X  $\pm 0.5\text{mm}$   
 M  $\pm 0.3\text{mm}$   
 F  $\pm 0.2\text{mm}$   
 X.XX  
 ANGLE  $30^{\circ}15'$



	ชื่อผลิตภัณฑ์: ชุดเครื่องมือสำหรับติดตั้งและปรับโครงสร้างแม่เหล็ก National Synchrotron Research Center
NAME: REFINE S. DATE: Dec. 28, 2007	TITLE: BL3-MZV-BRACKET FOR SP
DRAWN: REFINE S. DATE: Dec. 28, 2007	SIZE: DWG. NO. BL-500-099-BL3
DESIGNED: REFINE S. DATE: Dec. 28, 2007	UNIT: mm SCALE: 2:1 WEIGHT: -- g
CHECKED: REFINE S. DATE: Dec. 28, 2007	REV. 00
MATERIAL: 304L	SHEET: 15 OF 15
PROJECTION:	



**ภาคผนวก ค**

**ผลการทดลอง และโปรแกรมเมทแลป**

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาว  
วัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061))

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	ก่อนติดตั้ง เซนเซอร์	หลังติดตั้ง เซนเซอร์	F= 10N	F= 50N	F= 100N
-8	0.013	-0.001	-0.020	-0.018	-0.007
-7.5	0.023	-0.005	-0.014	-0.019	-0.01
-7	0.038	-0.009	-0.022	-0.039	-0.018
-6.5	0.051	-0.016	-0.029	-0.041	-0.028
-6	0.070	-0.006	-0.037	-0.057	-0.041
-5.5	0.087	-0.008	-0.019	-0.063	-0.047
-5	0.099	-0.008	-0.032	-0.069	-0.054
-4.5	0.104	-0.007	-0.033	-0.073	-0.056
-4	0.107	-0.006	-0.026	-0.062	-0.06
-3.5	0.108	-0.006	-0.024	-0.063	-0.06
-3	0.110	-0.008	-0.021	-0.069	-0.064
-2.5	0.111	-0.006	-0.009	-0.069	-0.067
-2	0.111	-0.006	-0.020	-0.068	-0.066
-1.5	0.114	-0.003	-0.026	-0.070	-0.066
-1	0.122	-0.007	-0.021	-0.073	-0.068
-0.5	0.132	-0.004	-0.022	-0.070	-0.068
0	0.149	-0.007	-0.028	-0.074	-0.070
0.5	0.156	-0.003	-0.013	-0.062	-0.059
1	0.176	-0.013	-0.026	-0.066	-0.058
1.5	0.195	-0.002	-0.038	-0.065	-0.055
2	0.209	-0.002	-0.039	-0.067	-0.059
2.5	0.213	-0.009	-0.030	-0.073	-0.053
3	0.220	-0.009	-0.027	-0.071	-0.053
3.5	0.225	-0.009	-0.023	-0.069	-0.053
4	0.227	-0.005	-0.016	-0.059	-0.044

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาววัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061)) (ต่อ)

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	ก่อนติดตั้ง เซนเซอร์	หลังติดตั้ง เซนเซอร์	F= 10N	F= 50N	F= 100N
4.5	0.230	-0.001	-0.015	-0.062	-0.038
5	0.231	-0.003	-0.013	-0.051	-0.039
5.5	0.231	0.000	-0.014	-0.061	-0.037
6	0.233	-0.002	-0.005	-0.052	-0.038
6.5	0.232	-0.001	-0.005	-0.056	-0.033
7	0.234	-0.002	-0.005	-0.049	-0.027
7.5	0.235	-0.002	-0.004	-0.046	-0.020
8	0.233	0.003	-0.001	-0.035	-0.014

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาววัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061))

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	F= 150N	F= 200N	F= 250N	F= 300N	F= 350N
-8	-0.009	-0.012	-0.022	-0.012	-0.01
-7.5	-0.017	-0.022	-0.036	-0.026	-0.021
-7	-0.026	-0.032	-0.051	-0.044	-0.053
-6.5	-0.032	-0.048	-0.060	-0.060	-0.065
-6	-0.046	-0.062	-0.089	-0.075	-0.096
-5.5	-0.054	-0.074	-0.099	-0.093	-0.114
-5	-0.068	-0.085	-0.103	-0.100	-0.125
-4.5	-0.067	-0.088	-0.112	-0.113	-0.131
-4	-0.073	-0.095	-0.122	-0.118	-0.142
-3.5	-0.078	-0.097	-0.122	-0.123	-0.148
-3	-0.079	-0.103	-0.136	-0.13	-0.158

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตาม  
ความยาววัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061)) (ต่อ)

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	F= 150N	F= 200N	F= 250N	F= 300N	F= 350N
-2.5	-0.082	-0.104	-0.139	0.138	--0.168
-2	-0.083	-0.109	-0.138	-0.139	-0.170
-1.5	-0.086	-0.106	-0.144	-0.141	-0.170
-1	-0.085	-0.103	-0.149	-0.137	-0.165
-0.5	-0.078	-0.106	-0.138	-0.143	-0.167
0	-0.082	-0.112	-0.136	-0.149	-0.168
0.5	-0.078	-0.104	-0.131	-0.142	-0.167
1	-0.087	-0.105	-0.143	-0.147	-0.174
1.5	-0.089	-0.110	-0.147	-0.145	-0.183
2	-0.087	-0.106	-0.158	-0.141	-0.182
2.5	-0.078	-0.100	-0.139	-0.123	-0.165
3	-0.074	-0.099	-0.139	-0.121	-0.159
3.5	-0.069	-0.099	-0.13	-0.118	-0.148
4	-0.053	-0.086	-0.119	-0.108	-0.145
4.5	-0.045	-0.080	-0.113	-0.101	-0.132
5	-0.040	-0.074	-0.092	-0.094	-0.123
5.5	-0.040	-0.072	-0.086	-0.081	-0.111
6	-0.043	-0.065	-0.077	-0.072	-0.095
6.5	-0.033	-0.057	-0.077	-0.06	-0.083
7	-0.036	-0.046	-0.069	-0.049	-0.065
7.5	-0.027	-0.031	-0.058	-0.030	-0.061
8	-0.018	-0.017	-0.043	-0.011	-0.035

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตามความยาว  
วัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061))

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	F= 400N	F= 450N	F= 500N	F = 550N	F= 600N
-8	-0.041	0.034	-0.020	-0.037	--0.033
-7.5	-0.055	-0.057	-0.033	-0.065	-0.057
-7	-0.085	-0.083	-0.078	-0.103	-0.090
-6.5	-0.105	-0.098	-0.103	-0.132	-0.115
-6	-0.129	-0.125	-0.119	-0.157	-0.154
-5.5	-0.135	-0.144	-0.133	-0.180	-0.169
-5	-0.154	-0.156	-0.166	-0.202	-0.197
-4.5	-0.161	-0.171	-0.193	-0.219	-0.229
-4	-0.170	-0.186	-0.200	-0.230	-0.236
-3.5	-0.182	-0.191	-0.212	-0.243	-0.259
-3	-0.193	-0.201	-0.226	-0.255	-0.263
-2.5	-0.196	-0.208	-0.232	-0.271	-0.281
-2	-0.202	-0.213	-0.232	-0.274	-0.279
-1.5	-0.204	-0.217	-0.242	-0.285	-0.289
-1	-0.206	-0.217	-0.244	-0.288	-0.298
-0.5	-0.201	-0.213	-0.242	-0.276	-0.293
0	-0.208	-0.219	-0.247	-0.277	-0.305
0.5	-0.202	-0.213	-0.242	-0.272	-0.301
1	-0.201	-0.218	-0.242	-0.281	-0.306
1.5	-0.208	-0.225	-0.240	-0.291	-0.309
2	-0.207	-0.222	-0.235	-0.29	-0.298
2.5	-0.197	-0.209	-0.225	-0.273	-0.290
3	-0.193	-0.199	-0.221	-0.265	-0.283
3.5	-0.184	-0.191	-0.214	-0.247	-0.266
4	-0.173	-0.176	-0.193	-0.227	-0.255
4.5	-0.164	-0.169	-0.198	-0.216	-0.248



ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรง และระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป ณ จุดต่าง ๆ ตาม  
ความยาววัสดุทดสอบ (Al Alloy (6061)) (ต่อ)

ระยะตาม แนวแกน x	ระยะแอนตัวที่เปลี่ยนแปลงไป				
	F= 400N	F= 450N	F= 500N	F = 550N	F= 600N
5	-0.152	-0.160	-0.181	-0.202	-0.222
5.5	-0.121	-0.146	-0.159	-0.196	-0.196
6	-0.114	-0.133	-0.14	-0.173	-0.184
6.5	-0.100	-0.12	-0.119	-0.14	-0.155
7	-0.079	-0.100	-0.106	-0.138	-0.141
7.5	-0.070	-0.086	-0.094	-0.120	-0.127
8	-0.049	-0.051	-0.058	-0.093	-0.108

ตารางที่ 4 โปรแกรมเมทแลป (Matlab)

```
function [xc,yc,R,a] = circfit(x,y)
%
% [xc yx R] = circfit(x,y)
%
% fits a circle in x,y plane in a more accurate
% (less prone to ill condition )
% procedure than circfit2 but using more memory
% x,y are column vector where (x(i),y(i)) is a measured point
%
% result is center point (yc,xc) and radius R
% an optional output is the vector of coefficient a
% describing the circle's equation
%
%  $x^2+y^2+a(1)*x+a(2)*y+a(3) = 0$ 
%
x = x(:); y = y(:);
a = [x y ones(size(x))]/[-(x.^2+y.^2)];
```

ตารางที่ 4 โปรแกรมแมทแลป (Matlab) (ต่อ)

```

xc = -.5*a(1);
yc = -.5*a(2);
R = sqrt((a(1)^2+a(2)^2)/4-a(3));

-----

% try_circ_fit
% Create data for a circle
th = linspace(0,2*pi,100000);
% R=1.1111111;
% sigma = R/10;
% x = R*cos(th)+randn(size(th))*sigma;
% y = R*sin(th)+randn(size(th))*sigma;
y = xlsread('Uxy.xls','A15:A60');
x = xlsread('Uxy.xls','B15:B60');

plot(x,y,'x'), title(' measured points')
pause(2)

% reconstruct circle from data
[xc,yc,Re,a] = circfit(x,y);
xe = Re*cos(th)+xc; ye = Re*sin(th)+yc;

% plot(x,y,'o',[xe;xe(1)],[ye;ye(1)],'-',R*cos(th),R*sin(th)),
plot(x,y,'o',[xe;xe(1)],[ye;ye(1)],'-',xc,yc,'x'),
title(' measured and fitted data')
legend('measured','fitted','center')
text(xc-20000,yc-5000,sprintf('center (%g , %g ); R = %g',xc,yc,Re))
xlabel x, ylabel y
axis equal

```

# Investigation on Adjustable Mirror bender Using Light beam Size

A. Oonsivilai, A. Suthummapiwat, and P.Songsiritthigul

**Abstract**—In this research, the use of light beam size to design the adjustable mirror bender is presented. The focused beam line characterized by its size towards the synchrotron light beam line is investigated. The COSMOSWorks is used in all simulation components of curvature adjustment system to analyze in finite element method. The results based on simulation covers the use of applied forces during adjustment of the mirror radius are presented.

**Keywords**—light beam-line, mirror bender, synchrotron light machine.

## I. INTRODUCTION

THE new developments and advances in science and technology have been experienced in the few past decades. The applications of these new inventions are found in many systems. One of these applications is the synchrotron light machine.

The Synchrotron light is the electromagnetic radiation emitted when electrons, moving at velocities close to the speed of light, are forced to change direction under the action of a magnetic field. The synchrotron light is unique in its intensity and brilliance and it can be generated across the range of the electromagnetic spectrum: from infrared to x-rays. Applications of synchrotron light are used in many aspects such as physical science, biological physics and so forth. The synchrotron light machine is composed of many important parts including the beam line system. This system comprises many parts such as vacuum tube, vacuum chamber and especially, optical equipments. The optical equipments are mirror grating and crystal etc. functioning to select wavelength, size and focusing of beam light that point at study sample. One of the important techniques in synchrotron applications is X-PEEM (X-ray Photoemission Electron Microscopy) applying in nano-structure spectroscopy and

even in taking photo in micro-nano scale. The principle of X-PEEM is to use suitable soft X-rays or vacuum ultraviolet range to excite electron in atom of sample emitted from sample for studying its photoelectron. Photoelectron energy depends on energy levels of atom, type of atom and wavelength of exciting x-rays. Photoelectrons having diameters about 2-100 microns are emitted collected and amplified by equipments that similar to use in SEM (scanning electron microscopy). Amplified electron is brought to image on screen as shown in figure 1 that able to measure in chemical analysis of minute area (<100 nanometer) . Intensity or contrast of picture that images on screen is the characteristics of surface, type of atom, work function of material and/or characteristic of magnetic domain.

New beam-line system has been constructing in Siam Photon lab at SLRI (Synchrotron Light Research Institute). It will use synchrotron light produced from an undulator machine to apply for X-PEEM technique and PES (Photoemission spectroscopy) [1]. Optical equipments of the beamline shown in figure 2 consist of a mirror TO to focus synchrotron light into S1 of monochromator. Part of the monochromator is to start at inlet S1 to outlet S2. Behind monochromator, light is able to use either X-PEEM or PES technique by moving in and out of M2C<sub>y</sub> mirror. This work points at focusing system of X-PEEM technique for focusing synchrotron light on sample in microscale and keeping most part of light is in right position of X-PEEM microscope for high performance.

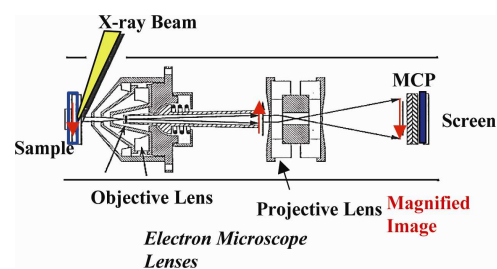


Fig. 1 Diagram of PEEM at BL7.3.2 of Advanced Light.

Focusing system behind monochromator is composed of M2V and M2H mirrors that have cylinder surface to focus light in vertical and horizontal, respectively. M2H has constant radius on surface so that size of beam on sample is about 150 microns. On the other hand, M2V is able to adjust curvature radius value for selecting the beam size in vertical. Required curvature radius is in between 50,000mm to 60,000mm.

A. Oonsivilai is with Smart Materials and Intelligent System and Alternative and Sustainable Energy Research Unit, School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (corresponding author to provide phone: +66 (0)815-48-7728; fax: +66(0) 44-21-7047; e-mail: anant@ sut.ac.th).

A. Suthummapiwat is with School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 ( e-mail: Apirak\_sut@ slri.or.th).

P. Songsiritthigul is with Synchrotron Light Research Institute (Public Organization). 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000 (e-mail: Prayoon@ slri.or.th).

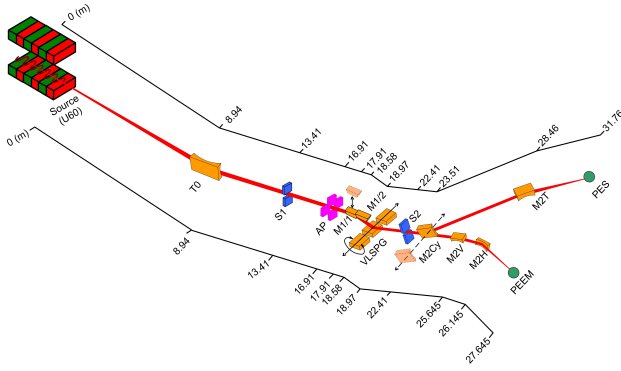


Fig. 2 Diagram of optical alignment of BL3 [1]

Therefore, all parts of light are on FOV (Field of view) of microscope XPEEM (2-150 microns). This technique is relative to beam size hitting to sample and amplified system of microscopy technique. Beam adjustment is significant so that mirror bender system is needed and used to change the focus of beam position on sample as shown in figure 3. Hence, beam adjustment on sample is worked by changing curvature radius of mirror related to FOV of X-PEEM.

The relation between the entrance armlength ( $r$ , or the source distance), the exit armlength ( $r'$ , or the image distance), the angle of incidence ( $\alpha$ ) and the radius of curvature of cylindrical surface ( $R$ ) is given by the Equation 1

$$\frac{\cos^2 \alpha}{r} + \frac{\cos^2 \alpha}{r'} = \frac{2 \cos \alpha}{R} \quad (1)$$

Figure 3 shows that the smallest beam occurs when curvature radius of mirror is forced to focus beam in as same position as sample. Beam size is able to adjust by changing focusing point at before or behind sample. In general, mirror base for beam focusing in UV range is made from Zerodur or Silicon coated metallic thin film that is good in reflection such as gold or nickel. For M2V mirror will be built from Zerodur material which is mixed between glass and ceramic and has nearly zero thermal expansion ( $\pm 0.15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ) at room temperature.

Beam adjustment for minute size is complex and difficult for giving precise moment or accuracy force [2] that this is an important thing and interesting to design and build the mechanical movement in the first time in our country.

## II. DESIGN OF TWO-ARM MIRROR BENDER SYSTEM

To design and develop two-arm mirror bender that SolidWorks program is used to design each part of its structure. When the whole parts are constructed, its system is tested and simulated with relative equation between force and changing curvature radius of mirror. By simulation, the mirror is Al Alloy(6061) compared to Zerodur material. Cosmos program combined with SolidWorks is used for finite element method and simulation of force to act on the system.

from the simulation obtain and analyze for building a real system.

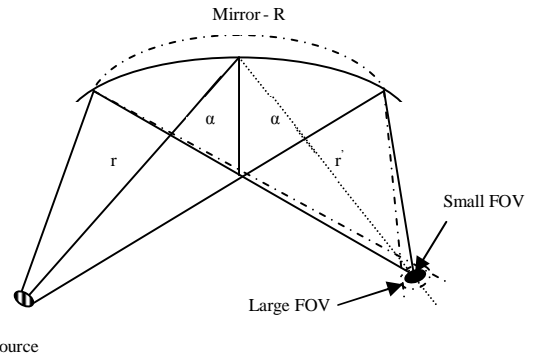


Fig. 3 Beam adjustment on sample by changing curvature radius of mirror

### A. Theory and calculation

General equation for the moment at end of both sides of a mirror is set catch confiscated  $M_1 = hF_1$  and  $M_2 = hF_2$ . The adjustment of the radius of curvature of a mirror bender can accurately be analyzed using the theorem of beam [3]. Changing the shape of the beam under the moments  $M_1$  and  $M_2$ , as shown in figure 4, can be explained by the differential equation given in Equation 2 for visual effects [4].

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \left( \frac{h}{EI} \right) \left[ \frac{F_1 + F_2}{2} + \left( \frac{F_2 - F_1}{L} \right) x \right] \quad (2)$$

where  $E$  is the young modulus,  $h$  is the distance between perpendicular force and the ration center of the beam.  $I = t^3(w/12)$  is the moment of inertia, where  $t$  is the thickness,  $w$  is the width and  $L$  is the length of mirror,  $z$  is the distance along axis of curve change and  $x$  is the length along axis of mirror.

Changing the radius of curvature of the mirror can obtained from the equation  $R \approx 1/(d^2 z/dx^2) \approx EI/hF$ , In taking the moment between both systems allows the nucleus to change or spindle unlike. Therefore, a constant factor must be added into equation. The value of the bending loss factor is a constant which depends on the system design [5], available only from experiments. Therefore, equation 2 will be modified by multiplying the loss bending-factor.

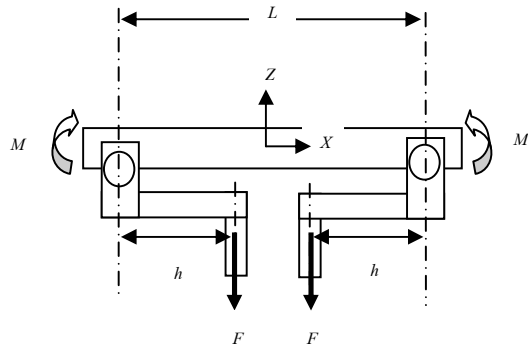


Fig. 4 Diagram of structure of mirror bender system

### B. Mechanical design

This research concentrates to two-arm curvature adjustment for a prototype having dimension of 320mm x 160mm x 134mm. All components are made in the country. The advantage of the two-arm curvature adjustment is based on the ability to apply force freely in centric system. Software that assists in design the system is Solidworks. Structures of the two-arm curvature adjustment are shown in figure 5. The curvature adjustment of the system counts on taking moment at edge of both sides of arm [6].

Most of structures are made in machine shop at Synchrotron Light Research Institute (Public organization) since it is easy to change, add and develop all of components further. Figure 6 and table I show details and all of components of the system.

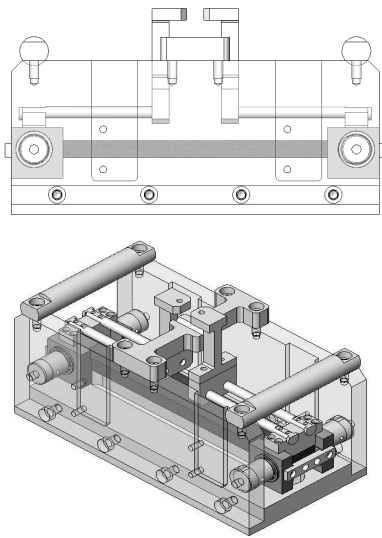


Fig. 5 Structure model of mechanism two-arm bender design.

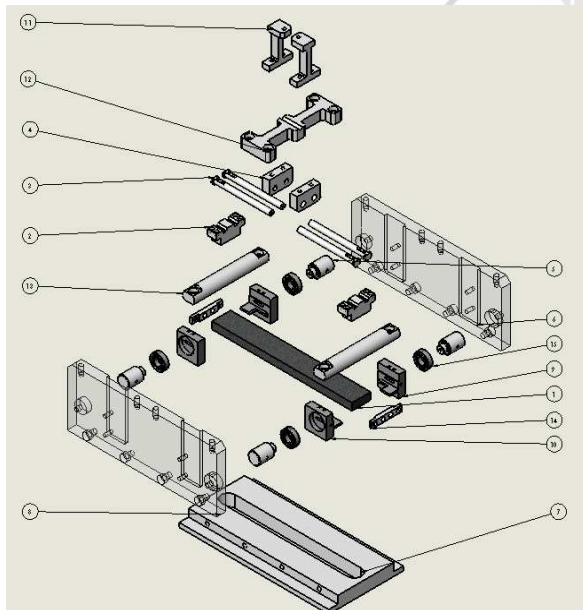


Fig. 6 Component of curvature adjustment system

TABLE I  
DETAILS OF MECHANICAL PARTS OF CURVATURE ADJUSTMENT SYSTEM

No.	Detail
1	Mirror
2	Top clamber
3	Arm bender
4	Arm combiner
5	Shaft
6	Right plate for bender
7	Base plate for bender
8	Left plate for clamber
9	Right Mirror clamber
10	Left Mirror clamber
11	Pulling up bar
12	I bridge
13	Bender handle
14	Bracket for SP
15	BS 6267 RBB-1015-Full,DE ,AC,Full_68

### III. FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION

All simulation components of curvature adjustment system are designed and used COSMOSWorks to analyze in finite element method. The test of mechanical system is to find the relation between various forces that are applied and variation of curvature radius of mirror to obtain. Furthermore, the apply force to make failure of the system takes into account.

#### A. COSMOSWorks characteristics

This project uses COSMOSWorks engineering program to use FEA (finite element analysis) in analysis of characteristics of mirror such as strength and curvature of mirror by applying force to the system. Solidworks and COSMOSWorks program work together and link information between. All components of the system create on Solidwork and analyze with COSMOSWorks. Analysis process starts from meshing geometry into small elements linked together. FEA uses partial differential equation rendering and finding the approximating system. Steps of the process divided into three basic processes as follow:

1. Preprocessing is to assign suitable material properties, and apply boundary conditions in the form of restraints and loads.
2. Solution is to calculate and solve the resulting set of equations.
3. Postprocessing is to view the results in forms of plots, contour diagrams etc.

In FEA simulation, properties of mirror defined are Al Alloy(6061) and Zerodur [7] as shown in table II and table III, respectively. Both materials have a dimension of 40mm x 300mm x 15mm. However, this research especially considers

to simulate the holder set of mirror and mirror shown in figure 7.

TABLE II  
PROPERTIES OF AL ALLOY(6061)

Property	Value	Unit
Elastic Modulus	69,000	N/mm <sup>2</sup>
Poissons Ratio	0.33	-
Shear Modulus	26,000	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	2.4x10 <sup>-5</sup>	-
Density	0.0027	g/ mm <sup>3</sup>
Thermal	170	W/ m K
Conductivity	1,300	J/Kg K
Specific Heat	124.084	N/mm <sup>2</sup>
Tensile Strength	55.1485	N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength		N/mm <sup>2</sup>

TABLE III  
PROPERTIES OF ZERODUR

Property	Value	Unit
Abbe Constant	66	-
Dispersion (n <sub>F</sub> -n <sub>C</sub> )	0.00967	-
Density	2,530	kg/m <sup>3</sup> @ 25 C
Young's' Modulus	9.1x10 <sup>9</sup>	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.24	-
Specific Heat	2.99329	J/Kg K
Coefficient of Thermal Expansion	0.05+0.10x10 <sup>-6</sup>	/C (20-30 C )
Maximum Temperature	600	C

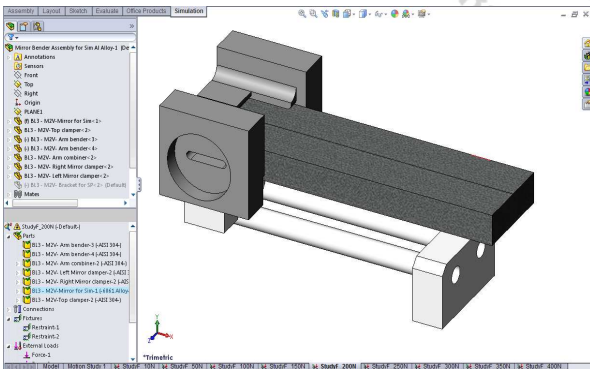


Fig. 7 Simulation of system by COSMOSWorks

IV. RESULTS AND DISCUSSION

From simulation results, various forces plotted are shown in figure 8 and 9. The results from simulation are brought to math lab to find curvature radius and indicate that the more increasing force, the more decreasing curvature radius. The relation between applied force and variation of curvature

radius is shown in table IV and figure 10. Half of structure is used as there is symmetric shape and it saves time when running simulation.

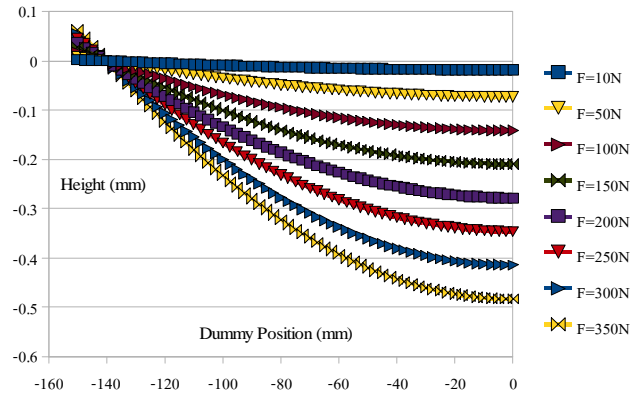


Fig. 8 Relationship between Al-Alloy(6061) position and gaining distance

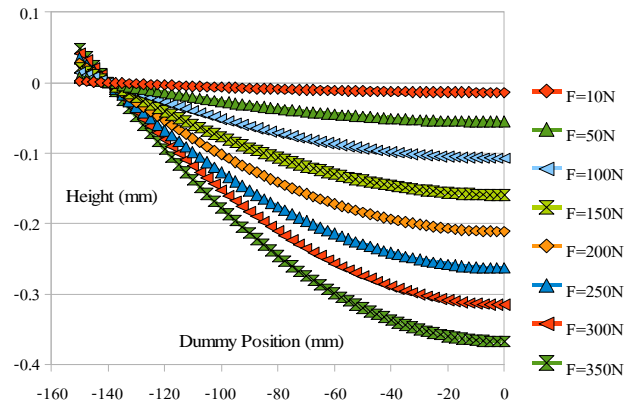


Fig. 9 Relationship between Zerodur position and gaining distance

Figure 10 shows the results from two (3) and (4) that input of load force set 50-350 N is in function of invitation of curvature radius [8]. The simulation results are summarized in Table V.

$$R_{Al\ Alloy(6061)} = -3E-07x^5 - 0.181x^3 + 42.63x^2 - 5221x + 31371 \tag{3}$$

TABLE IV  
VARIATION OF CURVATURE RADIUS TO LOADING FORCE APPLYING TO SYSTEM BETWEEN AL-ALLOY (6061) AND ZERODUR

Al Alloy (6061)		Zerodur	
Force (N)	Radian (mm)	Force (N)	Radian (mm)
10	556,051.00	10	731,806.00
50	138,868.00	50	182,034.00
100	71,633.30	100	93,859.80
150	48,283.50	150	63,239.80
200	36,411.00	200	47,679.70
250	29,230.70	250	38,259.20
300	24,411.30	300	31,954.60
350	20,957.20	350	27,437.70



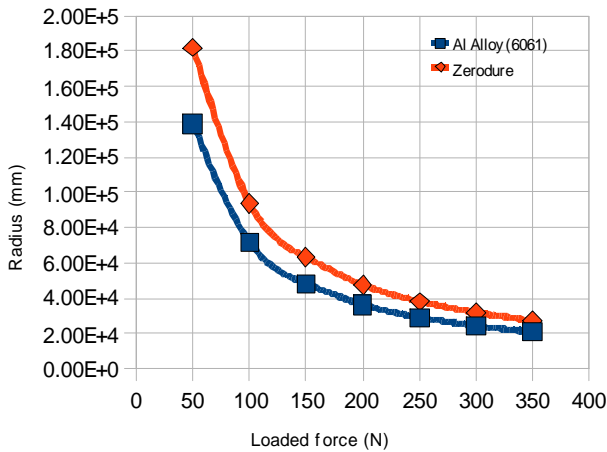


Fig. 10 Relationship between loading force and variation of curvature radius

TABLE V  
THE LOADING FORCE AND CURVATURE RADIUS FROM SIMULATION

Force (N)	Radius (mm)
10	556,051.00
50	138,868.00
100	71,633.30
150	48,283.50
200	36,411.00
250	29,230.70
300	24,411.30
350	20,957.20
400	31,575.10

$$R_{Zerodur} = 1E-09x^6 - 2E-06x^5 + 0.001x^4 - 0.400x^3 + 75.88x^2 - 8,034x + 43,720 \quad (4)$$

where x is the value of the force to a system in Newton unit and R is the radius of curvature change is in millimeter unit.

V. CONCLUSION

This research presents the development of mirror curvature adjustment system for synchrotron light to apply in beamline 3 at Synchrotron light research institute (Public organization). Design processes have complexity since knowledge of engineering has to be applied such as mechanical, electrical, computer and physics etc. This design system is two-arm curvature adjustment which has the advantage of adjusting force freely to both sides of arm. In a case of system assembly or installation might shift the center its system out from position making the ease of focusing beam hitting on the most of Field of view of X-PEEM technique for high accuracy and performance.

The simulation results of curvature adjustment system suitable for using in curvature radius of 50,000-60,000 mm range. In this range, it is able to focus all parts of beam light hitting on field of view of X-PEEM measurement. In addition, loading force at 50-100 N are suitable for Al Alloy(6061)

material having dimension of 300mm x 40mm x 15mm. The loading force in real experiment result is less than 50 N in FEA simulation results that helping less system damage. The different result of both results occurs since all mechanical parts of the system operate and some forces passes through them as virtual force to start initial stage of the system.

ACKNOWLEDGEMENT

This research work is supported by Suranaree University of Technology. Helps and supports from engineers in beam-line at SLRI are greatly appreciated.

REFERENCES

- [1] P. Songsirithigul, B. Kjomrattanawanich, A. Tong-On and H. Nakajima, "Design of the First undulator beamline for the Siam Photon Laboratory," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A* 582, 2007 , pp. 100-102.
- [2] H. A. Padmore, M.R. Howells, S.Irick, T.Renner, R. Sandler and Y. M. Koo, "Some new schemes for producing high-accuracy elliptical X-ray mirrors by elastic bending," *Proc. SPIE*, Denver, Co Aug, 1996.
- [3] W. C. Young, *Roark's Formula for Stress and Strain*, 6<sup>th</sup> ed, McGraw-Hill, 1989.
- [4] A. C. Ugural and S. K. Fenster, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 3<sup>rd</sup> ed, Englewood Cliffs: Prentice Hall , 1995.
- [5] L. Zhang, R. Hustache, O. Hignette, E. Ziegler and A. Freund, "Design optimization of a flexural hinge-based bender for X-ray optics," *J. Synchrotron Rad.* 5, 1998, p. 804-807.
- [6] N. Kamachi, K. Endo, H. Ohashi and T. Ishikawa, "Characteristics of Mechanically-Bent-Shaped Mirror," *2<sup>nd</sup> International workshop on Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation (MEDSI02)*, Argonne, Illinois, USA, 2002 , pp. 113-121.
- [7] M. R. Howells and R. A. Paquin, "Optical Substrate materials for Synchrotron Radiation Beamlines," *SPIE Optical Science, Engineering and Instrumentation*, LBNL-40659, UC-410, pp. 2-6, 1997.
- [8] A. Suthumapiwat, A. Oonsivilai, P. songsirithigul, P. Pao-La-Ord , B. Marungsri and M. Sophon, "Desing Study of Mirror Bender for a Synchrotron Light Beamline," *Proc. Int Conf. on Science Techology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB)*, Thailand, July 2009, pp. 390-394.